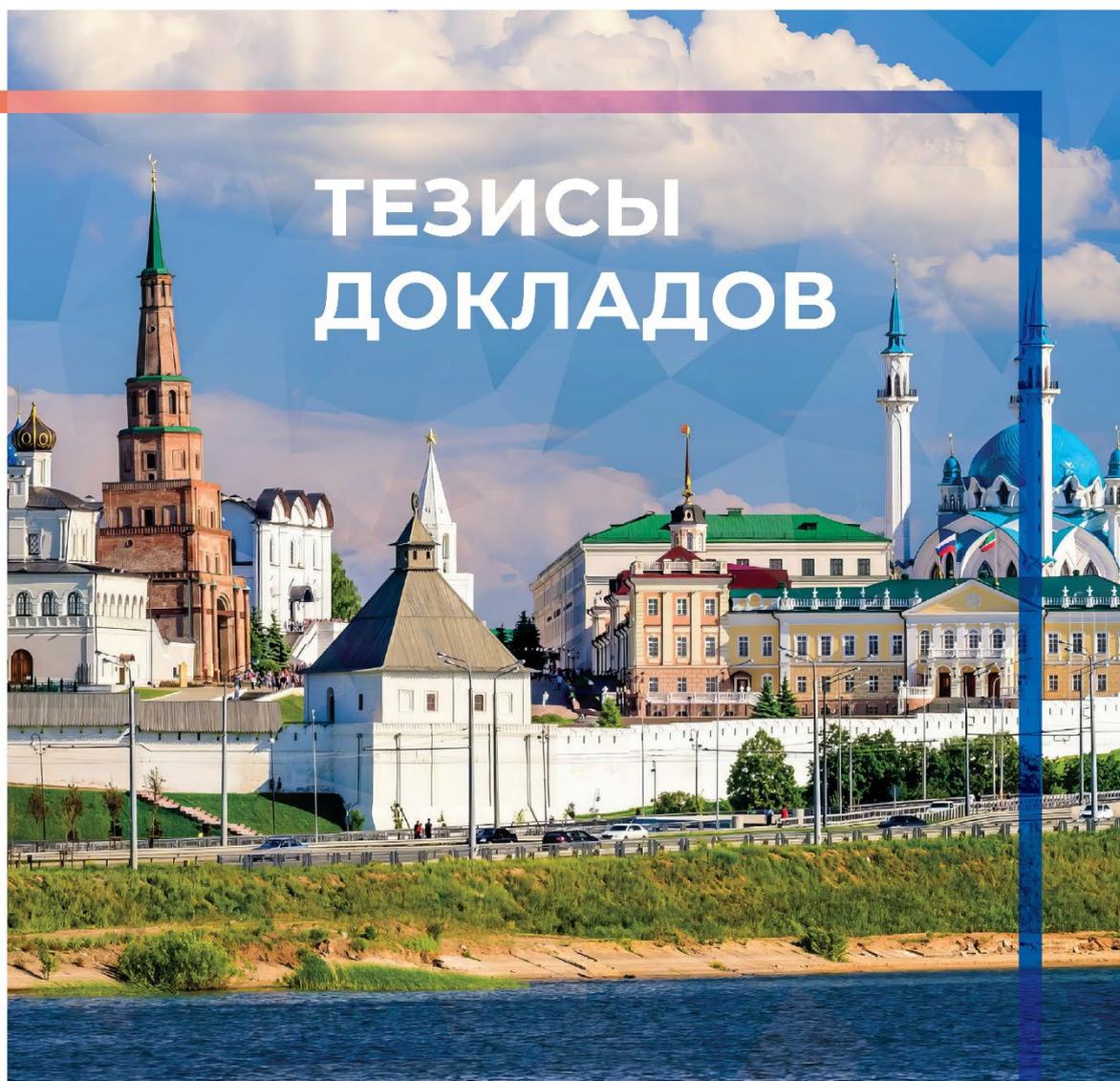




ХОЛОЭКСПО 2024

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГОЛОГРАФИИ И ПРИКЛАДНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Казань, 9–13 сентября 2024 г.



ХОЛОЭКСПО 2024

**XXI Международная конференция по голографии
и прикладным оптическим технологиям**

(Казань, 9–13 сентября 2024 года)

Тезисы докладов



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана

2024

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1
ББК 22.343.4
Х73

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8328/>

Х73 **ХОЛОЭКСПО 2024** : XXI Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Казань, 9–13 сентября 2024 года) : тезисы докладов / Общество с ограниченной ответственностью «Холоэкспо наука и практика». — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. — 398 с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6441-8

В сборнике представлены тезисы докладов XXI Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям ХОЛОЭКСПО 2024 (Казань, 9–13 сентября 2024 г.) по следующим тематикам: тенденции развития оптических технологий, дифракционные и градиентные оптические элементы и системы, оптика лазерных пучков и структурированного света, системы визуализации и отображения информации для AR/VR, оптические защитные технологии, интегральная фотоника, интерферометрия и оптическая метрология, квантовые оптические технологии, технологии микро- и наноструктурирования, цифровая голография и методы визуализации, современные функциональные оптические материалы, биофотоника, новые прикладные оптические технологии, оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации.

Издание рассчитано на широкий круг читателей, аспирантов, молодых ученых и исследователей, а также на специалистов в области оптических технологий.

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1
ББК 22.343.4

Издается в авторской редакции.

ISBN 978-5-7038-6441-8

© ООО «Холоэкспо наука и практика», 2024
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024

ХОЛОЭКСПО 2024

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГОЛОГРАФИИ И ОПТИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ

Платиновый спонсор



АО «НПО «КРИПТЕН»

Бронзовые спонсоры



АО «НТЦ «Атлас»



ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»



ООО «ХолоГрэйт»

Спонсоры



ООО «Джеймс Ривер Бранч»



ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТОНИКС»

Партнеры



АО «Компания Славич»



ООО «Альянс Оптических Систем»



ООО «Активная Фотоника»



АО «НПО «ГИПО»



ООО «Оптико-голографические приборы»



ООО «Лазерный Центр»

Информационные партнеры

Лазерная ассоциация

Оптическое общество имени Д.С. Рождественского

Научно–техническое издание «Оптический журнал»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Журнал «Фотоника»

Журнал «Мир техники кино»

«Голографика»

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Программный комитет

Председатель программного комитета **Венедиктов Владимир Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

Заместитель председателя программного комитета **Грейсхус Григорий Исаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия.

Заместитель председателя программного комитета **Танин Леонид Викторович**, доктор физико-математических наук, академик Международной инженерной академии (МИА), член Совета президентов МИА, главный советник ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Беларусь.

Барышников Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, директор НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Вишняков Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия.

Демин Виктор Валентинович, кандидат физико-математических наук, доцент, первый проректор Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия.

Захаров Юрий Николаевич, кандидат физико-математических наук, преподаватель медицины Гарвардской медицинской школы, Старший научный сотрудник VIDMC Центра передовой биомедицинской визуализации и фотоники, Гарвардский университет, Бостон, США.

Злоказов Евгений Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва, Россия.

Кайтуков Чермен Борисович, научный консультант АО «НТЦ «АТЛАС», Москва, Россия.

Ковалев Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, старший научный сотрудник ОКРФ Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

Корольков Виктор Павлович, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия.

Кортаев Валерий Викторович, доктор технических наук, профессор Университета ИТМО, главный редактор Оптического журнала, Санкт-Петербург, Россия.

Котляр Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры технической кибернетики СГАУ, заведующему лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН, Самара, Россия.

Кудряшов Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины, Центр лазерных и нелинейно-оптических технологий, Отделение квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова, Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН), Москва, Россия.

Лукин Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ИОА СО РАН, Томск, Россия.

Никоноров Николай Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Павлычева Надежда Константиновна, доктор технических наук, профессор Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия.

Петров Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

Петров Николай Владимирович, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории цифровой и изобразительной голографии, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Путилин Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

Скиданов Роман Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт систем обработки изображения РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самарский аэрокосмический университет имени С.П. Королева, Самара, Россия.

Соломашенко Артем Борисович, научный сотрудник, руководитель Лаборатории «Голография и волноводная оптика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Страупе Станислав Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Квантовой электроники, Отделение радиофизики, Физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова.

Тучин Валерий Викторович, член-корреспондент РАН, профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой оптики и биофотоники, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия.

Шамрай Александр Валерьевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой электроники Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

Секция 1

***Дифракционные и градиентные
оптические элементы***

Ламинированная радиально-градиентная элементная база тепловизионной оптики

Г. И. Грейсук¹, И. А. Левин², С. В. Казин¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Красногорск, Россия

В настоящем докладе представлена методика компоновки и расчета простых по конструкции инфракрасных объективов, элементная база которых наряду с однородными линзами включает либо одиночную коаксиально-ламинированную радиально-градиентную линзу, либо совместно с ней и дифракционный оптический элемент. Методика позволяет оценить предельно достижимые оптические характеристики таких объективов, рассчитанных на одинарный или на двойной ИК-диапазон, включающий средневолновое и длинноволновое инфракрасное излучение. Эффективность как совместного использования градиентного и дифракционного элементов, так и представленной методики продемонстрирована на примере расчета сверхвысокоапертурного градиентно-дифракционного объектива.

Ключевые слова: Коаксиально-ламинированная радиально-градиентная линза, Дифракционный оптический элемент, Методика компоновки и расчета простых по конструкции инфракрасных объективов, Сверхсветосильный двухдиапазонный градиентно-дифракционный Объектив

Введение

Исследования в области оптического материаловедения привели к разработке специальной серии новых марок халькогенидных стекол, прозрачных в широком диапазоне инфракрасного (ИК) спектра. Эти стекла наряду с расширенным интервалом значений показателя преломления ($2,37 < n < 2,79$) отличаются близкими значениями температурных коэффициентов теплового расширения, а также совместимыми профилями вязкости [1–3]. Преимуществом данной серии стекол является возможность создания на их основе композитных градиентных материалов методом ламинирования, заключающимся во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки [4, 5]. Диапазон оптических характеристик и количество марок новых халькогенидных стекол позволяет с достаточной гибкостью варьировать значением градиента показателя преломления формируемого неоднородного материала, что расширяет возможности коррекции как монохроматических, так и хроматических аберраций. Важно также отметить, что халькогенидные стекла относятся к материалам, допускающим прецизионное прессование в качестве метода формообразования поверхности оптического элемента [6]. Это в совокупности с методом ламинирования открывает возможности создания градиентного материала для линз с оптимизированными под конкретное схемное решение оптическими свойствами.

Методика расчета высокоапертурного тепловизионного объектива

Для расчета простейшего трехлинзового ИК-объектива с радиально-градиентной линзой (РГЛ) можно предложить следующую методику, направленную на получение предельно возможных оптических характеристик для триплета, включающего одну РГЛ, размещенную между двумя однородными линзами.

На первом этапе производится компоновка и расчет высокотемпературного триплета-монохромата, в качестве матричного высокоразрешающего приемника излучения мог использоваться современный неохлаждаемый микроболометр [7, 8]. В случае двойного ИК-диапазона, представляющего сегодня наибольший интерес и включающего средневолновое (3,5–5 мкм) и длинноволновое (8–11,9 мкм) ИК-излучение, за расчетную длину волны триплета-монохромата можно принять $\bar{\lambda} = 6,5$ мкм. Очевидно, что в этом случае оптические характеристики объектива (при прочих равных условиях) будут зависеть лишь от показателей преломления однородных линз, распределения и перепада показателя преломления РГЛ на этой длине волны.

За значения показателей преломления материалов фронтальной и оконечной однородных линз целесообразно принять некоторые средние значения показателей преломления халькогенидных стекол с относительно низкой и относительно высокой дисперсией ($n_1 = 2,6$ и $n_3 = 2,8$). Что касается остальных конструктивных параметров, то они могут быть получены путем расчета и оптимизации в программе оптического проектирования ZEMAX [9].

Для демонстрации методики в настоящем докладе фокусное расстояние объектива было принято равным $f' = 40$ мм, а угловое поле зрения $2\omega = 19,5^\circ$ соответствовало размеру матрицы неохлаждаемого микроболометра. Диафрагменное число объектива принималось равным 0,8. РГЛ модели-

ровалась в ZEMAX поверхностью Gradient 3, показатель преломления которой описывается следующим выражением:

$$n(\rho) = n_0 + n_1\rho^2 + n_2\rho^4 + n_3\rho^6, \quad (1)$$

где ρ — расстояние от оптической оси системы, а базовый показатель преломления n_0 и коэффициенты радиального градиента n_1 – n_3 не зависят от длины волны. При оптимизации базовый показатель преломления этой поверхности n_0 был фиксированным и равным соответствующему показателю преломления халькогенидного стекла NRL–16, а показатель преломления $n(\rho)$ на краю поверхности поддерживался равным соответствующему показателю преломления халькогенидного стекла NRL–13. В результате принятые меры по контролю показателя преломления на краю поверхности Gradient 3 гарантировали, что световым диаметром РГЛ окажутся охвачены все четыре ламинируемых слоя халькогенидных стекол и будет обеспечено сохранение значения показателя преломления стекла, используемого для данного слоя: на оси для внутренней цилиндрической заготовки (NRL–16); на цилиндрических поверхностях каждого внутреннего трубчатого слоя (NRL–15, NRL–14) с радиусами ρ , равными половине суммы радиусов его внутренней и внешней цилиндрических поверхностей; на внешней цилиндрической поверхности для верхнего трубчатого слоя (NRL–13) [1–3].

У объектива-монохромата благодаря оптимальному распределению показателя преломления РГЛ, оптимальным толщинам элементов и воздушных промежутков, а также кривизнам и асферичности преломляющих поверхностей линз хорошо скорректированы монохроматические aberrации, и на пространственной частоте $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ он формирует изображение по всему полю с контрастом не менее 0,66. $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ — это частота Найквиста коммерчески доступных сегодня неохлаждаемых микроболометров [7, 8] с форматом 640×512 и шагом матрицы 17 мкм. График зависимости показателя преломления композитного градиентного материала РГЛ на длине волны $\bar{\lambda} = 6,5 \text{ мкм}$ представлен на рис. 1.

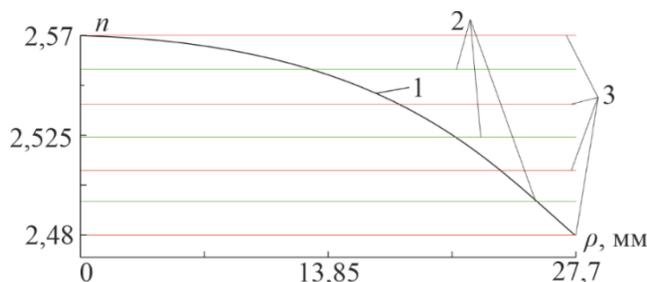


Рис. 1. Иллюстрация к модели композитной структуры градиентного материала:

1 — распределение показателя преломления на длине 6,5 мкм; 2 — значения показателя преломления неоднородного материала на поверхностях раздела слоев; 3 — значения показателей преломления стекол, используемых для соответствующего слоя неоднородного материала

На следующем этапе проектирования осуществляется переход к полихроматическому излучению и замена поверхности Gradient 3, моделирующей РГЛ, поверхностью типа Gradient 6. Зависимость показателя преломления неоднородного материала от расстояния от оптической оси ρ для данного типа поверхности описывается выражением

$$n(\lambda, \rho) = n_0(\lambda) + n_1(\lambda)\rho^2 + n_2(\lambda)\rho^4 + n_3(\lambda)\rho^6 + n_4(\lambda)\rho^8, \quad (2)$$

а каждый из коэффициентов $n_i(\lambda)$ в формуле (2) является функцией длины волны:

$$n_i(\lambda) = A_i + B_i\lambda^2 + \frac{C_i}{\lambda^2} + \frac{D_i}{\lambda^4}, \quad (3)$$

где $i = 0, 1, \dots, 4$; A_i – D_i — спектральные коэффициенты; λ — длина волны в нанометрах. Следуя процедуре, подробно изложенной в разделе «Коаксиально-ламинированная РГЛ в программе ZEMAX» работы [10], получают спектральные коэффициенты A_i – C_i и $D_i = 0$ для каждого из параметров n_i , величины оптической силы реальной РГЛ на трех длинах волн рабочего спектрального диапазона и дисперсионные коэффициенты бесконечно тонкого аналога РГЛ, имеющего те же самые оптическую силу и хроматизм, что и у толстой РГЛ.

Вышеизложенное позволяет оптимально подобрать реальные материалы однородных линз и получить оптические силы всех элементов из условия достижения требуемой оптической силы объектива в целом и степени его хроматической коррекции. Это условие может быть записано в виде системы уравнений в достаточно простом виде в предположении, что исходная оптическая схема состоит из тонких элементов, разделенных воздушными промежутками. Здесь следует сразу же заметить, что при неизменных осевой толщине и оптической силе на расчетной длине волны заданного спектрального диапазона дисперсионные коэффициенты РГЛ слабо зависят от соотношения кривизны ее преломляющих поверхностей. Это обстоятельство позволяет задавать в вышеуказанной системе уравнений модель реальной РГЛ, выполненной из известного градиентного материала, только одной оптической силой на расчетной длине волны.

При выбранной паре однородных оптических материалов известными в вышеуказанной системе уравнений окажутся дисперсионные параметры (числа Аббе v_i и нормированные числа Аббе на относительные частные дисперсии $v_i^{(v)}$), а неизвестными — оптические силы элементов $\varphi_i(\bar{\lambda})$. Наконец, для каждого набора оптических сил элементов и для двух воздушных промежутков между ними, применяя формулы расчета хода апертурного параксиального луча, можно легко получить требуемые значения его высот на каждом из элементов. Выбор значений воздушных промежутков определяется исходя из габаритных ограничений.

Таким образом, для каждой пары однородных оптических материалов, компонуемых последовательно из заранее составленного каталога, в результате итерационного решения указанной системы уравнений можно получить набор оптических сил двух однородных и одной РГЛ. При этом лучшей парой однородных оптических материалов можно считать ту, которой соответствует минимальное значение невязок уравнений хроматической коррекции и наилучшее соотношение оптических сил всех трех элементов схемы [10].

Далее в Zemax-файле объектива-монохромата производятся замены модельных материалов однородных линз на найденную выше лучшую реальную пару халькогенидных стекол, а поверхности «Gradient 3» — на поверхность «Gradient 6». Для этого предварительно полученные спектральные коэффициенты A_i-C_i и $D_i = 0$ для каждого из параметров n_i заносятся в файл GLC.DAT каталога Glasscat программы оптического проектирования Zemax. И, конечно, вводится рабочий спектральный диапазон, включающий средневолновое (3,5–5 мкм) и длинноволновое (8–11,9 мкм) ИК-излучение.

Завершающей операцией является оптимизация по кривизнам и асферичности поверхностей всех линз, а также по толщинам линз и воздушным промежуткам. Она показала, что коррекция хроматизма приводит к нарушению ранее достигнутой коррекции полевых аберраций и добиться их одновременного снижения до приемлемого уровня не представляется возможным. В лучшем варианте в указанном выше двойном спектральном диапазоне триплет способен на пространственной частоте $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ формировать изображение по всему полю с контрастом $T \geq 0,23$ при диафрагменном числе, равном 0,84, и контрастом $T \geq 0,36$ при диафрагменном числе, равном 0,86. В то же время в одинарных средневолновом или длинноволновом спектральных диапазонах после соответствующей переоптимизации объектив способен на пространственной частоте $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$ формировать изображение по всему полю с контрастом $T \geq 0,5$ при диафрагменном числе, равном 0,84.

Обеспечить уровень остаточного хроматизма, сопоставимый с дифракционным пределом в двойном спектральном диапазоне, и практически восстановить коррекцию полевых аберраций позволило введение в схему триплета дифракционного оптического элемента (ДОЭ). При этом очевидно, что реальный положительный эффект от использования ДОЭ может быть получен только при условии высокой дифракционной эффективности и минимизации ее зависимости от длины волны и угла падения излучения на элемент. С этой целью микроструктуру ДОЭ ИК-систем следует выполнять двухслойной с двумя внутренними пилообразными рельефами, как это показано на рис. 2.

Рельефы ДОЭ выполняются в материальных подложках со значительно отличающимися коэффициентами дисперсии [11, 12]. Оптическая схема полученного в результате градиентно-дифракционного объектива представлена на рис. 3, а его конструктивные параметры — в табл. 1 и табл. 2.

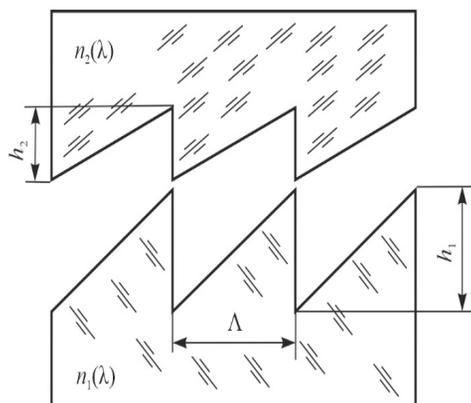


Рис. 2. Двухслойная пилообразная дифракционная микроструктура с двумя внутренними рельефами

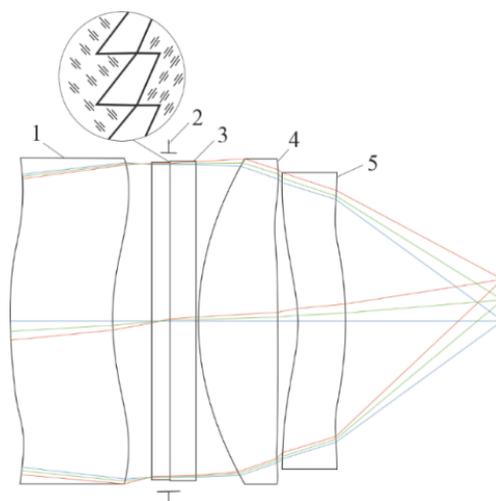


Рис. 3. Оптическая схема градиентно-дифракционного объектива:
1, 5 — однородные линзы; 2 — апертурная диафрагма; 3 — двухслойный ДОЭ; 4 — РГЛ

Таблица 1. Основные конструктивные параметры объектива

Номер поверхности	Радиус, мм	Толщина, мм	Оптический материал
1 ^a	∞	∞	—
2	63,565	19,650	AMTIR3
3	37,984	6,3	—
4	∞	2,5	PBF2
5 ^b	∞	0	—
6 ^c	∞	2,0	HWS4
7	∞	0,2	—
8 ^d	39,884	12,412	NRLGRIN-D1
9	-184,042	3,634	—
10	-32,286	8,380	IIR-SF1
11	-43,756	24,959	—
12 ^e	∞	0	—

Прим.

a — плоскость предмета

b — апертурная диафрагма диаметром 55,6 мм

c — поверхность типа Vinay 2: $m = 1$, $A_1 = -0,14225 \text{ мм}^{-2}$, $A_2 = 0,32889 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-4}$,
 $A_3 = -1,31699 \times 10^{-7} \text{ мм}^{-6}$, $A_4 = -7,99904 \times 10^{-10} \text{ мм}^{-8}$, $A_5 = 1,31998 \times 10^{-12} \text{ мм}^{-10}$, $A_6 = -6,37355 \times 10^{-16} \text{ мм}^{-12}$

d — поверхность типа Gradient 6

e — плоскость изображения

Таблица 2. Дополнительные характеристики поверхностей объектива

Номер поверхности	Коническая постоянная k	Коэффициент асферичности			
		$\alpha_2, \text{мм}^{-3}$	$\alpha_3, \text{мм}^{-5}$	$\alpha_4, \text{мм}^{-7}$	$\alpha_5, \text{мм}^{-9}$
2	–	$-6,4364 \times 10^{-6}$	$-4,3703 \times 10^{-9}$	$1,2922 \times 10^{-12}$	$-5,2250 \times 10^{-15}$
3	–	$-2,0779 \times 10^{-5}$	$1,4518 \times 10^{-9}$	$5,0958 \times 10^{-12}$	$-3,1953 \times 10^{-15}$
8	-2,291	–	–	–	–
9	–	$6,5231 \times 10^{-6}$	$-2,0734 \times 10^{-9}$	$7,0811 \times 10^{-13}$	$-2,7659 \times 10^{-15}$
10	–	$3,7892 \times 10^{-5}$	$-5,4257 \times 10^{-8}$	$6,2063 \times 10^{-11}$	$-2,4154 \times 10^{-14}$
11	–	$2,4167 \times 10^{-5}$	$-2,1080 \times 10^{-8}$	$-8,7380 \times 10^{-13}$	$3,2251 \times 10^{-14}$

При этом все поверхности линз в этих таблицах (за исключением поверхности Gradient 6) представляют собой так называемые четные асферические поверхности, описываемые в ZEMAX уравнением

$$z(\rho) = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + \sum_{p=2} \alpha_p \rho^{2p}, \quad (4)$$

где $z(\rho)$ — координата точки поверхности, отстоящей от оптической оси на расстоянии ρ в системе координат, плоскость XOY которой касается вершины этой поверхности; c — кривизна поверхности в ее вершине; k — коническая постоянная; α_p — коэффициенты асферичности поверхности.

Что же касается дифракционной микроструктуры ДОЭ, то она в рамках ZEMAX моделируется поверхностью типа Binary 2 с фазовой задержкой вида

$$\Psi(\rho) = m \sum_{j=1} A_j \rho^{2j}, \quad (5)$$

где m — номер рабочего дифракционного порядка; A_j — постоянные коэффициенты.

Пилообразная двухрельефная микроструктура ДОЭ состоит всего из 5 кольцевых зон, и при этом ширина самой узкой зоны, т. е. минимальный период микроструктуры, $\Lambda > 3,8$ мм. Оптимальные глубины рельефов этой микроструктуры — $h_1 = 84,4$ мкм и $h_2 = 42,8$ мкм в материалах PBF2 и HWS4 соответственно. В интервале углов падения излучения на ДОЭ из воздуха $\pm 11,2^\circ$ обеспечивается дифракционная эффективность не менее 93 % во всем рабочем спектральном диапазоне. Как и у прототипа, у рассчитанного градиентно-дифракционного объектива заднее фокусное расстояние $f' = 40$ мм, а угловое поле зрения $2\omega = 19,5^\circ$. При диафрагменном числе, равном 0,8, в двойном ИК-диапазоне (3,5–5 мкм и 8–11,9 мкм) он формирует изображение по всему полю с контрастом $T \geq 0,51$ на пространственной частоте $N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$. Продольный габарит объектива, т. е. расстояние от фронтальной плоскости до плоскости изображения, равен 79,9 мм. Максимальный хроматизм положения благодаря апохроматической коррекции меньше 17 мкм при дифракционном пределе 13 мкм, а дисторсия не превышает 0,6 %.

Заключение

В настоящем докладе представлена методика компоновки и расчета простых по конструкции объективов, рассчитанных на одинарный или на двойной ИК-диапазон, включающий средневолновое (3,5–5 мкм) и длинноволновое (8–11,9 мкм) ИК-излучение. Элементная база этих объективов наряду с однородными линзами включает либо одиночную коаксиально-ламинированную РГЛ, либо совместно РГЛ и ДОЭ. В первом случае благодаря РГЛ и оптимальному подбору халькогенидных стекол однородных линз у этих объективов достигим такой уровень коррекции монохроматических и хроматических aberrаций, который позволяет им при диафрагменном числе, равном 0,84, формировать изображение требуемого размера с контрастом $T \geq 0,5$ на пространственной частоте Найквиста ($N_N = 30 \text{ мм}^{-1}$) коммерчески доступных сегодня неохлаждаемых микроболометров с форматом 640×512 и шагом матрицы 17 мкм.

Однако такие оптические характеристики достижимы только в одинарных средневолновом или длинноволновом ИК-диапазонах. Распространить их и на двойной ИК-диапазон, одновременно уменьшив диафрагменное число до 0,8, позволяет включение в схему объектива одного ДОЭ. Оптическая схема, конструктивные параметры и достигнутые оптические характеристики одного из рас-

считанных градиентно-дифракционных объективов наглядно демонстрируют эффективность как совместного использования градиентного и дифракционного элементов, так и представленной методики компоновки и расчета объективов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FSGS-2024-0005.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Beadie, G.** Temperature-dependent dispersion fitting for a recent infrared glass catalog / G. Beadie, E. Stover, D. Gibson // SPIE Conference Proceeding. — 2019. — Vol 10998. — P. 1099804. — DOI:10.1117/12.2518494.
- [2] **Bayya, S.** Design and fabrication of multispectral optics using expanded glass map / S. Bayya, D. Gibson, V. Nuygen, J. Sanghera, M. Kotov, G. Drake, J. Deegan, G. Lindberg // SPIE Conference Proceeding. — 2015. — Vol 9451. — P. 94511N. — DOI:10.1117/12.2177289.
- [3] **Gibson, D.** Diffusion-based gradient index optics for infrared imaging / A. Ivanov, V. Petrov, D. Sidorov D. Gibson, S. Bayya, V. Nguyen, J. Myers, E. Fleet, J. Sanghera, J. Vizgaitis, J. Deegan, G. Beadie // Optical Engineering. — 2020. — Vol 59. — № 11. — P. 112604. — DOI:10.1117/1.OE.59.11.112604.
- [4] **Gibson, D.** IR GRIN optics for imaging / D. Gibson, S. Bayya, V. Nguyen, J. Sanghera, M. Kotov, R. Miklos, C. McClain // SPIE Conference Proceeding. — 2016. — Vol 9822. — P. 98220R. — DOI:10.1117/12.2224094.
- [5] **Gibson, D.** GRIN optics for multispectral infrared imaging / D. Gibson, S. Bayya, V. Nguyen, J. Sanghera, M. Kotov, G. Drake // SPIE Conference Proceeding. — 2015. — Vol 9451. — P. 94511P. — DOI:10.1117/12.2177136.
- [6] **Schaub M.** Molded optics design and manufacture / M. Schaub, J. Schwiegerling, E. Fest, A. Symmons, R. Shepard. — Boca Raton: CRC Press, 2011. — 260 p.
- [7] SemiConductor Devices / URL: https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2019/07/Bird640-17-ceramic_brochure_v3_PRINT.pdf
- [8] АСТРОН тепловизионные системы / URL: <https://astrohn.ru/product/astrohn-64017-2/>
- [9] Zemax / URL: <http://www.zemax.com/pages/opticstudio/>
- [10] **Грейсух, Г. И.** Моделирование ламинированной радиально-градиентной линзы; расчет и достижимые характеристики двухдиапазонного инфракрасного триплета с такой линзой / Г. И. Грейсух, И. А. Левин, Е. Г. Ежов // Оптический журнал. — 2024. — Том 91. — № 10. (в печати)
- [11] **Greisukh, G.** Design of ultra-high-aperture dual-range athermal infrared objectives / G. Greisukh, I. Levin, E. Ezhov // Photonics. — 2022. — Vol 9. — № 10. — P. 742. — DOI:10.3390/photonics9100742.
- [12] **Грейсух, Г. И.** Дифракционные элементы в тепловизионных монофокальных двухдиапазонных объективах: проектирование и технологические аспекты / Г. И. Грейсух, И. А. Левин, О. А. Захаров // Компьютерная оптика. — 2024. — Том 48. — № 2. — С. 210–216. — DOI:10.18287/2412-6179-СО-1336.

Laminated radial gradient element base of thermal imaging optics

G. I. Greisukh¹, I. A. Levin², S. V. Kazin¹

¹*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia*

²*Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Russia*

A method for the layout and calculation of simple infrared objectives is presented, the element base of which, along with homogeneous lenses, includes either a single coaxially laminated radial gradient lens, or together with it a diffractive optical element. The technique allows us to evaluate the maximum achievable optical performance of such objectives designed for single or double IR range, including medium-wave and long-wave infrared radiation. The effectiveness of both the combined use of gradient and diffractive elements and the presented technique is demonstrated by the example of calculating an ultra-high-aperture gradient diffractive objective.

Keywords: *Coaxial laminated radial gradient lens, Diffractive optical element, Method for the layout and calculation of simple infrared objectives, Ultra-high-aperture dual-band gradient diffractive objective*

Казанская школа дифракционной оптики

Н. К. Павлычева¹, А. А. Белокопытов², В. П. Иванов^{1,3}, А. В. Лукин³, Р. Х. Макаева¹, А. Н. Мельников³, Э. Р. Муслимов¹, Ф. А. Саттаров³, А. Ф. Скочилов³, И. А. Файзрахманов⁴, С. С. Харинцев⁵

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, КАИ, Казань, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «НПП ИРВИС», Казань, Россия

³Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

⁴Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского ОСП ФИЦ Казанского Научного Центра Российской Академии наук, Казань, Россия

⁵Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Россия

В докладе представлен обзор направлений исследований и разработок, проводимых в рамках Казанской школы дифракционной оптики в период с 2015 года по настоящее время.

Ключевые слова: *Нарезные и голограммные дифракционные решетки, Классическая, круговая и маятниковая делительная техника, Цилиндрическая синтезированная голограмма, Реплицирование оптических элементов, Композитный олограммный оптический элемент, Методология проектирования спектрографов, Голографическая интерферометрия, Ионно-лучевое профилирование, Пленочные метаматериалы*

В 2015 г. 12-я Международная конференция «ГОЛОЭКСПО-2015» проводилась в Казани, на базе Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ (КНИТУ-КАИ), при активной спонсорской поддержке оптических предприятий города — Акционерного общества «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики» (АО «НПО ГИПО») и Акционерного общества «Казанский оптико-механический завод» (АО «КОМЗ»). Представители Казанской школы дифракционной оптики активно участвовали в работе этой конференции, представив результаты своих исследований и разработок в виде более двух десятков устных (пленарных и секционных) и стендовых докладов [1].

В настоящем докладе дан обзор исследований и разработок, проведенных по научно-техническим направлениям дифракционной оптики в период с 2015 г. по настоящее время. Главными результатами и достижениями в рамках рассматриваемого периода в АО «НПО ГИПО», КНИТУ-КАИ, Казанском (Приволжском) федеральном университете (КФУ) и Казанском физико-техническом институте им. Е. К. Завойского (КФТИ) являются:

— в АО «НПО ГИПО»:

- сохранены и поддерживаются в работоспособном состоянии парк делительной техники и технологии нарезных дифракционных решеток и реплик (Знаменский М.Ю., Лукашевич Я.К., Федулова Н.А., Чугунов Ю.П.) [2];

- продолжены работы по совершенствованию и исследованию делительных машин маятникового типа (ДММТ) [3, 4]. В частности, предложено обеспечить контроль формы крупноформатных асферических поверхностей главных зеркал телескопов наземного и космического базирования при помощи нескольких одинаковых цилиндрических голограмм, которые могут быть изготовлены с помощью ДММТ [5, 6];

- сохранены и совершенствуются технологии экспонирования, обработки и «профилирования» голограммных дифракционных решеток на слоях халькогенидов [2];

- развернуты исследования и разработки по созданию дифракционных решеток с предельно высокой лучевой стойкостью и дифракционной эффективностью;

- продолжены работы по совершенствованию технологии прецизионного реплицирования оптических элементов, в том числе с асферическими рабочими поверхностями, и ее практической реализации в современном серийном оптическом производстве [7, 8];

- сохранены и развиваются технологии получения объемно-фазовых голограммных оптических элементов на слоях бихромированной желатины и изделий на их основе: пропускающие и отражательные дифракционные решетки, Notch-фильтры, гризмы;

— на кафедре оптико-электронных систем КНИТУ-КАИ:

- уделяется значительное внимание подготовке специалистов разного уровня, ежегодно несколько выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров посвящены исследованиям в области дифракционной оптики;

- подготовлены и успешно защищены одна докторская и семь кандидатских диссертаций;

- предложен композитный голограммный оптический элемент, представляющий собой голограмму, записанную «сшивкой» нескольких субапертур; преимущество этого элемента подтверждено экспериментально [9–11];

- предложен голограммный дисплей волноводного типа, основанный на совместной оптимизации параметров оптического разрешения и дифракционной эффективности [12–14];

- предложена методология проектирования спектрографов на базе объемно-фазовых дифракционных решеток, основанная на комплексном применении методов трассировки лучей и анализа связанных волн, обеспечивающая одновременное повышение спектрального разрешения и энергетических характеристик [15];

— на кафедре технической физики КНИТУ-КАИ проводятся исследования вибрационных характеристик деталей машиностроения и диагностика их технического состояния с применением голографической интерферометрии [16, 17];

— развиваемые в течение ряда лет в КФУ методы получения пленочных метаматериалов открывают возможности построения дифракционных элементов с принципиально новыми оптическими свойствами [18];

— созданный в КФТИ уникальный линейный ионно-лучевой ускоритель ИЛУ-3 был успешно использован для профилирования рельефно-фазовых голограммных дифракционных решеток АО «НПО ГИПО», и в настоящее время совершенствуются его технологические возможности [19].

Краткий обзор основных направлений исследований и разработок, проводимых представителями Казанской школы дифракционной оптики в рассматриваемый период, достаточно убедительно демонстрирует, что Казанская школа дифракционной оптики и в настоящее время вносит значительный вклад в развитие этой области оптической науки, технологии и оптического приборостроения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Голография. Наука и практика:** Сборник трудов 12-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2015». Казань, 12–15 октября 2015 года / отв. ред. М. А. Ручкина. — Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2015. — 396 с.
- [2] **Иванов, В. П.** К юбилею Государственного института прикладной оптики / В. П. Иванов // *Контенант*. — 2017. — Том 16. — № 2. — С. 125–128.
- [3] **Патент № 2691821 РФ.** Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях / А. В. Лукин, А. Н. Мельников. — Оpubл. 18.06.2019.
- [4] **Мельников, А. Н.** Новые принципы формирования штриховых структур светосильных неклассических нарезных тороидальных дифракционных решеток с применением делительных машин маятникового типа / А. Н. Мельников // *Оптический журнал*. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 95–105. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-95-105
- [5] **Лукин, А. В.** Новые возможности лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки крупноформатных составных зеркал телескопов / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, А. Ф. Скочилов // *Оптический журнал*. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 80–94. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-80-94
- [6] **Мельников, А. Н.** Возможность применения цилиндрических осевых синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей / А. Н. Мельников // *Оптический журнал*. — 2023. — Том 90. — № 9. — С. 45–54. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-45-54
- [7] **Лукин, А. В.** Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // *Оптический журнал*. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42–50. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50
- [8] **Лукин, А. В.** Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве / А. В. Лукин, Н. А. Гурун, А. Н. Мельников, Е. Г. Лисова, А. А. Свистунова // *Оптический журнал*. — 2023. — Том 90. — № 7. — С. 107–115. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115
- [9] **Муслимов, Э. Р.** Концепция композитных голограммных оптических элементов / Э. Р. Муслимов, Н. К. Павлычева, И. А. Гуськов // *Фотоника*. — 2020. — Том 14. — № 7. — С. 586–599. — DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.7.586.599
- [10] **Muslimov, E.** Spectrograph with a composite holographic dispersive element / E. Muslimov, N. Pavlycheva, I. Guskov, D. Akhmetov, D. Kharitonov // *Proc. of SPIE*. — 2021. — Vol. 11871. — P. 1187112. — DOI: 10.1117/12.2596922
- [11] **Ахметов, Д. М.** Моделирование и оптимизация оптических схем с композитными голограммными элементами / Д. М. Ахметов, Э. Р. Муслимов, Д. Ю. Харитонов, Н. К. Павлычева, И. А. Гуськов, А. Р. Гильфанов // *Оптический журнал*. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 106–117. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-106-117
- [12] **Гуськов, И. А.** Методика расчета голограммного дисплея с учетом дифракционной эффективности объемно-фазовой голограммы / И. А. Гуськов, Э. Р. Муслимов, А. Н. Мельников, А. Р. Гильфанов // *Оптический журнал*. — 2020. — Том 87. — № 11. — С. 21–30. — DOI: 10.17586/1023-5086-2020-87-11-21-30
- [13] **Харитонов, Д. Ю.** Моделирование композитного волноводного голографического дисплея / Д. Ю. Харитонов, Д. М. Ахметов, Э. Р. Муслимов, А. Р. Гильфанов, Н. К. Павлычева // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2022. — Том 22 — № 6. — С. 1037–1047. — DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1037-1047
- [14] **Muslimov, E. R.** Composite waveguide holographic display / E. R. Muslimov, D. Akhmetov, D. Kharitonov, I. Guskov, N. K. Pavlycheva // *Proc. of SPIE*. — 2022. — Vol. 12138. — P. 121380S. — DOI: 10.1117/12.2621064
- [15] **Muslimov, E. R.** Design and optimization of a dispersive unit based on cascaded volume phase holographic gratings / E. R. Muslimov, N. K. Pavlycheva, G. G. Valyvin et al. // *Proc. of SPIE*. — 2017. — Vol 10233. — P. 102331L. — DOI: 10.1117/12.2264679

- [16] **Царева, А. М.** Диагностика разрушения крыльчатки обдува генератора ГТД методом голографической интерферометрии / А. М. Царева, Р. Х. Макаева, Д. М. Сафина, Р. К. Галимова // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2020. — № 2. — С. 172–175.
- [17] **Макаева, Р. Х.** Диагностика технического состояния авиационных подшипников качения с применением голографической интерферометрии / Р. Х. Макаева, В. В. Такмовцев, А. М. Царева, Н. И. Шакиров // Изв. вузов. Авиационная техника. — 2021. — № 4. — С. 90–95.
- [18] **Kharintsev, S. S.** Light-controlled multiphase structuring of perovskite crystal enabled by thermoplasmonic metasurface / S. S. Kharintsev, E. I. Battalova, T. A. Mukhametzyanov, A. P. Pushkarev, I. G. Scheblykin, S. V. Makarov, E. O. Potma, D. A. Fishman // ACS NANO. — 2023. — Vol. 17. — P. 9235–9244. — DOI: 10.1021/acsnano.3c00373
- [19] **Lyadov, N. M.** Deposition rate effect on microstructure and perpendicular magnetic anisotropy of iron films prepared by ion-beam-assisted deposition / N. M. Lyadov, F. G. Vagizov, I. R. Vakhitov, A. I. Gumarov, S. Z. Ibragimov, D. M. Kuzina, I. A. Faizrahmanov, R. I. Khaibullin, V. A. Shustov // Vacuum. — 2019. — № 168. — 108860 (1–8). — DOI:10.1016/j.vacuum.2019.108860

Kazan School of Diffraction Optics

N. K. Pavlycheva¹, A. A. Belokopytov², V. P. Ivanov^{1, 3}, A. V. Lukin³, R. Kh. Makaeva¹, A. N. Melnikov³, E. R. Muslimov¹, F. A. Sattarov³, A. F. Skochilov³, I. A. Faizrahmanov⁴, S. S. Kharintsev⁵

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

²LLC “NPP IRVIS”, Kazan, Russia

³JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

⁴Kazan E.K. Zavoisky Physical-Technical Institute of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

⁵Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Kazan (Volga Region) Federal University”, Kazan, Russia

The report presents an overview of the research and development areas carried out by representatives of the Kazan School of Diffraction Optics from 2015 to the present.

Keywords: *Ruled and hologram diffraction gratings, Classic, circular and pendulum-type ruling engines, Cylindrical computer-generated hologram, Replication of optical elements, Composite hologram optical element, Methodology for designing spectrographs, Holographic interferometry, Ion Beam profiling, Film metamaterials*

Формулировка Фурье-модального метода на основе явной записи граничных условий в координатном пространстве для одномерных и двумерных решеток со сложным профилем

С. И. Спиридонов, А. А. Щербачев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлена новая формулировка Фурье-модального метода для строгого решения уравнений Максвелла в периодических средах, позволяющая обойтись без правил факторизации Ли, а также открытые коды, демонстрирующие работу нового метода. Новая формулировка основана на явной записи граничных условий в координатном пространстве и формулировке уравнения на собственные значения для векторов Фурье-амплитуд непрерывной части полей. Представленные результаты обобщают ранее найденную формулировку для простых одномерных решеток на случай одномерных и двумерных решеток со сложными профилями.

Ключевые слова: Фурье-модальный метод, Дифракция

Фурье-модальный метод для строгого расчета дифракции на одномерно- и двумерно-периодических структурах продемонстрировал свою эффективность для решения линейных и нелинейных задач дифракции и излучения на сложных периодических и аperiodических (с применением идеально сочетающихся слоев) многослойных структурах как в фундаментальных физических задачах, так и в инженерных приложениях [1–5]. В настоящее время можно найти как открытые, так и коммерческие программные реализации метода [6]. В изначальной формулировке Фурье-модальный метод является методом строгого численного решения уравнений Максвелла во всем пространстве для плоских бесконечных дифракционных решеток конечной толщины, являющихся слоями одномерных или двумерных фотонных кристаллов. Формально решение задачи дифракции можно представить в виде последовательных следующих шагов: решение задачи на собственные значения в Фурье-пространстве для бесконечного фотонного кристалла, построение T -матрицы плоской границы раздела между фотонным кристаллом и однородным пространством и построение S -матрицы на основании двух T -матриц плоских границ решетки. Дополнительно, метод S -матриц [7] позволяет эффективно рассчитывать многослойные планарные структуры с несколькими решетками и решетки со сложным профилем. Первый шаг метода, а именно формулировка задачи на собственные значения, претерпел существенные изменения в результате исследований второй половины 90-х [8,9], так что последующие формулировки всех Фурье-методов стали основываться на так называемых правилах факторизации Ли [10], которые были введены для корректного представления разрывов полей на границах различных сред в конечном подпространстве, сопряженном плоскости решетки. При этом возникает существенная неоднозначность в способах определения разрывов в этом пространстве, и соответствующие подходы порой требуют существенных дополнительных вычислительных затрат. Недавно нами было показано, что возможно сформулировать метод, имеющий тот же порядок сходимости, что и современные версии Фурье-модального метода [11], избегая необходимости в правилах Ли, и, соответственно, в сложных схемах, необходимых для корректного учета граничных условий в конечном сопряженном подпространстве.

Предлагаемый подход основан на разделении разрывных в области решетки компонент электромагнитного поля на непрерывную разрывную часть, и представлении разрывной части в виде суперпозиции простых координатных функций с аналитически известными коэффициентами Фурье. Явно записанные граничные условия в координатном пространстве позволяют связать неизвестные коэффициенты разложения при этих функциях с Фурье-амплитудами непрерывной части полей, так что, используя эту связь, удается сформулировать задачу на собственные значения в одномерных и двумерных фотонных кристаллах исключительно для Фурье-векторов непрерывной части полей. В докладе будет детально представлена описанная идея и показана возможность ее обобщения на одномерные и двумерные решетки со сложным пространственным распределением диэлектрической проницаемости на периоде.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-11-00153.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Knop, K.** Rigorous diffraction theory for transmission phase gratings with deep rectangular grooves / K. Knop // Journal of the Optical Society of America A. — 1978. — Vol 68. — P. 1206–1210.
- [2] **Vincent, P.** Gratings in nonlinear optics and optical bistability / P. Vincent, N. Paraire, M. Neviere, A. Koster, R. Reinisch // Journal of the Optical Society of America B. — 1985. — Vol 2. — № 7. — P. 1106–1116.
- [3] **Rigneault, H.** Dipole radiation into grating structures / H. Rigneault, F. Lemarchand, A. Sentenac // Journal of the Optical Society of America A. — 2000. — Vol 17. — № 6. — P. 1048–1058.
- [4] **Weiss, T.** Matched coordinates and adaptive spatial resolution in the Fourier modal method / T. Weiss, G. Granet, N. A. Gippius, S. G. Tikhodeev, H. Giessen // Optics Express. — 2009. — Vol 17. — № 10. — P. 8051–8061.
- [5] **Pisarenco, M.** Aperiodic Fourier modal method in contrast-field formulation for simulation of scattering from finite structures / M. Pisarenco, J. Maubach, I. Setija, R. Mattheij // Journal of the Optical Society of America A. — 2010. — Vol 27. — № 11. — P. 2423–2431.
- [6] **Liu, V.** S4: A free electromagnetic solver for layered periodic structures / V. Liu, S. Fan // Computer Physics Communications. — 2012. — Vol 183. — P. 2233–2244.
- [7] **Cotter, N. P. K.** Scattering-matrix approach to multilayer diffraction / N. P. K. Cotter, T. W. Priest, J. R. Sambles // Journal of the Optical Society of America A. — 1995. — Vol 12. — № 5. — P. 1097–1103.
- [9] **Lalanne, P.** Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization / P. Lalanne, G. M. Morris // Journal of the Optical Society of America A. — 1996. — Vol 13. — № 4. — P. 779–784.
- [9] **Granet, G.** Efficient implementation of the coupled-wave method for metallic lamellar gratings in TM polarization / G. Granet, B. Guizal // Journal of the Optical Society of America A. — 1996. — Vol 13. — № 5. — P. 1019–1023.
- [10] **Li, L.** Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures / L. Li // Journal of the Optical Society of America A. — 1996. — Vol 13. — № 9. — P. 1870–1876.
- [11] **Spiridonov, S.** Reformulated Fourier Modal Method with improved near field computations / S. Spiridonov, A. A. Shcherbakov // Journal of Computational Science. — 2023. — Vol 67. — P. 101936.

A formulation of the Fourier-Modal Method based on the explicit interface conditions in the coordinate space for 1D and 2D gratings with complex profiles

S. I. Spiridonov¹, A. A. Shcherbakov¹

¹ School of Physics and Engineering, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The work presents a new formulation of the Fourier-modal method for the rigorous solution of Maxwell's equations in periodic media, which allows one to dispense with Lie factorization rules, and open codes demonstrating the operation of the new method. The new formulation is based on the explicit form of the interface conditions in the coordinate space and the formulation of the eigenvalue equation for the Fourier amplitude vectors of the continuous part of the fields. The presented results generalize the previously found formulation for simple one-dimensional gratings to the case of one-dimensional and two-dimensional gratings with complex profiles.

Keywords: Fourier modal method, Diffraction

Фокусировка гауссовых пучков и оптических вихрей кольцевыми решетками переменной высоты с GRIN-подложкой для формирования удлиненных световых фокальных отрезков

Д. А. Савельев^{1,2}

¹ Самарский университет, Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

В работе проведено моделирование дифракции гауссовых пучков и оптических вихрей с круговой, радиальной, азимутальной поляризациями на субволновых кольцевых решетках с GRIN-подложками. Для численного моделирования использовался метод конечных разностей во временной области. Показана возможность формирования удлиненных световых фокальных отрезков при различной поляризации, типе пучка, высоте рельефа рассмотренных оптических элементов. В частности, кольцевая решетка, которая представляет собой комбинацию двух аксиконов, дополненная GRIN-подложкой, позволяет сформировать световую иглу длиной более 8λ ($DOF = 8,04\lambda$). Высота нечетных зон такой решетки составляла $2,13\lambda$, высота четных зон составляла $1,06\lambda$.

Ключевые слова: Субволновые кольцевые решетки, FDTD, Оптический вихрь, GRIN, Гауссов пучок, Световой фокальный отрезок

Введение

Неоднородность пространственного распределения показателя преломления является одной из главных особенностей сред с градиентным показателем преломления (GRIN) [1–3]. Для подобных сред часто применяется классификация в зависимости от формы поверхностей, у которых показатель преломления постоянен [4], в частности, выделяют симметричные относительно заданной координаты среды GRIN [4], а также среды, где наблюдается произвольное трехмерное распределение показателя преломления (F-GRIN) [1]. Хорошо известно использование GRIN-материалов для решения задач оптической связи [5], коллимации и управлением распространения света [6–8], в биологии [9].

Оптические вихри и гауссовые пучки активно используются для решения задач оптики и фотоники [10–12], среди которых следует отметить острую фокусировку [7, 11, 12], оптическую передачу информации [14], зондирование [15], оптическое манипулирование [16, 17]. Для генерации таких пучков можно использовать ряд оптических структур, среди которых можно отметить метаповерхности [18], спиральные фазовые пластинки [19] и кольцевые решетки, которые также используются для получения оптических игл с большой глубиной фокуса [20].

В данной работе было проведено исследование дифракции оптических вихрей и гауссовых пучков в ближней зоне субволновых кольцевых решеток с переменной высотой отдельных колец решеток. Численное моделирование проводилось с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD).

Дифракция оптических вихрей и гауссовых пучков в ближней зоне субволновых кольцевых решеток

В работе рассматривались следующие оптические элементы: дифракционный аксикон высотой $h = 1,06\lambda$ (высота рельефа выбрана исходя из скачка фазы π радиан), кольцевая решетка, которая представляет собой комбинацию двух аксиконов различной высоты, а также обратная кольцевая решетка (изменение высоты колец решетки от минимума в центре $h_{\min} = 1,06\lambda$, до максимального значения $h_{\max} = 4,79\lambda$ на краю элемента с шагом $0,53\lambda$). Период оптических элементов составлял $1,05\lambda$. Рассматривалась стандартная подложка, а также GRIN-подложка, у которых показатель преломления изменяется равномерно от минимального значения в центре к максимальному на краях. Следует отметить, что GRIN-подложку составляли кольца одинаковой ширины с различным радиусом, равномерно вписанные друг в друга. Максимальный размер показателя преломления $n = 2,7$, минимальный $n = 1,47$. Показатель преломления рельефа равен $1,47$.

Численное моделирование проводилось для гауссовых пучков и оптических вихрей первого порядка (мода Лагерра-Гаусса $(1,0)$, $\sigma = 1,5$ мкм.) с радиальной, азимутальной и круговой (знак круговой поляризации противоположен знаку введенной вихревой фазовой сингулярности) поляризациями. Рассматривалась трехмерная расчетная область ($8,4$ мкм.) со всех сторон окруженная поглощающим слоем PML ($0,6$ мкм.), длина волны λ входного излучения была равна $0,532$ мкм. Шаг моделирования по пространству — $\lambda/30$, шаг по времени — $\lambda/(60c)$, где c — скорость света.

Размер фокального пятна оценивался по ширине полуспада максимального значения интенсивности (full width at half maximum — FWHM) в точке максимальной интенсивности на оптической оси, аналогично была проведена оценка длины световой иглы вдоль оси распространения излучения (depth of focus — DOF).

На рисунке 1 показано распространение оптического вихря через дифракционный аксикон (стандартная подложка) с высотой рельефа $h = 1,06\lambda$ при круговой, радиальной и азимутальной поляризациях. Данный оптический элемент будет в дальнейшем выступать в качестве базового. Рассмотрим, как изменятся картины дифракции при изменении высоты рельефа и использовании GRIN подложки.

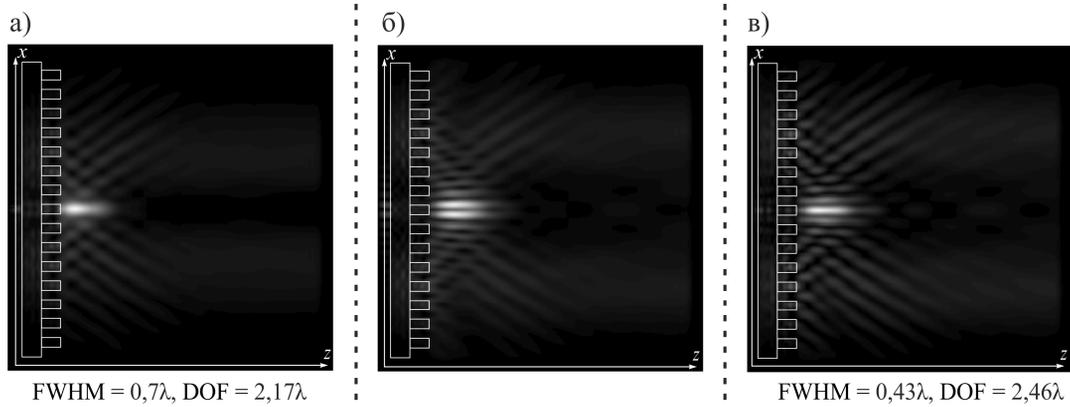


Рис. 1. Дифракция оптических вихрей (плоскость xz , высота рельефа аксикона $h = 1,06\lambda$) при стандартной подложке и различных типах поляризации:
а) круговая; б) радиальная; в) азимутальная

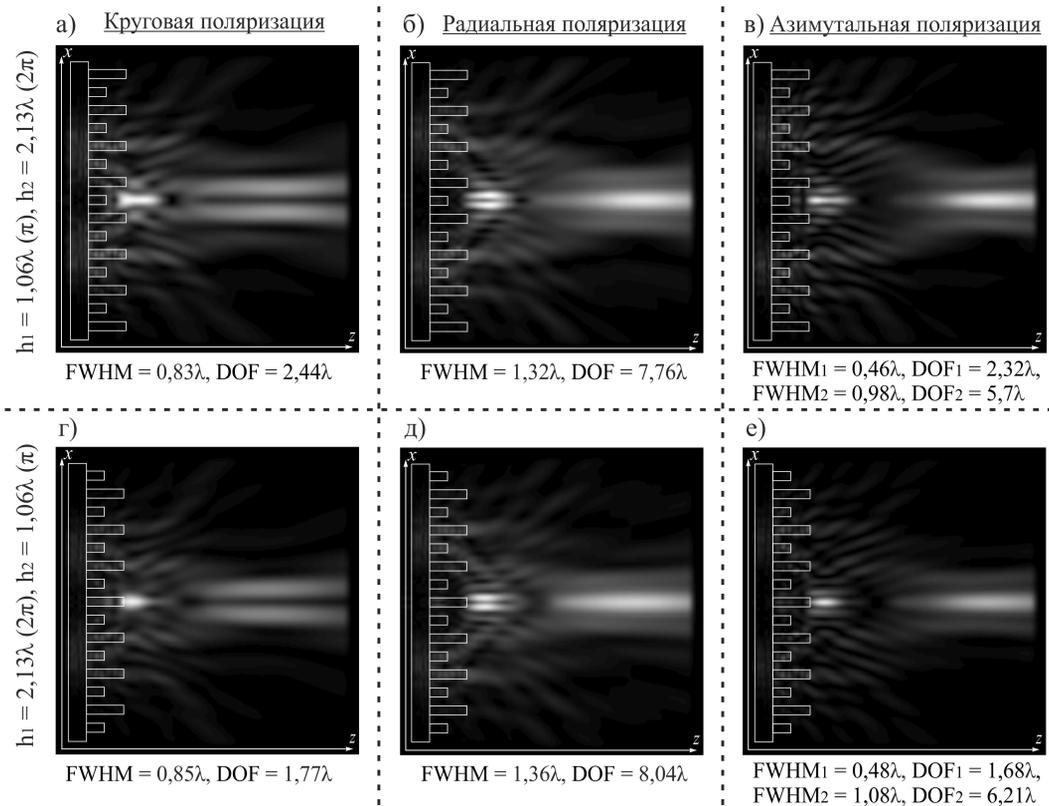


Рис. 2. Двумерная картина дифракции (плоскость xz) оптических вихрей на кольцевых решетках (общая интенсивность, GRIN-подложка) при различной высоте рельефа и поляризации:
а, г) круговая поляризация; б, д) радиальная поляризация; в, е) азимутальная поляризация

На рисунке 2 приведены картины дифракции при распространении оптических вихрей через кольцевые решетки, которые представляют собой комбинацию двух аксиконов, высотой $1,06\lambda$ (выбрана в соответствии со скачком фазы π радиан) и $2,13\lambda$ (2π). Следует отметить случаи радиальной и ази-

мутальной поляризации для обоих типов кольцевой решетки: наблюдается формирование длинных световых отрезков на оптической оси на расстоянии более 4λ от края рельефа элементов. Для круговой поляризации оптическая игла существенно меньше и образуется в непосредственной близости от элемента. Самая длинная световая игла для была получена для кольцевой решетки при $h_1 = 2,13\lambda$, $h_2 = 1,06\lambda$ для радиальной поляризации лазерного излучения ($\text{DOF} = 8,04\lambda$). Рассмотрим далее именно радиальную поляризацию. Ранее было показано, что обратная кольцевая решетка при круговой поляризации лазерного излучения позволяет сформировать протяженную световую иглу на оптической оси [7]. Будем рассматривать данный тип рельефа как с обычной, так и с GRIN-подложкой. В качестве входного излучения рассматривались гауссов пучок и оптический вихрь первого порядка, результаты приведены на рисунке 3.

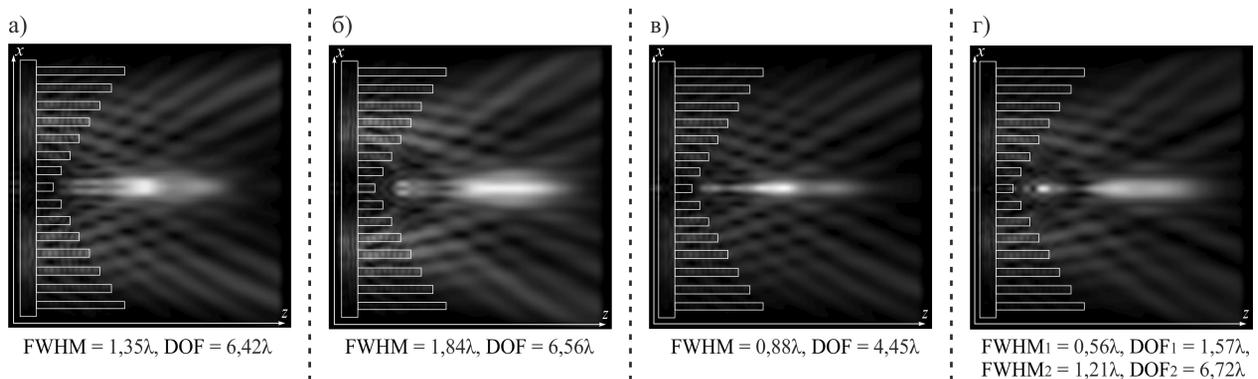


Рис. 3. Двумерная картина дифракции (плоскость xz) на обратной кольцевой решетке при радиальной поляризации оптического вихря:

а) стандартная подложка; б) GRIN-подложка и гауссова пучка; в) стандартная подложка; г) GRIN-положка

Следует отметить, что для оптического вихря использование GRIN-подложки незначительно увеличило размер световой иглы ($\text{DOF} = 6,56\lambda$), при формировании более однородно распределенного светового отрезка на оптической оси. Для гауссова пучка действие GRIN-подложки проявилось в формировании двух выраженных пиков интенсивности с формированием более длинной световой иглы (меньшей интенсивности) на расстоянии более $4,5\lambda$ от центральной части рельефа элемента.

Заключение

В данной работе методом FDTD было проведено моделирование дифракции гауссовых пучков и оптических вихрей с круговой, радиальной, азимутальной поляризациями на субволновых кольцевых решетках с GRIN-подложками. Показана возможность формирования удлиненных световых фокальных отрезков при различной высоте рельефа кольцевых решеток при радиальной и азимутальной поляризации лазерного излучения. В частности, кольцевая решетка, представляющая собой элемент с чередующимися зонами ($h_1 = 2,13\lambda$, $h_2 = 1,06\lambda$) для оптического вихря с радиальной поляризацией позволяет получить световую иглу длиной $\text{DOF} = 8,04\lambda$.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00044, <https://rscf.ru/project/24-22-00044/>.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Lippman, D.H.** Freeform gradient-index media: a new frontier in freeform optics / D.H. Lippman, N.S. Kochan, T. Yang, G.R. Schmidt, J.L. Bentley, D.T. Moore // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29. – № 22. – P. 36997-37012. – DOI: 10.1364/OE.443427.
- [2] **Gómez-Correa, J.E.** Geometrical-light-propagation in non-normalized symmetric gradient-index media / J.E. Gómez-Correa // *Optics Express*. – 2022. – Vol. 30. – № 19. – P. 33896-33910. DOI: 10.1364/OE.465957.
- [3] **Richardson, K.A.** Advances in infrared gradient refractive index (GRIN) materials: a review / K.A. Richardson, M. Kang, L. Sisken, A. Yadav, S. Novak, A. Lepicard, I. Martin, H. Francois-Saint-Cyr, C. M. Schwarz, T.S. Mayer, C. Rivero-Baleine, A.J. Yee, I. Mingareev // *Optical Engineering*. – 2020. – Vol. 59. – № 11. – P. 112602. DOI: 10.1117/1.OE.59.11.112602.

- [4] **Gómez-Correa, J.E.** Symmetric gradient-index media reconstruction / J.E. Gómez-Correa, A.L. Padilla-Ortiz, J.P. Trevino, A. Jaimes-Nájera, N. Lozano-Crisóstomo, A. Cornejo-Rodriguez, S. Chavez-Cerda // *Optics Express*. – 2023. – Vol. 31. – № 18. – P. 29196-29212. DOI: 10.1364/OE.498649.
- [5] **Baghel, A.K.** Far-field wireless power transfer using GRIN lens metamaterial at GHz frequency / A.K. Baghel, S.S. Kulkarni, S.K. Nayak // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2019. – Vol. 29. – № 6. – P. 424-426. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2912056.
- [6] **Lalanne, P.** Metalenses at visible wavelengths: past, present, perspectives / P. Lalanne, P. Chavel // *Laser & Photonics Reviews*. – 2017. – Vol. 11. – №3. – P. 1600295. DOI: 10.1002/lpor.201600295.
- [7] **Savelyev, D.A.** Development of 3D Microstructures for the Formation of a Set of Optical Traps on the Optical Axis / D.A. Savelyev, S.V. Karpeev // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – № 2. – P. 117. DOI: 10.3390/photronics10020117.
- [8] **Luque-González, J.M.** An ultracompact GRIN-lens-based spot size converter using subwavelength grating metamaterials / J.M. Luque-González, R. Halir, J.G. Wangüemert-Pérez, J. de-Oliva-Rubio, J.H. Schmid, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, A. Ortega-Moñux // *Laser & Photonics Reviews*. – 2019. – Vol. 13. – № 11. – P. 1900172. DOI: 10.1002/lpor.201900172.
- [9] **Guo, C.** 3D light-field endoscopic imaging using a GRIN lens array / C. Guo, T. Umer, S. Jia // *Applied Physics Letters*. – 2020. – Vol. 116. – № 10. – P. 101105. DOI: 10.1063/1.5143113.
- [10] **Rosen, G.F.Q.** Interplay between optical vortices and condensed matter / G.F.Q. Rosen, P.I. Tamborenea, T. Kuhn // *Reviews of Modern Physics*. – 2022. – Vol. 94. – № 3. – P. 035003. DOI: 10.1103/RevModPhys.94.035003
- [11] **Savelyev, D.A.** The investigation of the features of focusing vortex super-Gaussian beams with a variable-height diffractive axicon / D.A. Savelyev // *Computer Optics*. – 2021. – Vol. 45. – № 2. – P. 214-221. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-862.
- [12] **Savelyev, D.** Near-Field Vortex Beams Diffraction on Surface Micro-Defects and Diffractive Axicons for Polarization State Recognition / D. Savelyev, N. Kazanskiy // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 6. – P. 1973. DOI: 10.3390/s21061973.
- [13] **Brimis, A.** Optical vortices shape optical tornados / A. Brimis, K.G. Makris, D.G. Papazoglou // *Optics Express*. – 2023. – Vol. 31. – № 17. – P. 27582-27593. DOI: 10.1364/OE.495836.
- [14] **Khonina, S.N.** Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, M.A. Butt // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – № 9. – P. 2988. DOI: 10.3390/s21092988.
- [15] **Sirenko, A.A.** Terahertz vortex beam as a spectroscopic probe of magnetic excitations / A.A. Sirenko, P. Marsik, C. Bernhard, T.N. Stanislavchuk, V. Kiryukhin, S.W. Cheong // *Physical Review Letters*. – 2019. – Vol. 122. – № 23. – P. 237401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.237401
- [16] **Savelyev, D.A.** The Features of the Optical Traps Formation Using Silicon Ring Gratings with Variable Height / D.A. Savelyev // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – № 11. – P. 1264. DOI: 10.3390/photronics10111264.
- [17] **Shen, Y.** Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // *Light: Science & Applications*. – 2019. – Vol. 8. – № 1. – P. 1-29. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [18] **Khonina, S.N.** A Review on Reconfigurable Metalenses Revolutionizing Flat Optics / S.N. Khonina, M.A. Butt, N.L. Kazanskiy // *Adv. Optical Mater.* – 2023. – Vol. 12. – № 14. – P. 2302794. DOI: 10.1002/adom.202302794.
- [19] **Porfirev, A.P.** Phase singularities and optical vortices in photonics / A.P. Porfirev, A.A. Kuchmizhak, S.O. Gurbatov, S. Juodkazis, S.N. Khonina, Y.N. Kulchin // *Phys. Usp.* – 2022. – Vol. 192. – № 8. – P. 841-866. DOI: 10.3367/UFNe.2021.07.039028
- [20] **Shi, C.** Sub-wavelength longitudinally polarized optical needle arrays generated with tightly focused radially polarized Gaussian beam / C. Shi, Z. Xu, Z. Nie, Z. Xia, B. Dong, J. Liu // *Optics communications*. – 2022. – Vol. 505. – P. 127506. DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127506.

The Gaussian beams and optical vortices focusing by ring gratings with variable height and a GRIN substrate for the formation of elongated light focal segments

D. A. Savelyev^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara, Russia

The diffraction of Gaussian beams and optical vortices with circular, radial, and azimuthal polarizations on subwavelength ring gratings with GRIN substrates was simulated in this paper. The finite difference time domain method was used for numerical simulation. The possibility of forming elongated light focal segments with different polarization, beam type, and elevation of the considered optical elements was shown. In particular, the ring grating, which is a combination of two axicons, supplemented with a GRIN substrate, allows the formation of a light needle with a length of more than 8λ ($\text{DOF} = 8.04\lambda$). The height of the odd zones of such a lattice was 2.13λ , the height of the even zones was 1.06λ .

Keywords: Subwavelength ring gratings, FDTD, Optical vortex, GRIN, Gaussian beam, Light focal segment

Матричный полнокадровый гиперспектрометр. Моделирование и эксперимент

А. С. Пронин, Р. В. Скиданов, Г. В. Успенъев

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия

В данной работе была промоделирована оптическая система, состоящая из матрицы гармонических линз. Были рассмотрены преимущества гиперспектрометра моментальной съемки с использованием вышеупомянутой системы. Был собран гиперспектрометр, проведены испытания, полученные данные обработаны и представлены в работе.

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, Гармонические линзы, Гиперспектрометр моментальной съемки

Введение

На сегодняшний день обработка изображений позволяет решать практические задачи в различных областях человеческого знания — медицина, геология, безопасность и военная промышленность. Полученное в высоком разрешении изображение обладает большим количеством информации, с которой можно работать. Однако этого хватает не всегда. Еще большее количество информации можно получить с помощью гиперспектрометра и изображений, снятых с него — гиперкубов. Однако наиболее распространенный — щелевой гиперспектрометр, который работает долго, тогда как гиперспектрометр, рассматриваемый в настоящей работе, обладает свойством моментальной съемки гиперкуба. В данной научной работе идет речь о создании такого прибора с использованием свойств гармонических линз, а именно матрицы 5x5 таковых. Каждая из линз фокусирует изображение определенной длины волны на матрицу обычной камеры. Это позволяет получить 25 изображений одного и того же объекта в разных длинах волн, что, в свою очередь, дает значительно больше информации о свойствах объекта, чем обычный снимок в высоком разрешении.

1. Разработка и изготовление экспериментального гиперспектрометра

Было проведено математическое моделирование оптической системы, содержащей матрицу гармонических линз.

Был рассчитан и создан дифракционный оптический элемент (ДОЭ), представляющий собой матрицу 5x5 гармонических линз, каждая из которых фокусирует определенную длину волны — гармонику — на матрицу.

Была смоделирована и распечатана на фотополимерном 3D-принтере бленда — деталь, которая исключает возможность пересечения изображений, построенных гармоническими линзами матрицы. На рисунке 1 изображена 3D-модель разработанной бленды.

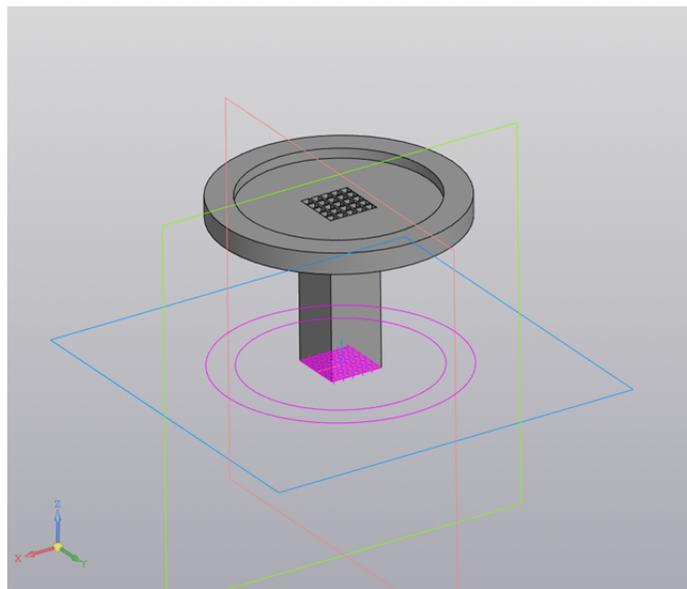


Рис. 1. 3D-модель разработанной бленды

2. Экспериментальные исследования системы

Был частично модифицирован фотоаппарат Sony Alpha NEX-3 для проведения экспериментов с ДОО. На рисунке 2 изображены фото собранного образца.



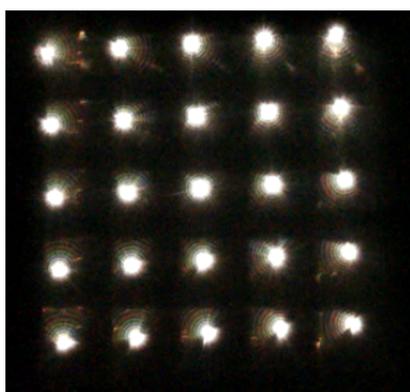
а) камера с закрепленной на бленде линзой



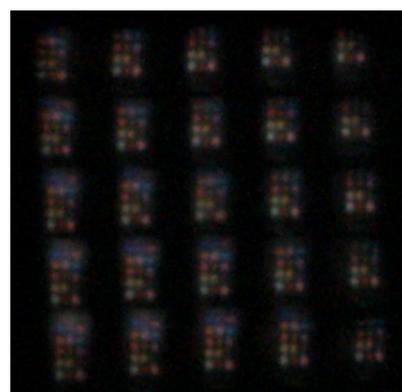
б) образец гиперспектрометра с диафрагмой

Рис. 2. Фото собранного образца

Были проведены первые эксперименты. Объектами для съемки стали фонарик и экран телефона. Получены их изображения в разных длинах волн. На рисунке 3 представлены изображения, содержащие 25 гармоник.



а) изображение LED-лампы



б) изображение экрана смартфона

Рис. 3. Фото, сделанные экспериментальным образцом, содержащие 25 гармоник

Заключение

В данной работе была промоделирована, собрана и протестирована оптическая система, состоящая из матрицы гармонических линз. Были рассмотрены преимущества гиперспектрометра моментальной съемки с использованием вышеупомянутой системы. Был собран опытный образец, проведены испытания, полученные данные обработаны и представлены в настоящей работе.

Благодарность

Данное исследование было проведено в рамках научной программы Национального физико-математического центра, секция №1 «Национальный центр исследований архитектуры суперкомпьютеров. Этап 2023-2025».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Хонина, С.Н.** Анализ фокусировки гармонической дифракционной линзой с учетом дисперсии показателя преломления / С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский, А.В. Устинов, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 338-347. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-338-347.
- [2] **Sweeney, D.** Harmonic diffractive lenses [Text] / D. Sweeney, G. Sommargren // APPLIED OPTICS. – 1995. – Vol. 34(14). – P. 2469-2475.
- [3] **Досколович, Л.Л.** Многофокусная спектральная дифракционная линза / Л.Л. Досколович, Е.А. Безус, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 2. – С. 219-226. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-2-219-226.

Matrix full-frame hyperspectrometer. Modeling and experiment

A. S. Pronin¹, R. V. Skidanov¹, G. V. Usplen'ev¹

¹ Samara National Research University named after academician S. P. Korolev, Samara, Russia

In this work, an optical system consisting of a matrix of harmonic lenses was modeled. The advantages of a snapshot hyperspectrometer using the above-mentioned system were considered. A hyperspectrometer was assembled, tests were carried out, the data obtained were processed and presented in the work.

Keywords: Optics, Diffraction optical elements, Harmonic lenses, Instantaneous Hyperspectrometer

Оптические элементы на основе двулучепреломляющих микротреков

А. Е. Рупасов¹, С. И. Кудряшов¹, А. В. Богацкая^{1,2}

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

В данной работе представлены результаты экспериментов по созданию оптических элементов, основанных на двулучепреломляющих микротреках в плавленом кварце под воздействием ультракоротких лазерных импульсов. При создании этих элементов учитывается фазовый сдвиг и азимут двулучепреломляющих микротреков. Используя технологические режимы записи в объеме плавленого кварца, были записаны следующие оптические элементы с помощью сфокусированных ультракоротких лазерных импульсов: хроматическая полуволновая пластинка; дисперсионные поляризационные фильтры (ДПФ) Шольца и Лео; поляризационная дифракционная решетка; диэлектрическое зеркало; брэгговский отражатель.

Ключевые слова: Лазерная запись, Двулучепреломление, Ультракороткие лазерные импульсы

Введение

Применение высокопроизводительной лазерной 3D-модификации ультракороткими импульсами (УКИ) позволяет гибко управлять длиной волны, длительностью, энергией и поляризацией импульсов, что дает возможность создавать микрооптические устройства высокой плотности в объеме прозрачных твердых диэлектриков: «вечную» оптическую память [1–3], поляризационные элементы [4], волновые фазовые пластинки [5], цветные микрофильтры [6], фотонные элементы и устройства [7]. Оптические элементы и устройства создаются на основе трехмерных двулучепреломляющих микротреков, имеющих подструктуру с анизотропным эффектом. Это приводит к фазовому сдвигу и сложным интерференционно-поляризационным взаимодействиям света внутри микротреков. Хотя микрооптические элементы, созданные в объемных и тонкопленочных диэлектриках, уступают плазмонным или диэлектрическим метаповерхностям по компактности (при достижении более высоких механических характеристик), они все еще незаменимы при нелинейно-оптических преобразованиях лазерных пучков высокой мощности или интенсивности.

Экспериментальные результаты и обсуждения

В прозрачных твердых диэлектриках с помощью ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) можно создавать фазовые оптические элементы. В объеме плавленого кварца был создан рисунок, который проявляется в виде цветов двулучепреломления. Различные цвета были получены путем изменения количества слоев при лазерной записи. Изображения рисунка видны через скрещенные и параллельные поляризаторы (рис. 1).

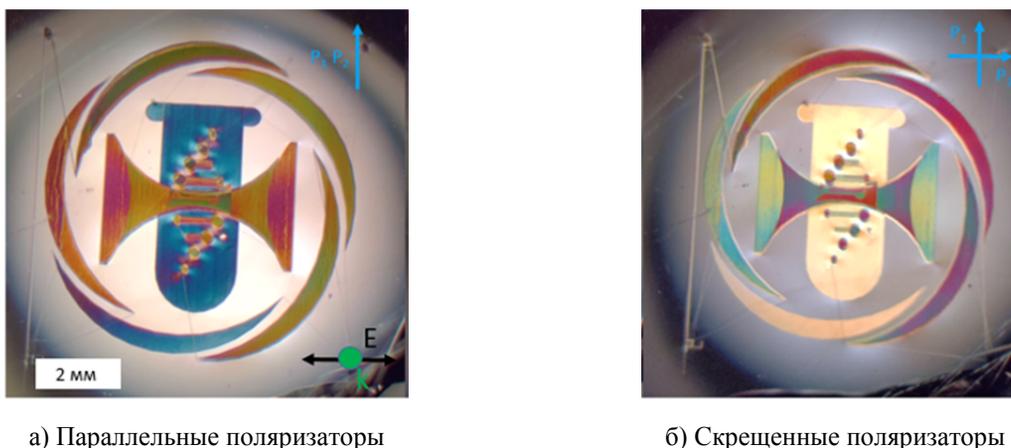


Рис. 1. Оптические изображения, полученные при использовании скрещенных и параллельных поляризаторов, представлены в виде двулучепреломляющих цветowych схем

Направление медленной оси в двулучепреломляющих микрообластях, состоящих из микротреков, определяется вектором линейной поляризации при лазерной записи. Это позволяет управлять направлением медленной оси (рис. 2).

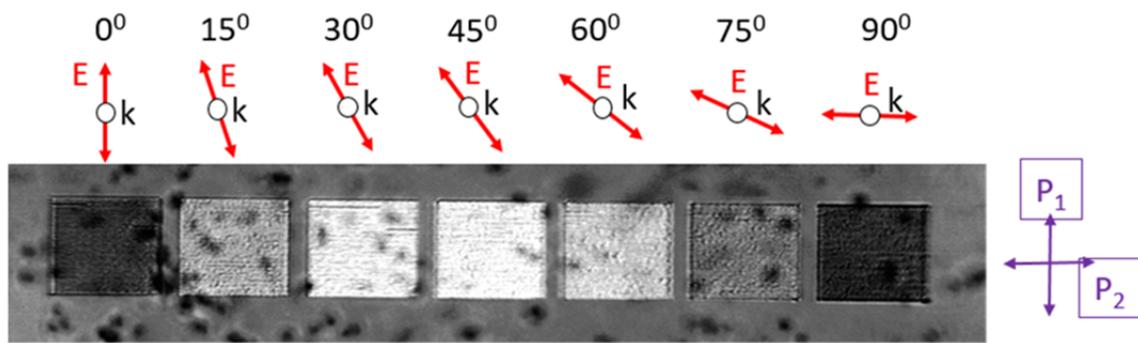


Рис. 2. Изображение микрообластей размером 500x500 мкм, находящихся в объеме плавленого кварца, в скрещенных поляризаторах

На основе фазовых и векторных составляющих возможно создание оптических элементов. Рытов был первым, кто предложил идею искусственных анизотропных материалов и изменения их электромагнитных свойств с помощью слоистых структур с периодом меньше длины волны [8]. Его работа основывалась на трудах Левина и Леонтовича [9, 10].

Заключение

В рамках данной работы были созданы оптические элементы на базе двулучепреломляющих микротреков. К ним относятся: хроматическая полуволновая пластинка, дисперсионные поляризационные фильтры, поляризационная дифракционная решетка, диэлектрическое зеркало и брэгговский отражатель.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект # 22-72-10076).

Список источников

- [1] 100-Layer Error-Free 5D Optical Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass / H. Wang [et al.] // *Laser & Photonics Reviews*. — 2022. — Vol. 16. — Iss. 4. — DOI: 10.1002/lpor.202100563.
- [2] 3D Imprinting of Voxel-Level Structural Colors in Lithium Niobate Crystal / Z. Wang [et al.] // *Advanced Materials*. — 2023. — Vol. 35. — Iss. 47. — DOI: 10.1002/adma.202370344.
- [3] Multi-Dimensional Shingled Optical Recording by Nanostructuring in Glass / J. Gao [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2023. — Vol. 34. — Iss. 11. — DOI: 10.1002/adfm.202306870.
- [4] Ultrafast Manipulation of Self-Assembled Form Birefringence in Glass / Y. Shimotsuma [et al.] // *Advanced Materials*. — 2010. — Vol. 22. — Iss. 36. — P. 4039–4043. DOI: 10.1002/adma.201000921.
- [5] Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass / M. Beresna [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2011. — Vol. 98. — Iss. 20. DOI: 10.1063/1.3590716.
- [6] Direct laser writing regimes for bulk inscription of polarization-based spectral microfilters and fabrication of microfluidic bio/chemosensor in bulk fused silica / S. I. Kudryashov [et al.] // *Laser Physics Letters*. — 2022. — Vol. 19. — Iss. 6. — P. 065602. DOI: 10.1088/1612-202x/ac6806.
- [7] Embedded anisotropic microreflectors by femtosecond-laser nanomachining / J. D. Mills [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2002. — Vol. 81. — Iss. 2. — P. 196-198. DOI: 10.1063/1.1492004.
- [8] **Рытов, С. М.** Electromagnetic Properties of a Finely Stratified Medium / S. M. Rytov // *Soviet physics JETP*. — 1956. — Vol. 2, No. 3. — P. 466-475.
- [9] **Леонтович, М. А.** К теории возбуждения колебаний в вибраторах антенн / М. А. Леонтович, М. Л. Левин // *ЖТФ*. — 1944. — Т. 14. — С. 481.
- [10] **Левин, М. Л.** О возбуждении полубесконечного волновода через отверстие в его дне / М. Л. Левин // *ЖТФ*. — 1948. — Т. 18. — С. 653.

Optical elements based on birefringent microtracks

A. E. Rupasov¹, S. I. Kudryashov¹, A. V. Bogatskaya^{1,2}

¹ Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

² Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

This paper presents the results of experiments on the creation of optical elements based on birefringent microtracks in fused silica under the influence of ultrashort laser pulses. When creating these elements, the phase shift and azimuth of the birefringent microtracks are taken into account. Using technological recording modes in the bulk of fused silica, the following optical elements were recorded using focused ultrashort laser pulses: chromatic half-wave plate; Scholz and Lyot dispersive polarization filters (DPFs); polarizing diffraction grating; dielectric mirror; Bragg reflector.

Keywords: *Laser recording, Birefringence, Ultrashort laser pulses*

Структурированные элементы с высокими дифракционными свойствами в широком угловом диапазоне

П. П. Соколов¹, Н. Д. Ворзобова¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В отличие от традиционного подхода к свойствам структурированных элементов — голографических решеток, основанного на достижении высокой дифракционной эффективности и высокой угловой селективности, данная работа направлена на обеспечение высоких дифракционных свойств в широком диапазоне углов падения излучения в трехмерном пространстве. Расширение углового диапазона достигается за счет свойств отдельных решеток, что исключает необходимость синтеза апертуры при мультиплексной записи множества решеток. Представлены условия получения пропускающих периодических структур различных типов в различных материалах, их дифракционные и селективные свойства, представляющие интерес для актуальных практических задач солнечной энергетики, дифракционной оптики, защищенной печати.

Ключевые слова: Голографические оптические элементы, Дифракционная эффективность, Угловая селективность

Введение

Традиционным подходом к свойствам структурированных голографических элементов является подход, основанный на сочетании высокой дифракционной эффективности и высокой угловой селективности. Данная работа направлена на обеспечение высоких дифракционных свойств в широком диапазоне углов падения излучения в трехмерном пространстве, что определяется требованиями актуальных практических задач, в частности получения голографических элементов солнечных концентраторов, элементов устройств дополненной реальности, элементов формирования световых пучков, защитных элементов.

Результаты

Исследованы дифракционные свойства пропускающих объемных ненаклонных и наклонных голографических решеток при падении излучения в широком угловом диапазоне — в плоскостях с различной пространственной ориентацией. Решетки записывались в различных фотополимерных материалах с оптимизацией условий записи для получения максимальной дифракционной эффективности. Установлено, что при падении излучения в брэгговской плоскости максимальная дифракционная эффективность сохраняется в угловом диапазоне около 80° , а при падении в других плоскостях контуры угловой селективности уширяются, по сравнению с традиционными контурами. При этом максимальная дифракционная эффективность достигается при больших углах падения (более 70°). Кроме того, существуют направления падения излучения на решетку, при которых дифракционная эффективность максимальна и соответствует получаемой при углах Брэгга в плоскости падения при записи решетки.

Исследованы условия формирования и свойства гибридных решеток — объемных решеток, на поверхности которых формируются рельефные решетки. Определены условия получения рельефной компоненты с высокой дифракционной эффективностью и ее позитивный вклад в дифракционные свойства гибридной решетки.

Свойства объемных и гибридных решеток определяют возможность расширения углового диапазона относительно решений, представленных в предыдущих работах [1–5], без необходимости синтеза апертуры при мультиплексной записи и сложения решеток. Установленные свойства могут быть полезны для решения практических задач, в которых требуется высокая дифракционная эффективность при падении излучения в широком угловом диапазоне, в частности получения дифракционных дефлекторов для солнечной энергетики, а также элементов, сводящих световые (лазерные) пучки в одно направление. Широкий угловой диапазон достигается за счет свойств одной решетки, что исключает необходимость мультиплексной записи множества решеток.

Показана возможность получения эффективных рельефных решеток в новом серийном фотополимерном материале. Свойства таких решеток, наряду со свойствами гибридных структур, представляют интерес для технологий защищенной печати.

Способ записи двумерных решеток, основанный на уменьшении влияния наложенной записи в результате процессов нелокальной полимеризации, и свойства двумерных решеток могут использоваться для получения управляемых расщепителей лазерных пучков с пятью каналами.

Заклучение

Обобщены результаты исследования дифракционных и селективных свойств периодических структур различных типов в фотополимерных материалах при падении излучения в широком угловом диапазоне. Показана возможность использования установленных свойств для получения структурированных элементов для решения актуальных практических задач солнечной энергетики, дифракционной оптики, защищенной печати.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Akbari, H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications / Akbari H., Naydenova I., Martin S. // Appl. Opt. – 2014. – Vol. 53. – P. 1343-1363.
- [2] **Marín-Sáez, J.** Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photo-polymer for solar photovoltaic applications / Marín-Sáez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.-V. // Opt. Exp. – 2016. – Vol. 24. – P. 720-730.
- [3] **Xiang, X.** Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles / Xiang X., Kim J., Escuti M.J. // Sci. Rep. – 2018. – Vol. 8. – P. 7202.
- [4] **Keshri, S.** Stacked volume holographic gratings for extending the operational wavelength range in LED and solar applications / Keshri S., Marín-Sáez J., Naydenova I., Murphy K., Atencia J., Chemisana D., Garner S., Collados M.V., Martin S. // Appl. Opt. – 2020. – Vol. 59. – P. 2569-2579.
- [5] **Kao, H.** Crosstalk-reduced double-layer half-divided volume holographic concentrator for solar energy concentration / Kao H, Ma J., Wang C // Sensors.– 2020.– Vol. 20 – No. 23.– P. 6903.

Structured elements with high diffraction properties over a wide angular range

P. P.Sokolov¹ N. D.Vorzobova¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

In contrast to the traditional approach to the properties of structured elements - holographic gratings based on achieving high diffraction efficiency and high angular selectivity this work is aimed at ensuring high diffraction properties in a wide range of radiation incidence angles in three-dimensional space. The expansion of the angular range due to the properties of individual gratings is achieved which eliminates the need for aperture synthesis by multiplexing multiple gratings. The conditions for obtaining transmitting periodic structures of various types in various materials, their diffraction and selective properties, which are of interest for current practical problems in solar energy, diffraction optics, and security printing, are presented.

Keywords: Holographic optical elements, Diffraction efficiency, Angular selectivity

Исследование режимов генерации лазера с распределенной обратной связью на основе волоконной брэгговской решетки, индуцированной в оптическое волокно, легированное ионами эрбия

Я. Д. Моор, Д. А. Коннов, К. А. Коннов, А. В. Куликов, С. В. Варжель

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлено определение оптимальной длины волоконной брэгговской решетки, индуцированной в оптическое волокно, легированное ионами эрбия, для получения генерации волоконного лазера с распределенной обратной связью и обеспечения стабильного уровня мощности во времени.

Ключевые слова: Волоконная брэгговская решетка, оптическое волокно, эрбий, лазер с распределенной обратной связью

Исследование посвящено разработке волоконно-оптического лазера с распределенной обратной связью на основе единичной волоконной брэгговской решетки (ВБР), индуцированной в оптическое волокно, легированное ионами эрбия.

В работе представлены экспериментальные результаты определения оптимальной длины решетки для получения стабильного уровня мощности сигнала во времени и обеспечения максимально эффективной генерации излучения волоконным лазером с распределенной обратной связью.

Для создания лазера с распределенной обратной связью для записи ВБР использовался метод фазовой маски, схема записи которого состоит из: эксимерной лазерной системы Coherent; системы зеркал с интерференционным покрытием; линейной подвижки Standa; фазовой маски (ФМ) Ibsen Photonics. Для получения ВБР, волокно предварительно прошедшее обработку водородом, устанавливается в держатели прямо за фазовой маской, затем облучается лазерным излучением с длиной волны 248 нм. Запись таких ВБР реализована с помощью метода трансляции пучка. Линейная подвижка, на которой закреплено зеркало, постепенно движется параллельно фазовой маске с заданной скоростью, транслируя излучение по ФМ.

Для проведения эксперимента были записаны образцы ВБР в оптическом волокне, легированном ионами эрбия (FiberCore I-25(980/125)), длиной от 40 до 70 мм с шагом 5 мм. Коэффициент отражения решеток составлял 99,9 %, а длина волны брэгговского резонанса порядка 1552 нм.

В рамках исследования разработана и реализована волоконно-оптическая схема для генерации лазерного излучения (рис. 1), в которой излучение от лазерного диода накачки с длиной волны 980 нм (LD) через ответвители (HYB, Y-coupler) попадало на единичную ВБР (FBG). Далее с помощью оптического анализатора спектра (OSA), регистрировалось излучение, генерируемое лазером с распределенной обратной связью с длиной волны порядка 1551 нм.

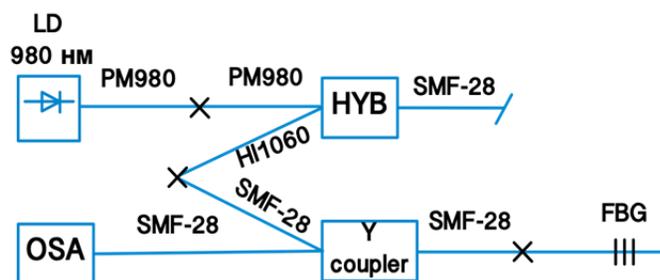


Рис. 1. Принципиальная схема проведения эксперимента для определения лазерной генерации с использованием волоконной брэгговской решетки, индуцированной в оптическом волокне, легированном ионами эрбия

В ходе проведенного исследования выявлено, что наиболее стабильная генерация лазерного излучения в оптическом волокне, легированном ионами эрбия, наблюдается при длине ВБР от 45 до 60 мм (рис. 2). В частности, при длине ВБР равной 40 мм наблюдалось отсутствие стабильной генерации излучения, при длине ВБР равной 45 мм была достигнута стабильная генерация лазерного излучения при токе накачки лазерного диода в диапазоне тока от 300 до 950 мА. Помимо этого, результаты эксперимента показывают, что использование ВБР с длиной 65 и 70 мм не позволяет получить стабильную генерацию лазерного излучения.

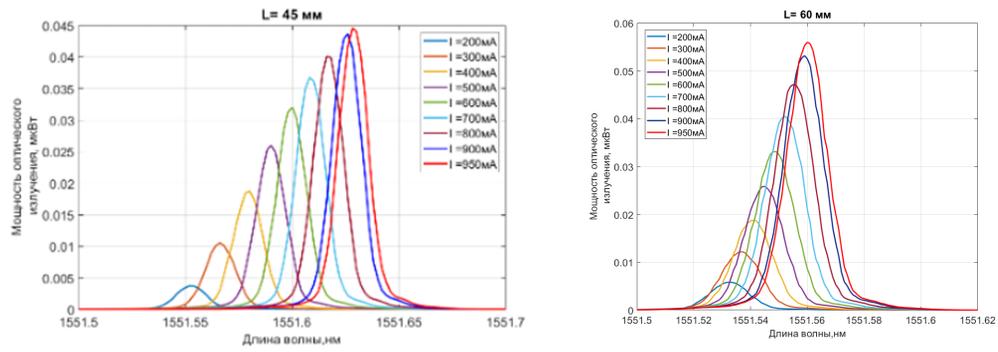


Рис. 2. График зависимости мощности оптического излучения лазерной генерации от тока накачки лазерного диода для волоконной брэгговской решетки длиной 45 мм (слева), 60 мм (справа)

Investigation of generation modes of a laser with distributed feedback based on a fiber Bragg grating induced in an optical fiber doped with erbium ions

Ya. D. Moor, D. A. Konnov, K. A. Konnov, A. V. Kulikov, S. V. Varzhel

ITMO University, St. Petersburg

The paper presents the determination of the optimum length of fiber Bragg grating induced into optical fiber doped with erbium ions to obtain generation of fiber laser with distributed feedback and to ensure stable power level in time.

Keywords: Fiber Bragg grating, Optical fiber, Erbium, Distributed feedback laser

Лазерно-голографические методы, устройства и комплексы для визуализации больших газодинамических полей. История развития направления в Государственном институте прикладной оптики (памяти А.Ф. Белозёрова и Л.Т. Мустафиной)

В. П. Иванов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Н. М. Шигапова

АО НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Представлена история зарождения и становления научно-технологического направления «Методы, устройства и комплексы для визуализации больших газодинамических полей» в Государственном институте прикладной оптики, а также организации промышленного выпуска на Казанском оптико-механическом заводе соответствующей оптической аппаратуры для оснащения уникальных отечественных аэробаллистических трасс и газодинамических установок. Рассмотрены перспективы развития этого направления на основе лазерно-голографических методов и средств.

Ключевые слова: Большие газодинамические поля, Визуализация, Лазерно-голографические методы, устройства и комплексы, Осевая синтезированная голограмма, Цилиндрический синтезированный голограммный оптический элемент, Сшивка результатов расшифровки интерферометрических измерений

В докладе кратко представлена история зарождения и становления научно-технологического направления «Методы, устройства и комплексы для визуализации больших газодинамических полей» в Государственном институте прикладной оптики (ГИПО), развитие которого осуществлялось под научным руководством Альберта Фёдоровича Белозёрова, а также организации промышленного выпуска на Казанском оптико-механическом заводе (КОМЗ) оптической аппаратуры для оснащения уникальных отечественных аэробаллистических трасс и газодинамических установок. Особое место в этом направлении занимает разработка методов и исследовательской аппаратуры с большими полями визуализации на основе использования осевых синтезированных голограмм (ОСГ) в качестве «силовых» и корригирующих (для обеспечения коррекции аберраций) элементов изображающих оптических систем. Выдающиеся результаты здесь были достигнуты в 1970-1980-х гг. группой «голографистов» во главе с инициативным и энергичным руководителем и талантливым и предприимчивым оптиком-экспериментатором Людмилой Таировной Мустафиной [1, 2]. Во многом благодаря ее настойчивости и признанному производственниками научно-техническому авторитету многие разработки ГИПО оперативно передавались через Центральное конструкторское бюро «Фотон» на КОМЗ, где был начат серийный выпуск соответствующей оптической аппаратуры. Особо следует отметить организацию серийного выпуска интерференционно-теневых приборов серии ИАБ с полями визуализации до 400 мм [2].

Применение пропускающих цилиндрических синтезированных голограммных оптических элементов (ЦСГОЭ) с последующей сшивкой результатов расшифровки интерферометрических измерений в отдельных сечениях открывает возможность использования их для решения задач визуализации больших газодинамических полей, в том числе для аппаратуры, содержащей крупноформатные линзовые элементы и ОСГ-объективы на стеклянных подложках. При этом ЦСГОЭ предлагается выполнять в виде узких тонкопленочных полос.

Следует отметить, что предложенное техническое решение проблемы контроля формы крупноформатной асферической оптики на основе использования цилиндрических ОСГ-компенсаторов и подхода в изготовлении такого вида компенсаторов [3–5], может быть реализовано и для решения рассматриваемой проблемы, так как в обоих случаях исключается необходимость изготовления ОСГ на крупногабаритных монолитных стеклянных подложках. Приводится пример расчета параметров ЦСГОЭ для конкретной задачи для видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Белозёров, А. Ф.** Осевые синтезированные голограммные оптические элементы: история развития, применения. Ч. 2 / А. Ф. Белозёров, Н. П. Ларионов, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Фотоника. — 2014. — № 5 (47). — С. 30–41.
- [2] **Белозёров, А. Ф.** Виброустойчивый интерференционно-теневого прибор на основе синтезированных голограммных линз для исследования газодинамических течений / А. Ф. Белозёров, А. Л. Захаров, А. В. Лукин, Л. Т. Мустафина // Применение оптической голографии для неразрушающего контроля и измерений: Сборник трудов. — Л.: ЛДНТП, 1984. — С. 46–49.
- [3] **Лукин, А. В.** Технологии формообразования и методы лазерно-голографического контроля оптических асферических поверхностей в Государственном институте прикладной оптики. Обзор / А. В. Лукин // Оптический журнал. — 2024. — Том 91. — № 3. — С. 95–114. — DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-95-114

- [4] **Лукин, А. В.** О возможности применения цилиндрических синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Прикладная оптика – 2022: XV Международная научная конференция: Сборник тезисов. — СПб.: Изд-во Скифия-принт, 2023. — С. 28–29.
- [5] **Мельников, А. Н.** Возможность применения цилиндрических осевых синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей / А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 9. — С. 45–54. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-45-54

Laser-holographic methods, devices and complexes for visualizing large gas-dynamic fields. The history of development of the research area at the State Institute of Applied Optics (in memory of A. F. Belozеров and L. T. Mustafina)

V. P. Ivanov, A. V. Lukin, A. N. Melnikov, N. M. Shigapova

JSC "Scientific and Production Association "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia

The article presents the history of the origin and formation of the area of scientific and technological research "Methods, devices and complexes for visualizing large gas-dynamic fields" developed at the State Institute of Applied Optics, as well as the organization of industrial production of appropriate optical equipment for unique domestic pressurized ballistic ranges and gas-dynamic installations at the Kazan Optical and Mechanical Plant. The prospects for the development of this area based on laser-holographic methods and tools are considered.

Keywords: *Large gas-dynamic fields, Visualization, Laser-holographic methods, devices and complexes, Axial computer-generated hologram, Cylindrical computer-generated hologram optical element, Crosslinking the decoding results of interferometric measurements*

Оптические пространственные фильтры для управления шириной выделенных контуров объекта

П. А. Хорин¹, Н. А. Ивлиев^{1,2}, С. Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия

² «Институт систем обработки изображений – Самара» КККиФ НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

Пространственная фильтрация является важным инструментом в области оптики и обработки изображений. Она позволяет устранять нежелательные компоненты сигнала, фильтровать шумы, улучшать контрастность и разрешение изображений, а также осуществлять различные операции обработки сигналов, в том числе выделение краев объектов на изображении. Целью данной работы является разработка пространственных фильтров для управления шириной выделенных контуров объекта. Показана возможность использования комбинаций модовых фильтров Гаусса-Лагерра и Гаусса-Эрмита в оптической схеме Фурье-коррелятора для выделения краев объекта и управления их шириной. Результаты, полученные в данной работе, позволят улучшить распознавание объектов в задачах машинного зрения в реальном времени.

Ключевые слова: Пространственные фильтры, Дифракционная оптика, Выделение краев

Введение

Пространственная фильтрация [1] на основе методов дифракционной оптики может быть использована для выделения краев изображения [2], имеет множество применений в области компьютерного зрения и оптической обработки изображений [3], и может быть реализована с помощью оптических элементов, таких как дифракционные решетки, объективы, фильтры и др. [4]. Оптические элементы позволяют изменять свойства световых волн и управлять их дифракцией, что позволяет выделять края изображения. Края изображения представляют собой переходы яркости или цвета между различными областями изображения и могут быть важными признаками для анализа и обработки изображений, в том числе при распознавании изображения с помощью машинного обучения. В данной работе предлагается использовать оптическую схему Фурье-коррелятора с модовыми пространственными фильтрами для управления шириной выделенных краев.

Результаты

Известно [5], что вихревой пространственный фильтр (радиальное преобразование Гильберта) является оптимальным для выделения контура объекта. Для управления шириной выделенного контура предлагается использовать в качестве функции пропускания фильтра моды Гаусса-Лагерра следующего вида:

$$GL_{nm}(r, \varphi) = \frac{1}{\sigma_0} \sqrt{\frac{2n!}{\pi(n+|m|)!}} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma_0^2}\right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2}r}{\sigma_0}\right)^{|m|} L_n^{|m|}\left(\frac{2r^2}{\sigma_0^2}\right) \exp(im\varphi), \quad (1)$$

где $L_n^m(x)$ — обобщенный многочлен Лагерра,

и моды Гаусса-Эрмита:

$$GH_{nm}(x, y) = \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\sigma_0^2}\right] H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{\sigma_0}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y}{\sigma_0}\right), \quad (2)$$

где $H_n(x)$ — полином Эрмита; σ_0 — радиус Гауссова пучка; n — радиальный индекс; m — меридиальный индекс.

Для моделирования действия пространственной фильтрации на основе Фурье-коррелятора в качестве тестового изображений возьмем треугольник, прямоугольник и круг. Распределение поля $E_f(x, y)$ в результирующей плоскости Фурье-коррелятора с функцией пропускания пространственного фильтра $h(x, y)$ для тестового изображения $f(x, y)$ имеет следующий вид:

$$E_f(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) = \mathfrak{F}[\mathfrak{F}[f(x, y)]\mathfrak{F}[h(x, y)]]. \quad (3)$$

В первой серии численных экспериментов (табл. 1) предлагается рассмотреть функцию пропускания фильтра $h(x, y) = GL_{nm}(r, \varphi)$.



Рис. 1. Тестовое изображение

Таблица 1. Результат моделирования действия пространственной фильтрации с использованием мод Гаусса-Лагерра

$\sigma=0,15$		Радиальный индекс n				
		0	1	2	3	4
Меридиальный индекс m	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

Таблица 2. Результат моделирования действия пространственной фильтрации с использованием мод Гаусса-Эрмита

$\sigma=0,15$		Вертикальный индекс n				
		0	1	2	3	4
Горизонтальный индекс m	0					
	1					
	2					
	3					
	4					

Во второй серии численных экспериментов (табл. 2) предлагается рассмотреть функцию пропускания фильтра $h(x,y) = GH_{nm}(x,y)$.

Для одновременного выделения краев различной ширины предлагается рассмотреть в качестве функции пропускания фильтра многоканальный дифракционный оптический элемент [6]. Многоканальный дифракционный элемент представляет из себя суперпозицию комплексных функций пропускания пространственного фильтра для разных радиальных и меридеальных индексов мод:

$$\tau(x,y) = \sum_{p=0}^P \sum_{q=0}^Q \left\{ \begin{matrix} GL_{pq}(x,y) \\ GH_{pq}(x,y) \end{matrix} \right\} \exp[i(\alpha_{pq}x + \beta_{pq}y)], \quad (4)$$

где P, Q — количество каналов фильтра; α_{pq} и β_{pq} — пространственные частоты.

В третьей серии численных экспериментов (рис. 2) предлагается рассмотреть многоканальную функцию пропускания пространственного фильтра $h(x,y) = \tau(x,y)$, а в качестве тестового изображения взять треугольник.

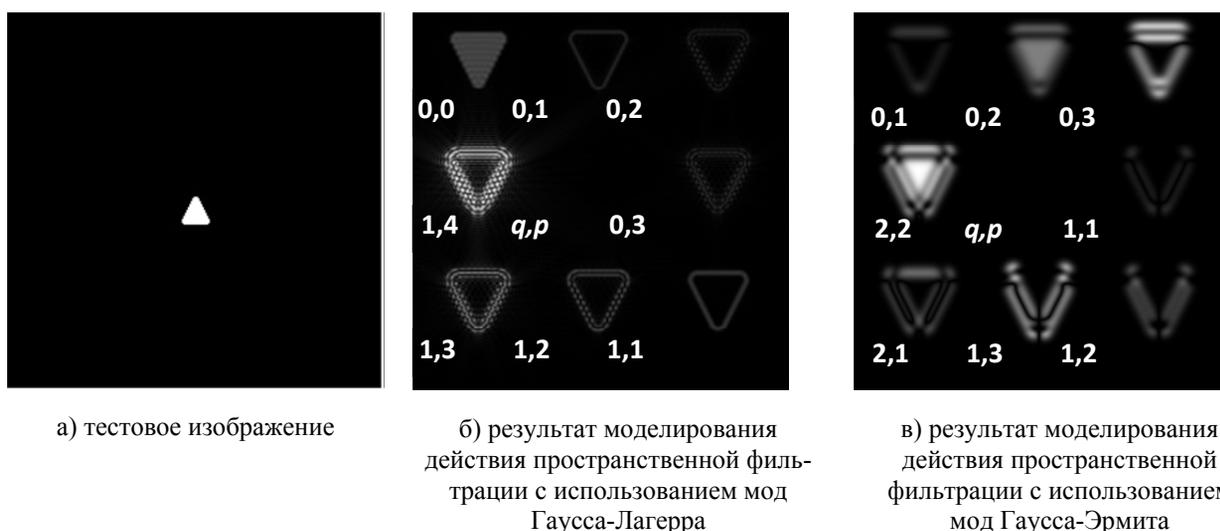


Рис. 2. Многоканальной пространственной фильтрации тестового изображения треугольника

Заключение

Предложены для управления шириной выделенных контуров объекта в качестве пространственных фильтров комбинации модовых фильтров Гаусса-Лагерра и Гаусса-Эрмита в оптической схеме Фурье-коррелятора. Для одновременного выделения краев объекта с различной шириной используется многоканальный дифракционный оптический элемент.

Результаты, полученные в данной работе, показывают, что с увеличением радиального индекса мод Гаусса-Лагерра возрастает количество «ореолов» вокруг контура, что качественно можно отнести к увеличению ширины контура фигуры. Что касается меридеального индекса, то он влияет «сглаживание» углов тестовых фигур.

Моды Гаусса-Эрмита также позволяют управлять шириной контура, но в отличие от мод Гаусса-Лагерра, вертикальный и горизонтальный индексы соответственно влияют на величину и ориентацию смещения контура относительно эталонного. Таким образом, за счет увеличения индексов дополнительно выделяется (увеличивается ширина) та или иная часть контура. Для четных значений обоих индексов выделения краев не происходит.

Учитывая мультиплицирование данных за счет многоканальной пространственной фильтрации, можно говорить о возможном улучшении распознавания объектов в задачах машинного зрения, в том числе в режиме реального времени.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025» в части численного моделирования, а также в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в теоретической части.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Stark, H.** Applications of optical Fourier transforms / H. Stark // Elsevier. — 2012.
- [2] **Zhu, X.** Inverse design of a spatial filter in edge enhanced imaging / X. Zhu, H. Yao, J. Yu, G. Gbur, F. Wang, Y. Chen, Y.-j. Cai // Opt. Lett. — 2020. — Vol 45. — Iss. 9. — P. 2542–2545.
- [3] **Kazanskiy, N. L.** Optical Computing: Status and Perspectives / N. L. Kazanskiy, M. A. Butt, S. N. Khonina // Nanomaterials. — 2022. — Vol 12. — P. 2171.
- [4] **Khonina, S. N.** Exploring Diffractive Optical Elements and Their Potential in Free Space Optics and imaging- A Comprehensive Review / S. N. Khonina, N. L. Kazanskiy, M. A. Butt // Laser Photonics Review. — 2024. — Vol 2024. — P. 2400377.
- [5] **Guo, C.-S.** Radial Hilbert transform with Laguerre-Gaussian spatial filters / C.-S. Guo, Y.-J. Han, J.-B. Xu, J. Ding // Opt. Lett. — 2006. — Vol 31. — Iss. 10. — P. 1394–1396.
- [6] **Хонина, С. Н.** Многопорядковые оптические пространственные вихревые фильтры для одновременного выделения контуров различных частей объекта / С.Н. Хонина, А.П. Порфирьев, П. А. Хорин, А. П. Дзюба, Д. П. Серафимович, Р. В. Скиданов // Компьютерная оптика. — 2024. — Том 48. — № 4. — С. 525–534.

Optical spatial filters for controlling the selected object contours width

P. A. Khorin¹, N. A. Ivkiev^{1,2}, S. N. Khonina^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara, Russia

Spatial filtering is an important tool in the field of optics and image processing. It allows you to eliminate unwanted signal components, filter noise, improve the contrast and resolution of images, and also carry out various signal processing operations, including highlighting the edges of objects in the image. The goal of this work is to develop spatial filters to control the width of the selected object contours. The possibility of using combinations of Gauss-Laguerre and Gauss-Hermite mode filters in the optical circuit of a Fourier correlator to highlight the edges of an object and control their width is shown. The results obtained in this work will improve object recognition in real-time computer vision tasks.

Keywords: Spatial filters, Diffraction optics, Edge detection

Численный анализ распределения интенсивности вдоль оптической оси для непараксиальных дифракционных линз

О. А. Дюкарева^{1,2}, А. В. Устинов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева, Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

В работе рассматривается распределение интенсивности вдоль оптической оси при дифракции лазерного излучения на параболических и идеальных дифракционных линзах, а также аксиконах при переходе от параксиальной волновой модели к непараксиальной. Показаны непараксиальные эффекты, позволяющие варьировать профиль интенсивности при сохранении значения числовой апертуры и различных радиусах зрачка.

Ключевые слова: Параболическая непараксиальная линза, Идеальная линза, Аксикон, Преобразование Рэлея-Зоммерфельда

Параболическая линза, имеющая функцию пропускания $\exp(-ikr^2 / (2f))$ в параксиальной области, дает практически симметричный максимум интенсивности в точке $z = f$. При переходе к непараксиальной волновой модели, например, когда $f \leq R$ можно отметить существенное изменение распределения интенсивности на оси, вызванное как непосредственно непараксиальными эффектами, так и особенностями метода численного расчета, в частности, использование интеграла Рэлея-Зоммерфельда вместо преобразования Френеля. Для компенсации этого эффекта возможно использование в непараксиальной области идеальных линз с комплексной функцией пропускания $\exp(-ik\sqrt{r^2 + f^2})$ [1].

Также существенное влияние на профиль интенсивности в непараксиальной области оказывает значение числовой апертуры $NA = \sin\left(\arctg\left(\frac{R}{f}\right)\right)$. Показано, что при числовой апертуре $NA \leq 0,447$ ($R/f \leq 0,5$) максимальное значение интенсивности для идеальной и параболической линз одинаковое, но в случае последней смещено ближе к входной плоскости. Однако при $NA > 0,447$ становятся значимыми не только количественные различия, но и качественные, при этом фазовые картины оптических элементов внешне сохраняются практически идентичными.

При уменьшении значения фокуса комплексная функция пропускания идеальной линзы стремится к функции пропускания аксикона $\exp(-ikr)$. В частности, для $R = 20$ мкм уже при значениях $f \leq 5$ мкм осевое распределение интенсивности при дифракции на линзе близко к распределению, формируемому аксиконом. С другой стороны, при малых значениях R функция пропускания идеальной линзы стремится к виду параболической линзы, как и распределение интенсивности вдоль оптической оси. Полученные результаты могут быть полезны для оптического захвата и манипулирования микрочастицами.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-79-10007) в части численного моделирования, а также в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» в теоретической части.

Список источников

- [1] Хонина, С. Н. Сравнительное исследование спектральных свойств асферических линз / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, Р. В. Скиданов, А. А. Морозов // Компьютерная оптика. — 2015. — Том. 39. — № 3. — С. 363–369.

Numerical analysis of intensity distribution along the optical axis for non-paraxial diffractive lenses

O. A. Dyukareva^{1,2}, A. V. Ustinov²

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara, Russia

The paper examines the intensity distribution along the optical axis at diffraction of laser radiation on parabolic and ideal diffractive lenses, as well as axicons during the transition from a paraxial wave model to a non-paraxial one. Non-paraxial effects are shown that make it possible to vary the intensity profile while maintaining the numerical aperture value and different pupil radii.

Keywords: *Parabolic non-paraxial lens, Ideal lens, Axicon, Rayleigh-Sommerfeld transform*

Струйная печать фотонных структур с магниточувствительной самосборкой

А. А. Смирнов¹, Т. Н. Погосян¹, С. А. Поваров², Е. В. Гунина², В. А. Миличко², М. И. Морозов¹, А. В. Виноградов¹

¹ Лаборатория струйной печати функциональных материалов, Научный Центр Solution Chemistry of Advanced Materials and Technologies, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический мегафакультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Магнитные коллоидные нанокристаллические кластеры (МКНК) обладают свойством магнитоиндуцированной самосборки под действием внешнего магнитного поля, что создает фотонный кристалл, период решетки которого зависит от силы внешнего магнитного поля. Этот физический эффект можно использовать для получения магниточувствительного цветного микроизображения на поверхности твердой подложки, но требует соответствующих масштабируемых технологий осаждения МКНК. В данной работе мы рассматриваем струйную печать МКНК на поверхность твердой подложки, покрытой неотвержденным полидиметилсилоксаном, и демонстрируем дифракционные свойства полученного изображения, контролируемые внешним магнитным полем. Таким образом, полученные результаты открывают путь к полукommerческому производству изображений для защиты от подделок в больших масштабах.

Ключевые слова: Магнитные коллоидные нанокристаллические кластеры, Магнетит, Фотонный кристаллы, Струйная печать, Дифракция

Магнитные коллоидные нанокристаллические кластеры (МКНК) на основе Fe_3O_4 являются перспективным материалом для фотонных кристаллов (ФК), демонстрируя сверхбыструю сборку под действием внешнего магнитного поля (ВМП). Сборка МКНК происходит вдоль силовых линий в упорядоченные структуры, чему способствует баланс сил отталкивания и притяжения, воздействующих на магнитные частицы. Этот эффект известен как магнитоиндуцированная самосборка суперпарамагнитных наночастиц [1]. Динамический характер процесса сборки позволяет физически изменять расстояние между частицами и, следовательно, период решетки ФК, манипулируя силой ВМП (рис. 1). Магнитно-чувствительные ФК представляют непосредственный исследовательский интерес при борьбе с подделками [2], в оптической магнитометрии [3], при создании дисплеев [4] и колориметрических хемосенсоров [5], хотя их практическое применение по-прежнему требует простых и надежных методов осаждения.

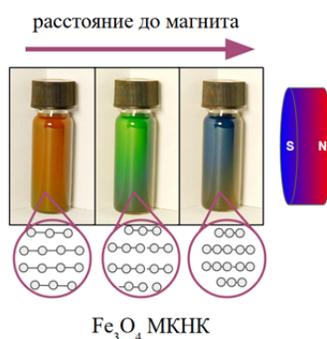


Рис. 1. Фотографии водных дисперсий МКНК с проявлением цветов RGB (слева направо), полученные на различных расстояниях до магнита, дополненная схематическим изображением образования дифракционной решетки из частиц

В этой работе мы исследуем возможность прямого осаждения чернил на основе МКНК на поверхность твердой подложки, покрытой слоем неотвержденного полидиметилсилоксана (ПДМС), путем струйной печати по требованию. Эта технология использует капли жидкости объемом до одного пиколитра и представляет собой универсальный и экономичный инструмент для тщательно контролируемого осаждения различных композиций, позволяя создавать изображения с высоким разрешением.

Для характеристики МКНК исследовались размер получаемых частиц методом динамического светорассеяния (средний размер ~ 177 нм) и дзета-потенциал. Магнитные свойства измерялись с использованием вибрирующего магнитометра, удельная намагниченность насыщения варьировалась в пределах 40-60 эме/г. Кристаллическая структура МКНК исследовалась методом рентгеноструктурного анализа и соответствовала структуре магнетита (JCPDS PDF ID: 00-065-0731). Морфология частиц была изучена с использованием сканирующего электронного микроскопа

и показала правильную сферическую форму. Для струйной печати были разработаны и исследованы чернила с этиленгликолем, поскольку водная основа не подходила для ПДМС подложки: во время синтеза частицы покрывались раствором поли (4-стиролсульфоновой кислотой и малеиновой кислоты) для контроля роста частицы и полиакриловой кислотой для стабилизации структуры под действием ВМП.

Дифракционные свойства чернил как в водном растворе, так и в этиленгликоле исследовались при варьировании силы ВМП (от 7,7 мТл до 190 мТл) и концентрации МКНК (от 2,5 до 20 мг/мл). На рисунке 2 представлены спектры отражения для концентрации 20 мг/мл. В отличие от других образцов здесь была детектирована синяя область спектра, что требует высокой напряженности магнитного поля выше 100 мТл.

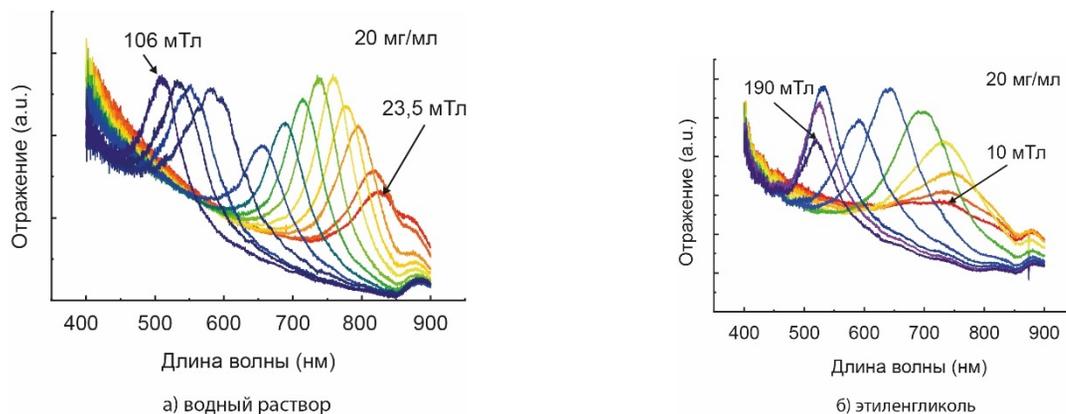


Рис. 2. Спектры отражения дисперсий МКНК с концентрацией 20 мг/мл при различной силе ВМП в водном растворе (а) и в этиленгликоле (б)

Сформированные на основе концентрации 20 мг/мл чернила были использованы для струйной печати. Изображение образовывалось за счет микроэмульсионных капель чернил, содержащих МКНК диспергированные в этиленгликоле и инкапсулированные в неотвержденный ПДМС. На рисунке 3 показан эффект магнитоиндуцированной самосборки в ФК под действием ВМП, выраженный в появлении структурных цветов.



Рис. 3. Шаблон изображения и готовый паттерн, демонстрирующий появление структурных цветов в ответ на изменение ВМП

В этом исследовании продемонстрировано сочетание уникальных возможностей МКНК в виде быстрой сборки в фотонные кристаллы и оптически настраиваемого отклика с преимуществами струйной печати. С этой целью мы разработали несколько последовательных шагов по адаптации магниточувствительных материалов для струйной печати.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект номер 21-79-10202.

Список источников

- [1] Ge, J. Self-assembly and field-responsive optical diffractions of superparamagnetic colloids / J. Ge, Y. Hu, T. Zhang, T. Huynh, Y. Yin // *Langmuir*. — 2008. — Vol 24. — №. 7. — P. 3671–3680.

- [2] **You, A.** Facile fabrication of a magnetically assembled colloidal photonic crystal film via radical polymerization / A. You, Y. Cao, G. Cao // RSC Advances. — 2015. — Vol 5. — №. 114. — P. 93945–93950.
- [3] **Zhang, Y.** A dual-channel optical magnetometer based on magnetically responsive inverse opal microspheres / Y. Zhang, Y. Jiang, X. Wu, J. Ge // Journal of Materials Chemistry C. — 2017. — Vol 5. — №. 36. — P. 9288–9295.
- [4] **Wang, M.** Magnetically actuated liquid crystals / M. Wang, L. He, S. Zorba, Y. Yin // Nano Letters. — 2014. — Vol 14. — №. 7. — P. 3966–3971.
- [5] **You, A.** Colorimetric sensing of melamine using colloidal magnetically assembled molecularly imprinted photonic crystals / A. You, Y. Cao, G. Cao // RSC advances. — 2016. — Vol 6. — №. 87. — P. 83663–83667.

Inkjet printing of photonic structures with magnetically sensitive self-assembly

A.A Smirnov¹, T.N. Pogosian¹, S.A. Povarov², E.V. Gunina², V.A. Milichko², M.I. Morozov¹, A.V. Vinogradov¹

¹ Laboratory of Inkjet Printing of Functional Materials, Institute of Solution Chemistry of Advanced Materials and Technologies, ITMO University, St. Petersburg, Russia

² School of Physics and Engineering, ITMO University, St. Petersburg, Russia

Magnetic colloidal nanocrystalline clusters (MCNCs) show magnetically induced self-assembly under the influence of an external magnetic field (EMF), which creates a photonic crystal whose lattice parameter depends on the strength of the EMF. This physical effect can be used to obtain magnetically sensitive color microimaging on the surface of a solid substrate, but requires appropriate scalable MCNCs deposition technologies. In this work, we examine the inkjet printing of MCNCs onto the surface of a solid substrate coated with uncured polydimethylsiloxane and demonstrate the diffraction properties of the resulting image controlled by an EMF. The results, thereby, pave the way to semi-commercial manufacture an anticounterfeiting imaging at a large scale.

Keywords: Magnetic colloidal nanocrystalline clusters, Photonic crystal, Magnetite, Inkjet printing, Diffraction

Формирование отражательных дифракционных решеток методом сухого электронно-лучевого травления резиста

Ф. А. Сидоров, А. Е. Рогожин

Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН, Москва, Россия

В основе метода сухого электронно-лучевого травления резиста (СЭЛТР) лежит цепная реакция термической деполимеризации, протекающая при экспонировании позитивного полимерного резиста электронным лучом при температурах выше температуры стеклования резиста. Данная реакция обеспечивает высокопроизводительное формирование рельефа со сглаженным профилем непосредственно при экспонировании. Было установлено, что предельное латеральное разрешение метода СЭЛТР и предельный угол наклона профиля, получаемого этим методом, составляют 300 нм и 70° соответственно. Это позволяет использовать метод СЭЛТР для формирования отражательных дифракционных решеток с синусоидальным и треугольным профилем штриха, имеющих плотность штрихов до 2000 1/мм.

Ключевые слова: ПММА, Термическая деполимеризация, Сухое электронно-лучевое травление резиста, Отражательные дифракционные решетки

Введение

В настоящее время для формирования отражательных дифракционных решеток широко применяются делительные машины, а также метод интерференционной литографии. Однако в качестве альтернативного высокопроизводительного метода может рассматриваться сухое электронно-лучевое травление резиста (СЭЛТР). В основе данного метода лежит цепная реакция термической деполимеризации, протекающая при экспонировании позитивного полимерного резиста электронным лучом при температурах выше температуры стеклования резиста [1]. Происходящие при таких условиях электронно-стимулированные разрывы молекул резиста вызывают реакцию цепной термической деполимеризации, что приводит к появлению в резисте большого количества свободного мономера. За счет диффузии мономер быстро покидает область травления, обеспечивая формирование полостей в резисте, которые впоследствии заполняются за счет релаксации резиста. Это приводит к формированию в резисте рельефа со сглаженным профилем непосредственно на стадии экспонирования (рис. 1).

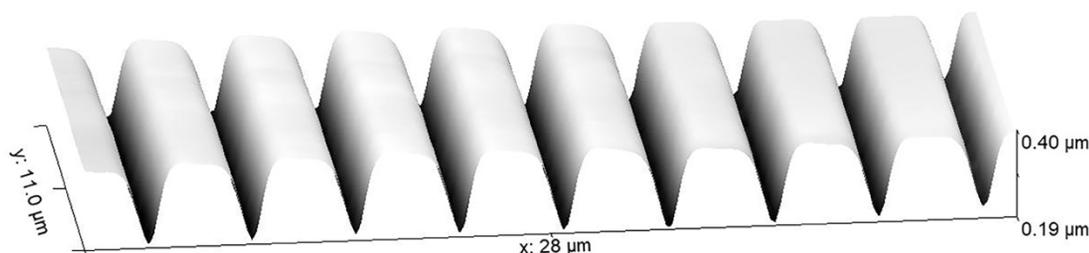
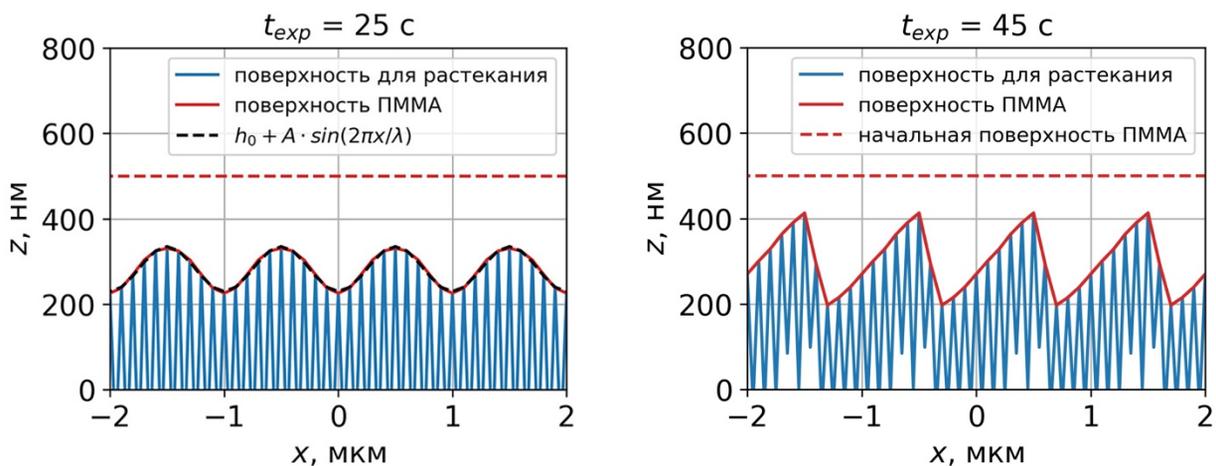


Рис. 1. Пример рельефа, получаемого в ПММА методом СЭЛТР при экспонировании вдоль серии параллельных линий

1. Моделирование синусоидального профиля, получаемого методом сухого электронно-лучевого травления резиста

Для моделирования профиля рельефа, получаемого методом СЭЛТР, использовался алгоритм, учитывающий основные протекающие процессы, — электронно-стимулированные разрывы молекул резиста, деполимеризацию резиста, диффузию мономера и процессы растекания [2]. На этапе моделирования растекания слой резиста с полостями приближался сплошной пилообразной поверхностью, эволюция которой в дальнейшем моделировалась с помощью метода конечных элементов [3]. На рис. 2 приведены результаты моделирования профилей решеток, получаемых методом СЭЛТР в слое полиметилметакрилата (ПММА) с начальной толщиной 500 нм. Температура образцов составляла 150 °С, плотность тока экспонирования на единицу длины линии — 30 пА. Результаты моделирования показали, что при правильном подборе параметров процесса СЭЛТР (ток и профиль электронного пучка, время экспонирования, скорость охлаждения образца) в ПММА могут быть получены решетки с синусоидальным и треугольным профилем с плотностью штрихов до 2000 1/мм.



а) моделирование решетки с синусоидальным профилем

б) моделирование решетки с треугольным профилем

Рис. 2. Результаты моделирования профилей отражательных дифракционных решеток с периодом 1 мкм, полученных методом СЭЛТР в слое ПММА

Заключение

В данной работе моделируется применение метода СЭЛТР для получения в слое ПММА отражательных дифракционных решеток. Моделирование протекания процесса СЭЛТР при экспонировании слоя ПММА вдоль серии параллельных линий показало, что с помощью этого метода могут быть получены решетки с синусоидальным и треугольным профилем с плотностью штрихов до 2000 1/мм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bruk, M. A.** Formation of micro-and nanostructures with well-rounded profile by new e-beam lithography principle / Bruk M. A., Zhikharev E. N., Rogozhin A. E., Streltsov D. R., Kalnov V. A., Averkin S. N., Spirin A. V. // *Microelectronic engineering*. — 2016. — Vol 155. — P. 92–96.
- [2] **Сидоров, Ф. А.** Моделирование процесса формирования микро-оптических структур методом термостимулированной электронно-лучевой литографии / Ф. А. Сидоров, А. Е. Рогожин // *Сборник трудов по материалам VIII Международной конференции и молодежной школы (г. Самара, 23–27 мая)*. — 2022. — Том 1.
- [3] **Sidorov, F.** Thermal Reflow Simulation for PMMA Structures with Nonuniform Viscosity Profile / F. Sidorov, A. Rogozhin // *Polymers*. — 2023. — Vol 15. — P. 3731.

Formation of reflective diffraction grating by dry electron beam etching of resist

F. A. Sidorov, A. E. Rogozhin

Valiev Institute of Physics and Technology of RAS, Moscow, Russia

Annotation. Dry electron beam etching of resist (DEBER) is based on chain reaction of thermal depolymerization that takes place in positive polymer resist during its exposure by electron beam at temperatures above the glass transition temperature of the resist. This reaction leads to rapid formation of the relief with smoothed profile directly during exposure. It was found that the lateral resolution of DEBER and the maximum achievable slope of the profile obtained by this method comprise 300 nm and 70°, respectively. This makes it possible to use DEBER for the formation of reflective diffraction gratings with sinusoidal and triangular profile having a number of lines up to 2000 1/mm.

Keywords: PMMA, Thermal depolymerization, Dry e-beam etching of resist, Reflective diffraction gratings

Студия Волнографии

А. А. Барышников¹, В. Ю. Юрченкова¹, С. С. Семенов¹, В. П. Кузнецов²

¹Студия Волнографии, Томск, Россия

²Голографическая лаборатория Continuum, Новосибирск, Россия

В работе представлена деятельность студии Волнографии (г. Томск). Студия занимается разработкой регистрирующих сред на основе галогенидов серебра для записи высококачественных цветных изобразительных голограмм. В силу дискредитации термина голография в массовом сознании, авторы предлагают ввести термин волнография для обозначения изобразительных цветных голограмм.

Ключевые слова: Изобразительная голография, Голографический принтер, Дифракционные оптические элементы, Регистрирующие среды

Введение

Изобразительная голография существует чуть больше шестидесяти лет, за это время был накоплен колоссальный опыт: от создания регистрирующих сред до регламентов оформления для долговечного хранения. Научно-техническая и экономическая среды, в которых эти знания сформировались, уже сильно отличаются от сегодняшних, но тем не менее эти разработки и опыт сейчас просто пылятся на полках институтов, привлекая внимание лишь немногих энтузиастов. И мало того, сегодня обыватель даже не знаком с истинным значением термина «голограмма», так как в информационном поле этот термин ассоциируется с довольно широким ассортиментом технологий формирования объемных и псевдообъемных изображений: голографический вентилятор, лентичулярные растры, AR- и VR-технологии.

Слово голография означает все рисую или все записываю, термин ввел открыватель голографии Денеш Габор. Название подчеркивает, что голография записывает информацию не только об амплитудных характеристиках изображения, но и фазовых, а также передает цвет.

Юрий Николаевич Денисюк, взяв за основу методы интерференционной гелиохромии Габриэля Липпмана, в 1958 г. изобрел собственную схему записи голограмм, которая сейчас называют отражательной или схемой Денисюка. Когда он проводил свои эксперименты, то еще не был знаком с трудами Габора, поэтому Юрий Николаевич придумал свой термин — волновая фотография, поскольку изображение формируется за счет интерференционных волн.

Используя термин волновая фотография или сокращенно волнография применительно к изобразительной голографии, мы хотим конкретизировать продукт, который создаем, чтобы сформировать у потенциальных клиентов и обывателей однозначные ожидания.

Что касается технологий изготовления голограмм, современный уровень научно-технического прогресса позволяет при гораздо меньших финансовых вложений в материально техническую составляющую процесса производства голограмм, получить результат сравнимый с тем, что получали в годы пика развития советской голографии. К тому же появление доступных голографических принтеров позволяет адаптировать изобразительную голографию в современную парадигму отношений человека и визуальных материалов (фотография, полиграфия). В работе описан системный подход в формировании голографических технологических процессов.

1. Цель

Цель нашей студии изготовить материалы нового поколения на основе галогенидов серебра на гибкой подложке для записи цветных изобразительных волнограмм.

2. Задачи

Первостепенные задачи студии:

- формирование стандартов применения разработанного ассортимента голографических материалов разных классов: «Мастер-волнографии» — для записи мастер-голограмм, «волнокопии» — для тиражирования голограмм, «любительский» — доступный материал для школ и любительского сектора;
- создание конкурентноспособной технологии изготовления регистрирующих сред для изготовления цветных голограмм, не уступающих зарубежным аналогам;
- разработка технологической карты и оборудования для услуги по изготовлению высококачественных голограмм, которая не требует высокой квалификации;

- разработка и реализация программы популяризации голографических технологий с вовлечением всех участников голографической индустрии;
- создание и реализация голографических произведений искусства в соответствии с устоявшимися требованиями арт рынка;
- поиск новых ниш для внедрения голографических технологий.

3. Результаты

Организацией разработана дорожная карта в рамках которой вышеописанные задачи реализуются. Получен цветной галогенидосеребряный материал на пленке. Отработана автоматизированная химико-фотографическая обработка голограмм. Проводится научно-исследовательская работа по оптимизации режимов изготовления материала и записи волнограмм.

Заключение

В работе были представлены задачи и текущие результаты работы студии Волнографии.

Volnographic Studio

A. A. Baryshnikov¹, V. P. Kuznetsov¹, V. Y. Yurchenkova¹, S. S. Semenov¹

² «Volnographic Studio», Tomsk, Russia

¹ «Continuum» Holographic laboratory, Novosibirsk, Russia

The paper presents the activities of the Volnography Studio (Tomsk). The studio is engaged in the development of recording media based on silver halides for recording high-quality color image holograms. Due to the discrediting of the term holography in the mass consciousness, the authors propose to introduce the term volnography that refer pictorial color holograms.

Keywords: Display holography, Holoprinter, Diffractive optical elements, Recording media

Регистрация во встречных пучках рельефных голографических решеток на светочувствительном материале ПФГ-01

Н. М. Ганжерли¹, С. Н. Гуляев², Д. А. Ильюшина², И. А. Маурер¹

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Продемонстрирована возможность регистрации рельефно-фазовых голографических решеток с пространственной частотой от 50 до 800 л/мм на фотоматериале ПФГ-01 при использовании схемы записи во встречных пучках.

Ключевые слова: Голография, Схема регистрации решеток во встречных пучках, Фотоматериал для голографии ПФГ-01, Дифракционная эффективность

Введение

Ранее исследовалась регистрация в сходящихся пучках высокоэффективных высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток на содержащих желатин светочувствительных средах [1]. Также была разработана усовершенствованная технология обработки регистрирующих сред, основанная на деструктивном воздействии коротковолнового УФ излучения на желатин [1, 2]. Были получены образцы рельефно-фазовых голографических решеток в области пространственных частот 1200–1600 л/мм с высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) до 67 % на бихромированном желатине (фотопластинки ПФГ-04 ОАО «Компания Славич») и 42 % на галоидосеребряной фотоэмульсии (фотопластинки ПФГ-01 ОАО «Компания Славич»).

Для получения рельефных голографических решеток наряду с симметричной оптической схемой записи в сходящихся пучках интересно рассмотреть использование схемы регистрации во встречных пучках (контрнаправленная схема регистрации). В этом случае пространственную частоту решетки на поверхности можно варьировать в широких пределах за счет изменения наклона штрихов решетки внутри фотоматериала.

Постановка эксперимента

Для регистрации решеток был выбран вариант оптической схемы, в котором отраженный от зеркала лазерный пучок является обращенным по отношению к падающему пучку (рис. 1а). В такой оптической схеме можно легко регулировать пространственную частоту поверхностной решетки путем поворота помещенной перед зеркалом фотопластинки с точностью до долей градуса (рис. 1б).

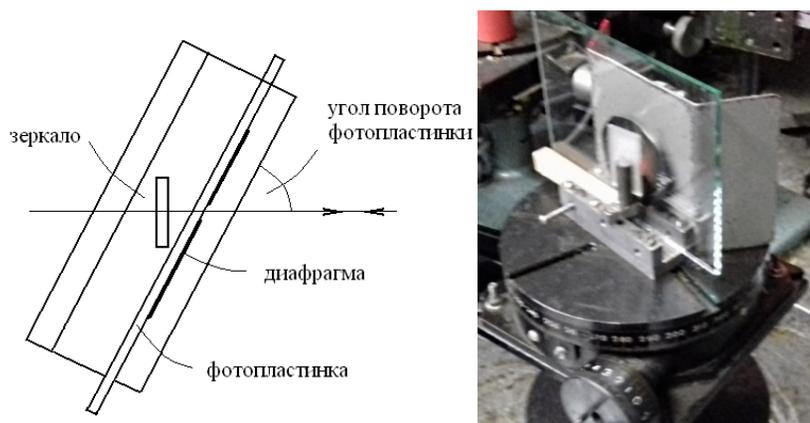


Рис. 1. Контрнаправленная схема регистрации решеток:

а) схема расположения зеркала относительно; б) устройство поворота фотопластинки падающего пучка света

Излучением He-Ne лазера длиной волны 0,63 мкм записывались первичные амплитудные структуры в виде серебряного изображения наклонных штрихов в объеме проявленной фотоэмульсии. Общей задачей последующей фотохимической обработки фотопластинок являлась инициация поверхностной решетки, осуществляемая с одновременным уничтожением внутренней голографической структуры. При этом ключевыми операциями обработки являлись облучение фотоэмульсии

коротковолновым УФ излучением [2], вызывающим избирательную фотодеграцию желатинового слоя, и последующее травление различными реагентами [1]. Пространственная частота регистрируемых решеток варьировалась от 50 до 800 л/мм. Время облучения УФ лампой ДРТ-220 было 25 минут. Время травления составляло 10 с. Далее следовало купание образцов в двух ваннах чистого изопропанола.

2. Результаты эксперимента

На пространственных частотах от 640 до 730 л/мм, например, были получены голографические решетки с ДЭ порядка 8 %. Также было обнаружено, что в случае создания голографических решеток во встречных пучках лучшие результаты получаются при травлении образцов после воздействия УФ излучения в неразбавленной ледяной уксусной кислоте (ЛУК). В случае создания решеток на том же материале в попутных пучках травление осуществлялось в 50 % растворе ЛУК в изопропаноле [1].

Заключение

Результаты работы показали, что в отличие от традиционной схемы записи Денисюка, с помощью которой регистрируют объемные голограммы, работающие на отражение, контрнаправленная схема позволяет получить также тонкие рельефные решетки, работающие на пропускание.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ганжерли, Н. М.** / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Оптический журнал. — 2023. Том 90. — № 3. — С. 38–47.
- [2] **Гуляев, С. Н.** / С. Н. Гуляев, В.П. Ратушный // Оптический журнал. — 2003. — Том 70. — № 2. С. 45–49.

Relief holographic grating recording in counterdirectional beams on the photosensitive material PFG-01

N. M. Ganzherli¹, S. N. Gulyaev², D. A. Ilyushina², I. A. Maurer¹

¹ Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

² Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Russia

Possible recording of relief-phase holographic gratings with the spatial frequency from 50 to 800 lines/mm on the photosensitive material PFG-01 when using the counterdirectional beam recording scheme was demonstrated.

Keywords: Holography, Counterdirectional beam recording scheme, Photoplates PFG-01, Diffraction efficiency

Секция 2

Оптика лазерных пучков

и структурированного света

Датчик Шэка — Гартмана как универсальный измеритель

Л. А. Больбасова, В. П. Лукин

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

Широкое распространение получил датчик волнового фронта (ДВФ) типа Шэка — Гартмана. Этот датчик может использоваться не только для объективного контроля оптики или оптической системы, но и работать в реальном масштабе времени, измерять флуктуации фазового фронта в оптической волне. При создании системы адаптивной оптики (АО) для современных оптико-электронных систем предварительно для изучения состояния турбулентности на трассе распространения оптического излучения на нее устанавливаются такой датчик. Помимо фазовых измерений, ДВФ может давать распределение усредненного значения флуктуаций интенсивности на входном зрачке измерителя. Еще одной возможностью применения ДВФ является использование его как измерителя двух компонент средней скорости потока переносящего турбулентные неоднородности через апертуру датчика. В докладе приведены данные работы ДВФ на горизонтальной атмосферной трассе.

Ключевые слова: Датчик волнового фронта, Турбулентность, Параметр Фрида, Скорость ветра

При создании системы адаптивной оптики (АО) для современных оптико-электронных систем предварительно для изучения состояния турбулентности на трассе распространения оптического излучения на нее устанавливают специальный датчик волнового фронта (ДВФ). В настоящее время наибольшее распространение получил ДВФ типа Шэка — Гартмана. В связи со своей простотой и отсутствием движущихся частей он достаточно удобен для работы в условиях атмосферы.

Известно, что основной задачей, решаемой с помощью этого датчика, является измерение фазового фронта. При этом датчик может использоваться не только для объективного контроля оптики или оптической системы, но и работать в реальном масштабе времени, измерять флуктуации фазового фронта в оптической волне. Существуют несколько вариантов построения такого ДВФ, это и классический, и корреляционный датчик Шэка — Гартмана. Установка ДВФ на атмосферной трассе позволяет получать данные, которые далее могут использоваться как для проектирования системы АО, так и для построения эффективного алгоритма коррекции искажений. ДВФ Шэка — Гартмана измеряет локальные наклоны волнового фронта в пределах отдельной субапертуры и это дает возможность оценивать средний уровень турбулентности на атмосферной трассе. При этом возможно проведение оценки интегрального значения уровня турбулентности, или параметра Фрида, как на основе модового разложения флуктуаций фазы, так и, используя датчик, как дифференциальный измеритель дрожания изображения опорного источника.

Помимо фазовых измерений, ДВФ может давать распределение усредненного значения флуктуаций интенсивности на входном зрачке измерителя, используя подобие распределений флуктуаций интенсивности и светового потока в пределах субапертуры малого размера. Это сулит возможность проведения амплитудно-фазового управления светом. Следует отметить, что выбор рабочей частоты ДВФ зависит как от параметров самого датчика и, прежде всего, от точности его работы, так и от состояния турбулентности на атмосферной трассе. Слепая погоня за увеличением частоты работы ДВФ приводит к неправильным измерениям флуктуаций фазы из-за зависимости сигнала от амплитудных флуктуаций.

Еще одной возможностью применения ДВФ Шэка — Гартмана является использование его как измерителя двух компонент поперечной скорости ветра, или точнее средней скорости потока переносящего турбулентные неоднородности через апертуру датчика. Данные по компонентам средней скорости ветра можно использовать, например, для пересчета пространственных масштабов корреляций во времени, а также для реализации прогнозирующих алгоритмов коррекции фазовых искажений в оптических волнах.

В докладе были суммированы достижения авторов последних лет [1–6]:

- данные работы ДВФ на горизонтальной атмосферной трассе, при этом в ДВФ были использованы несколько растров переменной размерности, что позволяло работать в условиях меняющихся условий по уровню турбулентности,

- собраны сведения о применении ДВФ Шэка-Гартмана для анализа уровня турбулентности, скорости ветра,

- приведены результаты одновременного применения двух одинаковых ДВФ с целью анализа влияния амплитудных флуктуаций в оптической волне, которые могут приводить к замиранию оптического сигнала. При этом измерение параметра Фрида выполнялось по данным величины дисперсии одной из модовых составляющих разложения фазовых флуктуаций.

Все отмеченные возможности, несмотря на множество ограничений, делают ДВФ Шэка — Гартмана уникальным измерителем турбулентного состояния атмосферы при работе как на горизонтальных, так и на наклонных атмосферных трассах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bolbasova, L. A.** Atmospheric turbulence meter based on a Shack — Hartmann wavefront sensor / L. A. Bolbasova, A. N. Gritsuta, E. A. Kopylov, V. P. Lukin, E. L. Soin et al // Journal of Optical Technology. 2019. — Т. 86. — №7. — С. 426-430.
- [2] **Bolbasova, L. A.** Features of Optical Image Jitter in Random Medium with Finite Outer Scale / L. A. Bolbasova, P. G. Kovadlo, V. P. Lukin, V. V. Nosov, A. V. Torgaev // Atmospheric and Oceanic Optics. — 2013. — Т. 26. — №2. — С. 79–84.
- [3] **Borzilov, A. G.** Image jitter meter for low intensity radiation / A. G. Borzilov, A. N. Gritsuta, P. A. Konyaev, V. P. Lukin, V. V. Nosov, E. L. Soin, A. V. Torgaev // Proc. SPIE. — 2022. — V. 12341. — P. 12341 0F.
- [4] **Bolbasova, L. A.** Long-term trends of astroclimatic parameters above the Terscol Observatory / L. A. Bolbasova, E. A. Kopylov // MDPI. Atmosphere. — 2023. — 14(8). — P. 1264.
- [5] **Potantin, S. A.** Mobile differential image motion monitor for astroclimate research / S. A. Potantin, E. A. Kopylov, A. D. Savvin // Astrophysical Bulletin. 2024. — Т. 79. — №2. — С. 350-359.
- [6] **Большасова, Л. А.** Экспериментальные исследования влияния потери данных измерений на качество реконструкции с помощью датчика Шэка-Гартмана волнового фронта, искаженного атмосферной турбулентностью / Л. А. Большасова, В. П. Лукин, Е. Л. Соин // Оптический журнал. — 2024. 91. — №8. — С. 25-34.

Shack — Hartmann sensor as a universal meter

L. A. Bolbasova, V. P. Lukin

Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

A wavefront sensor (WFS) of the Shack — Hartmann type has become widespread. This sensor can be used not only for objective monitoring of optics or an optical system, but also operates in real time, measuring phase front fluctuations in an optical wave. When creating an adaptive optics (AO) system for modern optical-electronic systems, such a sensor is first installed on it to study the state of turbulence along the propagation path of optical radiation. In addition to phase measurements, WFS can give the distribution of the average value of intensity fluctuations at the entrance pupil of the meter. Another possibility of using the WFS is to use it as a meter of two components of the average flow velocity that transfers turbulent inhomogeneities through the sensor aperture. The report presents data on the operation of the WFS on a horizontal atmospheric path.

Keywords: *Wavefront sensor, turbulence, Fried parameter, Wind speed*

Особенности интерференции оптических вихрей высших порядков с гауссовым пучком

В. Ю. Венедиктов^{1,2}, М. Е. Павелина², А. А. Рыжая¹, А. А. Севрюгин¹, Е. В. Шалымов¹, Е. К. Юрьева¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина)»

²Санкт-Петербургский государственный университет

Исследовано теоретическое предсказание, согласно которому световое поле, формируемое в результате интерференции оптического вихря с топологическим зарядом m , где $|m| > 1$ и соосного ему гауссова пучка, может рассматриваться и как система из $|m|$ вихрей с зарядом 1.

Ключевые слова: Оптический вихрь, Топологический заряд, Картина интерференции

Скалярные оптические вихри, представляющие собой световое поле с однородным по сечению пучка состоянием поляризации, волновой фронт которого представляет собой геликоидальную поверхность, являются старейшим и наиболее известным объектом изучения сингулярной оптики и оптики структурированного света [1, 2]. В центральной зоне такого вихревого пучка, известной также как оптическая сингулярность, фаза не определена, а потому и интенсивность излучения равна нулю. Основной характеристикой оптического вихря является т. н. топологический заряд m , величина которого соответствует шагу геликоида, измеренному в длинах волн излучения, а знак определяет направление закрутки геликоида.

Несмотря на несколько десятилетий изучения, даже в случае простейшего скалярного вихря с целочисленным топологическим зарядом, ряд его свойств остается предметом изучения и дискуссий. К таким вопросам относится, в частности, вопрос об эволюции вихрей с $|m| > 1$ при их распространении в свободном пространстве и в атмосфере.

В рамках изучения такой эволюции, автор работы [3] проанализировал развитие светового пучка, состоящего из двух соосных пучков — оптического вихря с топологическим зарядом $|m| > 1$ и когерентного с вихрем гауссова пучка значительно (на порядок) меньшей интенсивности. В работе [3] было показано, что в дальней зоне (т. е. после прохождения фокуса) картина интерференции этих пучков становится неотличима от картины интерференции этого же гауссова пучка и системы из m вихрей первого порядка, сингулярные точки которых расположены на окружности, центр которой совпадает с сингулярной точкой исходного вихря высокого порядка. Иными словами, в этом линейном процессе происходит, по сути, распад вихря высокого порядка на несколько вихрей первого порядка.

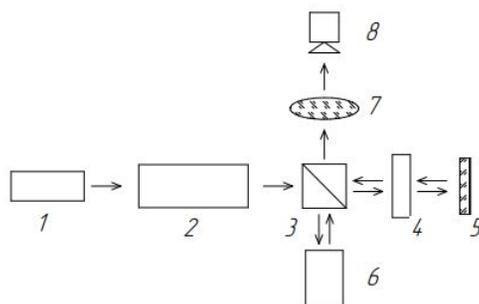


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — He-Ne лазер ($\lambda = 0,63 \mu\text{m}$); 2 — коллиматор; 3 — светоделительный куб; 4 — ослабляющий светофильтр; 5 — плоское зеркало; 6 — модулятор света; 7 — фокусирующая линза; 8 — цифровой фотоаппарат, помещенный за фокальной плоскостью линзы 7

В настоящей работе была предпринята попытка реализовать такую трансформацию. Схема эксперимента показана на рисунке 1. Как видно из рисунка, в основу установки был положен интерферометр Майкельсона. В одном из плеч отражение пучка происходило от обычного плоского зеркала. В это плечо был помещен нейтральный светофильтр, ослаблявший (за два прохода) интенсивность пучка в 10 раз. В другом плече вместо зеркала был установлен отражательный (LCOS) пространственный модулятор света Holoeye PLUTO-2-NIR-015. Для формирования оптического вихря фаза световой волны, проходящей через модулятор, модулировалась по стандартному закону как $e^{im\phi}$, где

m — требуемый топологический заряд вихря. Указанный тип модулятора исходно предназначен для работы в среднем ИК-диапазоне, поэтому слой ЖК в нем весьма толстый и в красном излучении можно получать вихри с зарядом $m = 6$ и даже больше.

В первоначальной версии установки интерферометр был съюстирован «на нулевую полосу», так что пучки из обоих плеч после светоделительного куба распространялись строго соосно. Они фокусировались линзой. За фокальной плоскостью линзы размещался цифровой фотоаппарат, который фиксировал распределение излучения.

На рисунке 2 показаны результаты эксперимента для соосной интерференции гауссова пучка и скалярного вихря с $m = 2, 4$ и 6 . Анализ полученных изображений мешает фоновая засветка. Происхождение ее очевидно. Вблизи точки сингулярности, т. е. в центре исходного вихря, его интенсивность стремится к нулю, и мы наблюдаем излучение, пришедшее из плеча интерферометра с обычным плоским зеркалом. На периферии — наоборот, интенсивность вихревого пучка на порядок выше интенсивности гауссова пучка, что тоже создает фон. Для прояснения ситуации «сырые» картины интерференции, представленные на рисунке 2 в верхнем ряду, были подвергнуты цифровой обработке, а именно из них был удален фоновый пьедестал, т. е. значение интенсивности в каждом пикселе фотографии было уменьшено на одну и ту же величину.

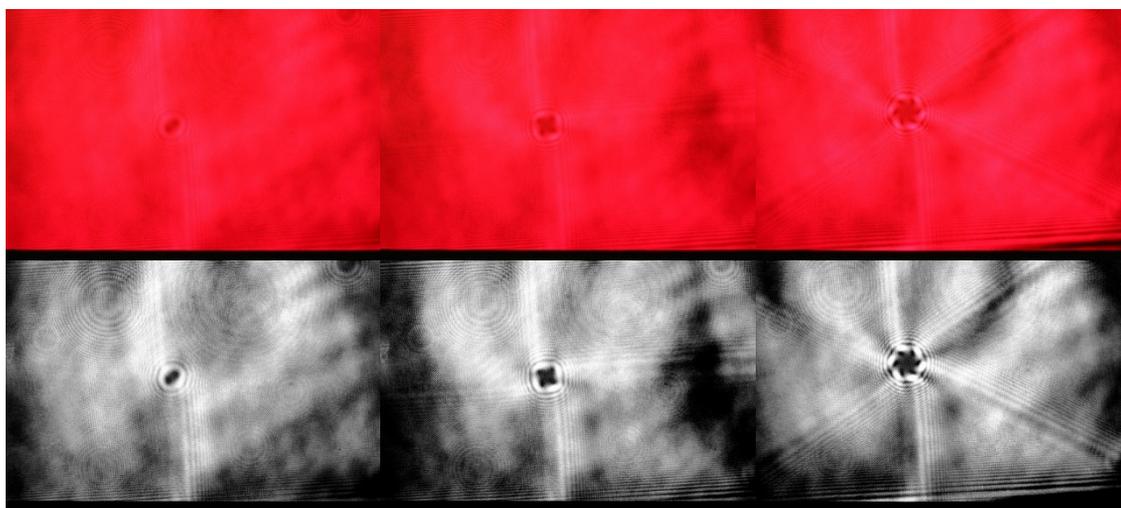


Рис. 2. Слева направо — результат соосной интерференции гауссова пучка и скалярного вихря с $m = 2, 4$ и 6 . Верхний ряд — «сырые» изображения, нижний ряд — те же изображения после цифровой обработки (вычитания «пьедестала»)

Результаты цифровой обработки показаны на рисунке 2 в нижнем ряду. Как и следовало ожидать, полученные картины можно трактовать и как картины интерференции одного вихря высокого порядка с гауссовым пучком, и как картину интерференции нескольких вихрей первого порядка с тем же гауссовым пучком.

Следующим шагом были попытки подтвердить формирование нескольких вихрей с помощью стандартных методов, но эти попытки не увенчались успехом.

Сначала мы попытались зарегистрировать картину интерференции полученного составного пучка с еще одним когерентным ему гауссовым пучком в ожидании увидеть характерные «вилочки», наблюдаемые при интерференции скалярного вихря с плоской волной или гауссовым пучком. Однако картина интерференции трех пучков содержала сложную сеть расщеплений интерференционных полос, которая также не поддавалась однозначной интерпретации.

Не увенчалась успехом и попытка диафрагмировать составной пучок в надежде выделить один из нескольких вихрей с $m = 1$. Мощная фоновая засветка дифрагировала на краях диафрагмы и также не позволяла достичь успеха.

Решение проблемы подсказали особенности конструкции модулятора Holoeye PLUTO-2-NIR-015. Основное назначение данного устройства — управление световыми пучками в ближнем ИК-диапазоне. Большая длина волны излучения диктует необходимость применения в модуляторе слоя жидкого кристалла много больше того, который используется в аналогичных устройствах для работы с видимым излучением. Мы же, вслед за рядом других авторов, использовали последнее обстоятельство для генерации вихрей с большим топологическим зарядом.

Как известно, жидкокристаллические пространственные модуляторы света представляют собой многослойные сэндвичеобразные устройства. С внешней стороны они ограничены выходным окном. Разумеется, во избежание паразитных бликов, внешняя поверхность такого окна несет просветляющее покрытие. С учетом того, что тот модулятор, с которым мы работали, предназначен для ИК-диапазона, резонно предположить, что в видимом диапазоне выходная поверхность окна должна давать блик в виде плоской волны с интенсивностью в несколько процентов от интенсивности падающего излучения. Это позволило нам предположить, что при генерации оптического вихря на длине волны He-Ne лазера $0,63 \mu\text{m}$ в таком модуляторе искомая составная волна формируется автоматически как суперпозиция оптического вихря и соосного ему блика от выходной поверхности модулятора — без всякого второго гауссова пучка.

Для проверки этой гипотезы установка (Рис. 1) была изменена. Ослабитель 4 был убран, а зеркало 5 немного наклонено с тем, чтобы наблюдать на выходе обычную картину интерференции двух пучков. В этих экспериментах для простоты анализа использовались только вихри с зарядом $m = 2$.

Результаты эксперимента показаны на рисунке 3. Оказалось, что они нестабильны. При небольшом изменении взаимного наклона интерферирующих пучков, при переюстировке схемы или просто с течением времени картина интерференции плавно менялась от характерной для вихря с $m = 2$ «трезубой» вилки до двух «двузубых», характерных для двух вихрей с $m = 1$, проходя при этом и через промежуточные варианты с несколькими точками дислокаций волнового фронта.

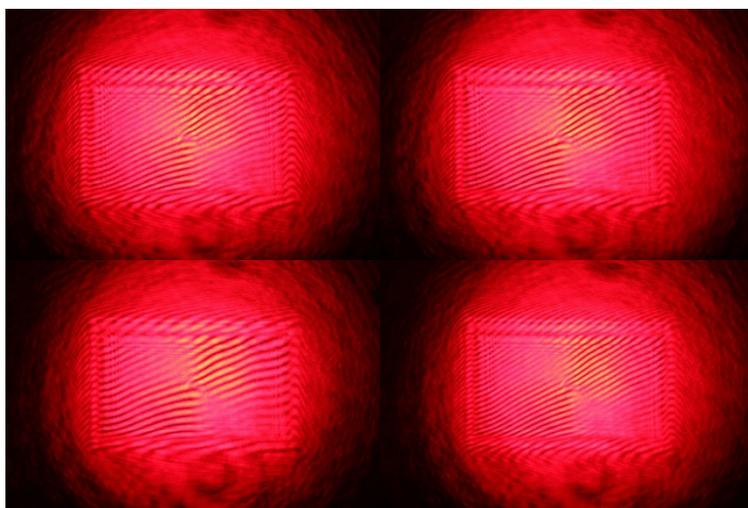


Рис. 3. Картина интерференции оптического вихря с $m = 2$, сформированного в непросветленном модуляторе, с гауссовым пучком

Для исключения каких-либо инструментальных ошибок был проведен контрольный эксперимент. В той же схеме и с применением того же модулятора для формирования оптического вихря с $m = 2$ вместо рассмотренной ранее схемы управляемой фазовой пластины была использована компьютерно-синтезированная голограмма «трезубой» вилки. Модулятор в этом случае был наклонен таким образом, чтобы с гауссовым пучком интерферировала бы волна, продифрагировавшая на голограмме в первый порядок. В этом случае, очевидно, блик от выходной поверхности модулятора, вместе с нулевым порядком дифракции, в интерференции на фотоаппарате не участвует.

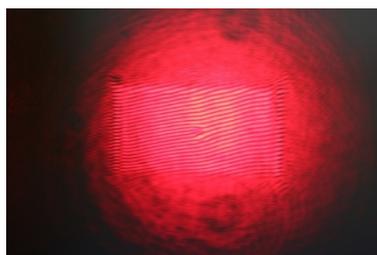


Рис. 4. Картина интерференции гауссова пучка и оптического вихря, порожденного тонкой голограммой

Результат этого эксперимента показан на рисунке 4. Как и следовало ожидать, независимо от взаимного наклона пучков и других изменений, в данном случае картина интерференции во всех реализациях стабильно соответствовала «трезубой» вилке.

Таким образом, в данном эксперименте нами продемонстрирована неустойчивость вихря с $m > 2$ в случае его соосной интерференции с маломощным гауссовым пучком. Кроме того, подтверждено существование потенциальных проблем [4], связанных с использованием «толстых» ЖК модуляторов, предназначенных для ИК излучения, для формирования фазовых вихрей в режиме динамической фазовой пластины.

На следующем этапе планируется пересобрать экспериментальную установку в помещении, позволяющем осуществить распространение вихревых пучков на большое (десятки метров) расстояние, что, вероятно, позволит избавиться от проблем с фоновой засветкой. Интерес представляет также проведение аналогичного эксперимента с модулятором, оптимизированным для видимого диапазона.

Благодарность

Авторы признательны В. П. Лукину за содействие в проведении эксперимента.

Список источников

- [1] **Rubinsztein-Dunlop, H.** Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur // *Journal of Optics*. — 2017. — Vol. 19(1). — P. 013001. — DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [2] **Bliokh, K. Y** Roadmap on structured waves / K. Y Bliokh, K. Ebrahim, M. Padgett, M. Alonso // *Journal of Optics*. — 2023. — Vol. 25(10). — DOI: 10.1088/2040-8986/acea92.
- [3] **Розанов, Н. Н.** Неустойчивость оптических фазовых и поляризационных сингулярностей высших порядков в одно-родной линейной среде/ Н. Н. Розанов // *Квантовая электроника*. — 2023. — № 53:1. — С. 66–68
- [4] **Лукин, В. П.** Частное сообщение.

Проблемы голографического телевидения и 3D-дополненной реальности

С. А. Шойдин¹, А. Л. Пазоев¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Статья посвящена анализу основных проблем голографического 3D-телевидения, включая вопросы восприятия человеком объема, ряда имманентно присущих голограммам 3D-изображений ограничений, психологического восприятия неточных копий человеческого изображения (Зловещая долина) и ограничений, обусловленных пропускной способностью канала связи. На невозможность реализации эффективного классического энтропийного сжатия голографической информации, по аналогии со сжатием JPEG, указывают публикации его правообладателя — группы PLENO. Решение, позволившее осуществить необходимое сжатие, лежит в самой структуре голограммы, что позволило решить проблему передачи голографической информации, обладающей непрерывным параллаксом при пространственном разрешении восстановленного изображения стандарта Full HD. К серьезным ограничениям в последнее время следует отнести также и сверхожидание голографического телевидения, что порождает фейковые новости о его появлении, затрудняющие организацию работ по его созданию.

Ключевые слова: Компьютерная голограмма, Голографическое телевидение, Непрерывная окклюзия

Развитию голографического телевидения сегодня мешают две проблемы — большое желание увидеть голографическое видео и в то же время — законы природы, запрещающие это сделать на принципах двумерного видео, когда 2D-голографические кадры сменяются с частотой кадровой развертки. Первая проблема — большое желание увидеть динамическое голографическое изображение, парящее в воздухе, приводит к появлению большого количества подделок, не имеющих отношения к голографии, но ложно называемых голографическими, что мешает нормальной организации работ. Вторая проблема голографического телевидения — это присущее голограммам противоречие между огромным количеством информации, содержащейся в них, и ограничениями доступного человечеству радиодиапазона.

Такое противоречие приводит к пониманию, что «в лоб», напрямую, создать голографическое телевидение просто невозможно. Так, для голографического кадра, размером A4 (210×297 мм), при $\lambda = 0,63$ мкм и максимальном относительном отверстии $\omega = 1$ количество точек в одном кадре, площадью S_h , достигает $n = S_h \cdot (\omega / \lambda)^2 \approx 1,6 \cdot 10^{11}$, что при бинарной записи равно $N = 18$ Гб и эквивалентно информации, содержащейся в полуторачасовом кинофильме стандарта Full HD (диск Blu-Ray). Однако каждая из этих точек несет в себе « m » значений яркости. При реальном количестве градаций яркости (глубина цвета $m = 256$ в стандарте TrueColor), информационная емкость возрастает до $N = 3 \cdot 146$ Гб = 438 Гб (RGB). Передача таких массивов с частотой кадровой развертки 25 Гц требует пропускной способности канала $C \approx 11 \cdot 10^{12}$ Б/с. Ширина полосы пропускания при этом составит более 1400 ГГц — это перекрывает весь доступный человечеству радиодиапазон.

Бесперспективность энтропийного кодирования для сжатия голограмм демонстрируют уже 20-летние усилия множества разработчиков, что видно в обзорах группы PLENO, правообладателя сжатия JPEG [1]. Необходимость более глубокого изучения структуры голограммы для поиска путей исключения избыточной информации была отмечена еще одним из основателей голографии, Ю. Н. Денисюком. Он так и назвал одну из своих работ: «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта?» [2].

Задача, поставленная еще Ю. Н. Денисюком, по определению актуальной области исследований по «воспроизведению процесса движения голографических изображений», «разработке методов устранения избыточности информации, т. е. к исключению из голографического изображения той информации, которая не используется при зрительном восприятии» много лет не решалась методами энтропийного сжатия. Показано решение этой задачи методами синтеза голограммы в рамках технологии структурированного света, создающего дифракционную решетку, близкую к радиоголограмме с дальнейшим преобразованием в классическую голограмму.

Ряд исследований [3–11] позволил найти решение, заключающееся в разделении голографической структуры на две группы гармоник — несущую пространственную частоту и ее девиацию. Такой подход позволил выделить структуры, несущие информацию о 3D-объекте голографирования и передавать по каналу связи только информацию о них, без несущей. Дальнейшее развитие метода позволило перейти к передаче 3D-информации двумя основными модальностями 3D-изображения — текстурой поверхности и картой глубин, что является шагом на пути представления 3D-изображения в виде суммы его основных мод. Попутно были отмечены новые направления иссле-

дований, включая новое понимание абберационных искажений для 3D-изображения, ряд ограничивающих эффектов, как эффект спекл-резонанса, формфактора голограмм и алиасинга голограмм 3D-объектов. Были получены и некоторые результаты, показывающие тесное взаимодействие теории информации и дифракционных основ голографии. В результате проведенных исследований, впервые был передан по обычному радиоканалу голографический видеофильм из 291 3D- кадра [9] с разрешением, превышающим стандарт Full HD и частотой кадровой развертки 27,91 кадров/сек. Отдельные, произвольно взятые кадры, этого видео были реализованы, как пример технологической возможности их материализации, как в технологии радужных голограмм [6], так и в технологии Dot Matrix [8].

Переданная по радиоканалу 3D-голографическая информация была оценена как качественная, лишенная эффекта «Зловещей долины» [12].

Благодарность

Авторы выражают благодарность С. Б. Одинокovu и И. С. Гибину за поддержку основных направлений и результатов работы, И. К. Цыганову, Е. А. Дроздовой, А. Ф. Смыку, А. В. Шурыгину за помощь в записи голограмм, В. П. Бессмельцеву за измерения их микрохарактеристик, А. Ю. Мешалкину за организацию работ по исследованию влияния формфактора при разработке новых голографических материалов.

Список источников

- [1] **Muhamad, R. K.** JPEG Pleno holography: scope and technology validation procedures / R. K. Muhamad, T. Birnbaum, A. Gilles, et.al. // *Applied Optics*. — 2021. — Vol. 60. — № 3. — P. 641–651. — DOI: 10.1364/AO.404305.
- [2] **Денисюк, Ю. Н.** Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? // *Журнал технической физики*. — 1991. — Т. 61. — № 8. — С. 149–161.
- [3] **Шойдин, С. А.** Синтез голограмм на приемном конце канала связи с объектом голографирования // *Компьютерная оптика*. — 2020. — Т. 44. — № 4. — С. 547–551. — DOI: 10.18287/2412-6179-СО-694
- [4] **Шойдин, С. А.** Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // *Автометрия*. — 2021. — Т. 57. — № 1. — С. 92–102. — DOI: 10.15372/AUT20210110.
- [5] **Shoydin, S. A.** Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev // *Photonics*. — Vol. 8. — № 10. — P. 448–471. — DOI: 10.3390/photonics8100448. 381.
- [6] **Shoydin, S. A.** Recording a Hologram Transmitted over a Communication Channel on One Sideband / S. A. Shoydin, S. B. Odinokov, A. L. Pazoev, et.al // *Appl. Sciences*. — 2021. — Vol. 11. — № 23. — P. 11468, 2021. — DOI: 10.3390/app112311468.
- [7] **Шойдин, С. А.** Сжатие 3D-голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // *Оптический журнал*. — 2022. — Т. 89. — № 3. — С. 79–88. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-79-88.
- [8] **Шойдин С. А.** Синтезированные на приемном конце канала связи голограммы 3D объекта в технологии Dot Matrix / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, А. Ф. Смык, А. В., et.al // *Компьютерная оптика*. — 2022. — Т. 46. — № 2. — С. 204–213. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1037.
- [9] **Пазоев А. Л.** Передача 3D-голографической информации по радиоканалу методом, близким SSB / А. Л. Пазоев, С. А. Шойдин // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2023. — С. 132–134. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27.
- [10] **Патент № 2707582 С1 РФ.** Научное изобретение / Шойдин С. А. — Опубл. 28.11.2019.
- [11] **Шойдин, С. А.** Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удаленного воспроизведения динамических объемных изображений. Авт. дисс. д-р физ.-мат. наук. ИАиЭ СО РАН, 2023.
- [12] **Shoydin, S. A.** «Uncanny valley» effect in holographic image transmission / S. A. Shoydin, A. L. Pazoev. // *Journal of the Belarusian State University “Physics”*. — 2022. — № 3. — P. 4–9. DOI: 10.33581/2520-2243-2022-3-4-9.

Problems of holographic television and 3D augmented reality

S. A. Shoydin¹, A. L. Pazoev¹

¹ Siberian State University Geosystem and Technologies, Novosibirsk, Russia

The article is devoted to the analysis of the main problems of holographic 3D television, including issues of human perception of volume, a number of limitations inherent in holograms of 3D images, psychological perception of inaccurate copies of the human image (Uncanny Valley) and limitations caused by the bandwidth of the communication channel. The impossibility of implementing effective classical entropy compression of holographic information, similar to JPEG compression, is indicated by publications of its copyright holder, the PLENO group. The solution that made it possible to carry out the necessary compression lies in the structure of the hologram itself, which made it possible to solve the problem of transmitting holographic information with continuous parallax at the spatial resolution of the restored image of the Full HD standard. Serious restrictions in recent times also include the over-expectation of holographic television, which gives rise to fake news about its appearance, making it difficult to organize work on its creation.

Keywords: Computer hologram, Holographic television, Continuous occlusion

Мощные терагерцовые вихревые бесселевы пучки, сформированные аксиконами с бинарным и кусочно-непрерывным рельефами на Новосибирском ЛСЭ

Н. Д. Осинцева¹, М. С. Комленок², В. С. Павельев^{3,4}, В. В. Герасимов^{1,5}, Ю. Ю. Чопорова¹, К. Н. Тукмаков³, Б. А. Князев⁶

¹ Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

³ Самарский университет, Самара, Россия

⁴ Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

⁵ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁶ Без аффилиации

В работе представлены результаты формирования вихревых бесселевых пучков с топологическим зарядом l , принимающим значения 1–4, 9, с помощью спиральных бинарных кремниевых дифракционных аксиконов, а также пучка с топологическим зарядом $l = 9$, сформированного с помощью алмазного аксикона с кусочно-непрерывным по азимуту фазовым рельефом. Профиль интенсивности полученных пучков близок к идеальным бесселевым пучкам, однако интенсивность внутри колец обладает периодической модуляцией по азимуту с частотой l и $2l$ для аксиконов с бинарным и кусочно-непрерывным рельефами, соответственно. Варьирование параметров численного моделирования и сравнение результатов с экспериментальными данными позволяют предположить, что основными факторами, объясняющими этот эффект, являются отстройка от рабочей длины волны и погрешность изготовления элементов.

Ключевые слова: Бесселевы пучки, Дифракционные аксиконы, Терагерцовое излучение, Лазер на свободных электронах

Введение

Вихри — распространенное явление в природе, встречающееся повсюду: от квантовых вихрей в жидком азоте до океанических течений, тайфунов и спиралевидных галактических структур. Они проявляются не только в макромире, но и в структурированных электромагнитных и оптических полях. В 1989 г. Couillet и др. [1] положили начало исследованиям оптических вихрей, или вихревых пучков. С тех пор прошло больше трех десятилетий развития этого направления. В первые 10 лет (1989–1999) исследования оптических вихрей были сосредоточены на создании фундаментальных теорий и изучении ключевых физических явлений, что заложило основу для дальнейшего изучения взаимодействия света с материей, топологических структур и квантовой природы света. В последующем десятилетии с развитием возможности управления орбитальным угловым моментом (ОУМ) пучков появились и новые области их применения, такие как: квантовая физика [2]; оптический пинцет для приложений биологии [3]; астрофизика [4]; микроскопия [5]; оптическая связь [6] и др. В последние годы в применениях вихревых пучков произошел значительный прорыв: в диагностике топологического заряда l пучка, формировании пучков с зарядом вплоть до несколько тысяч (в работе [7] был получен пучок с $l = 10010$), передаче данных с терабитной скоростью посредством мультиплексирования ОУМ как в свободном пространстве [8], так и в оптоволокне [9]. Эти пучки активно изучаются и используются в видимом, инфракрасном и радиодиапазонах, а также в акустике, например, в ультразвуковом диапазоне. Самая последняя область электромагнитного спектра, в которой были созданы пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ), — это терагерцовый (ТГц) диапазон.

Впервые мощные вихревые бесселевы пучки ТГц диапазона были получены на Новосибирском лазере на свободных электронах (НЛСЭ) [10]. В данной работе будут представлены экспериментальные и расчетные результаты исследования вихревых бесселевых пучков в свободном пространстве. Работа посвящена исследованию поведения профиля интенсивности полученных пучков при варьировании параметров пучка в численном моделировании и сравнение результатов с экспериментальными данными с учетом микроскопии и профилометрии рельефа аксиконов.

Результаты

Существуют различные способы формирования бесселевых пучков (БП), однако не все они подходят для работы с мощным ТГц излучением НЛСЭ. В данной работе вихревые бесселевы пучки формировались при трансформировании гауссова пучка с $\lambda = 141$ мкм в результате прохождения через дифракционный оптический элемент (ДОЭ). Использованные ДОЭ отличаются видом рельефа: бинарный и кусочно-непрерывный. Бинарные элементы являются комбинацией спиральной фазовой пластинки и аксикона. Бинарные аксиконы (БА) изготовлены из кремниевой (HRFZ-Si) подложки

методом реактивно-ионного травления. HRFZ-Si обладает широкой полосой пропускания, высокой лучевой стойкостью и позволяет работать с мощными пучками терагерцового излучения. Второй вид аксиконов состоит из секторов, фаза которых меняется от 0 до 2π , а рельеф кусочно-непрерывен по азимуту, однако является бинарным по радиусу. Для изготовления данного элемента применялась методика лазерной абляции; в качестве подложки использовался синтетический алмаз.

В исследованиях профиля интенсивности вихревых БП были замечены периодические вариации вдоль периметра колец [11, 12]. В пучках, сформированных бинарными аксиконами, количество вариаций равно $2l$ в численном моделировании (рис. 1а) и 1 в экспериментальных данных (рис. 1в). Видно также, что вариация интенсивности внутри колец в эксперименте выше, чем в моделировании. Поскольку в расчетах используется та же фазовая маска, что и в эксперименте, а также учитываются особенности входного пучка, исследовались параметры, которые не были приняты во внимание, такие как: погрешности в изготовлении элементов и отклонение от расчетной длины волны.

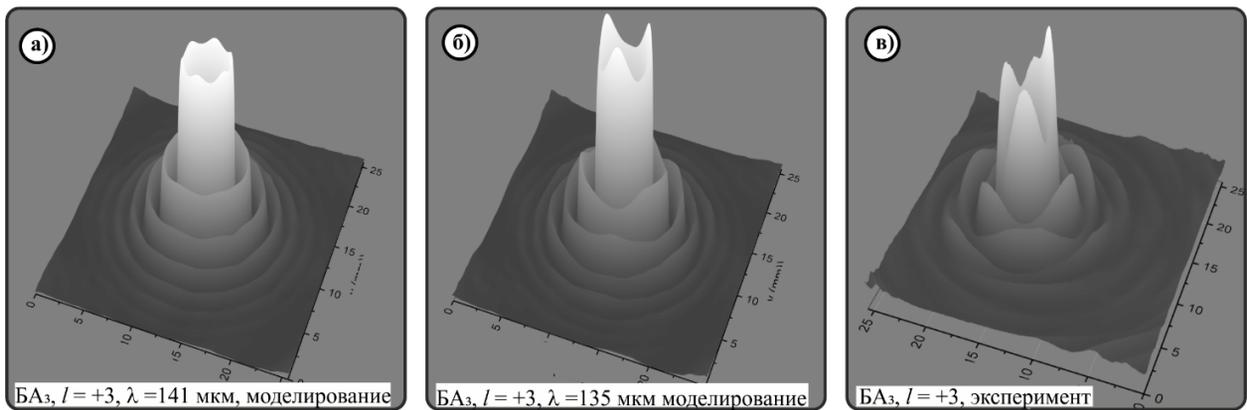


Рис. 1. Численное моделирование бesselевых пучков, сформированных бинарными аксиконами BA_{3-2} , освещаемых гауссовым пучком с радиусом 12,1 мм на длинах волн 141 (а) и 135 мкм (б). Аксиконы изготовлены для длины волны 141 мкм: в) изображение экспериментально сформированного бesselева пучка

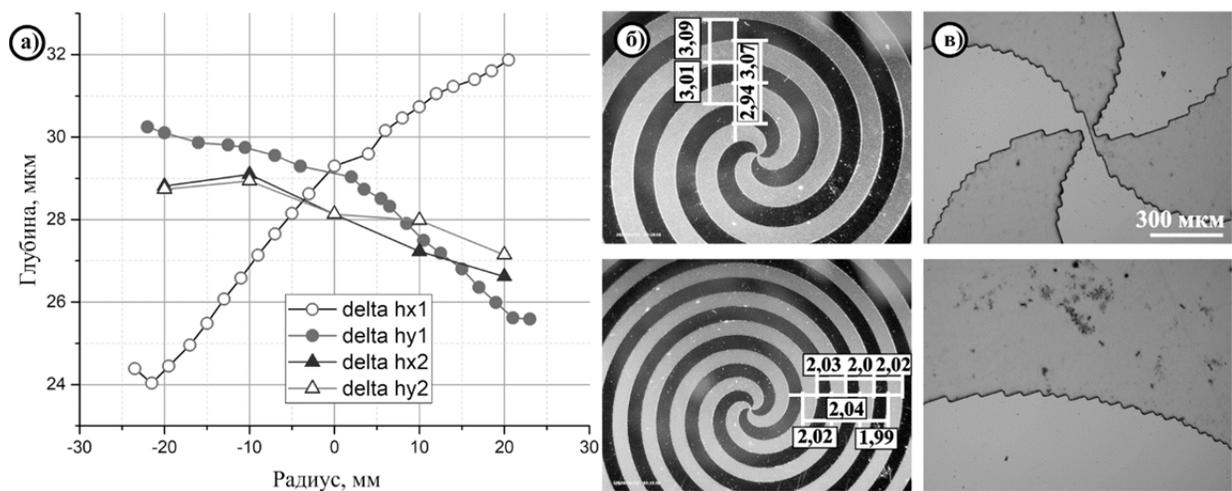


Рис. 2. а) график зависимости глубины рельефа бинарных аксиконов вдоль двух перпендикулярных диаметров: круги – BA_9 ; треугольники – BA_{3-2} ; б) примеры измеренных периодов бинарных аксиконов BA_3 и BA_{3-2} ; в) увеличенное изображение рельефа аксиконов BA_{3-2}

От качества рельефа изготовленных элементов зависит профиль интенсивности сформированного пучка. Вариация заданного периода и скважности рельефа могут способствовать появлению отклонений от некоторой идеальной ситуации. Измерения проводились для аксиконов с $l=3$, $p=3,03$ мм – BA_3 , $l=3$, $p=2,02$ мм – BA_{3-2} , $l=9$, $p=2,02$ мм – BA_9 , где l – топологический заряд БП, p – период БА. Глубина рельефа была измерена вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров. Результаты измерений для аксиконов BA_9 и BA_{3-2} приведены на рис. 2а. Разброс значений измеренной глубины составил ± 1 и ± 4 мкм, соответственно, что составляет 3–10 % от среднего значения.

Вариация периода аксионов составила примерно 1–3 %. Отклонение от плоскостности кремниевой пластинки по всей площади составила ≈ 5 мкм. Однако оно не локализовано и не вносит значительной ошибки. При большем увеличении на рис. 2в заметна ступенчатость границ зон рельефа, которая также может сказываться на распределении интенсивности формируемых БП.

Излучение НЛСЭ обладает долговременной нестабильностью, и длина волны может меняться в течение нескольких часов работы установки. Для того чтобы понять, могут ли наблюдаемые отклонения вызвать вариацию интенсивности внутри колец пучков, мы рассчитали распределение интенсивности пучков при длине волны 135 мкм (рис. 1б), т. е. при сдвиге от расчетной длины волны на 4 %. На рис. 1 видно, что результаты расчета, включая количество колебаний вдоль периметра кольца, теперь хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Профиль алмазного аксиона нами не измерялся, но можно предположить, что в данном случае азимутальная вариация интенсивности также вызвана несоответствием используемой длины волны расчетному значению и локальными ошибками изготовления профиля.

Заключение

В работе выявлено влияние технологических погрешностей изготовления микрорельефа и отстройки рабочей длины волны на работу ДОЭ, формирующего вихревые бесселевы пучки терагерцового излучения. Отклонение данных параметров от расчетных приводит к возникновению азимутальных вариаций в поперечном сечении распределения интенсивности бесселевых пучков. В дальнейшем необходимо детальное изучение связи возникающих вариаций с характеристиками излучения и микрорельефа ДОЭ. При этом опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод о необходимости контроля точности изготовления ДОЭ и стабильности рабочей длины волны излучения в соответствии со спецификой конкретного применения. Однако, например, для области оптической связи измеренная азимутальная вариация сказывается несущественно на идентификацию бесселевой моды при демультимплексировании каналов связи. Это, в свою очередь, может снизить требования к изготовлению элементов для телекоммуникационных систем.

Благодарность

В работе использовалось оборудование Центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» на базе уникальной установки «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН.

Список источников

- [1] **Coulet, P.** Optical vortices / P. Coulet, L. Gil, F. Rocca // *Optics Communications*. — 1989. — Vol. 73. — № 5. — P. 403–408. — DOI: 10.1016/0030-4018(89)90180-6.
- [2] **Molina-Terriza, G.** Twisted photons / G. Molina-Terriza, J. P. Torres, L. Torner // *Nature physics*. — 2007. — Vol. 3. — № 5. — P. 305–310. — DOI: 10.1038/nphys607.
- [3] **Grier, D. G.** A revolution in optical manipulation / D. G. Grier // *Nature*. — 2003. — Т. 424. — № 6950. — С. 810–816. — DOI: 10.1038/nature01935.
- [4] **Harwit, M.** Photon Orbital Angular Momentum in Astrophysics / M. Harwit // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — Vol. 597. — № 2. — P. 1266–1270. — DOI: 10.1086/378623.
- [5] **Fürhapter, S.** Spiral phase contrast imaging in microscopy / S. Fürhapter, A. Jesacher, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Optics Express*. — 2005. — Vol. 13. — № 3. — P. 689. — DOI: 10.1364/OPEX.13.000689.
- [6] **Tamburini, F.** Overcoming the Rayleigh Criterion Limit with Optical Vortices / F. Tamburini, G. Anzolin, G. Umbrico, A. Bianchini, C. Barbieri // *Physical Review Letters*. — 2006. — Vol. 97. — № 16. — P. 163903. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.163903. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.97.163903.
- [7] **Fickler, R.** Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 / R. Fickler, G. Campbell, B. Buchler, P. Lam, A. Zeilinger // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 2016. — Vol. 113. — № 48. — P. 13642–13647. — DOI: 10.1073/pnas.1616889113.
- [8] **Wang, J.** Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. Willner. // *Nature Photonics*. — 2012. — Vol. 6. — № 7. — P. 488–496. — DOI: 10.1038/nphoton.2012.138.
- [9] **Bozinovic, N.** Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. Willner, S. Ramachandran // *Science*. — 2013. — Vol. 340. — № 6140. — P. 1545–1548. — DOI: 10.1126/science.1237861.
- [10] **Knyazev, B.** Generation of Terahertz Surface Plasmon Polaritons Using Nondiffractive Bessel Beams with Orbital Angular Momentum / B. Knyazev, Yu. Choporova, M. Mitkov, V. Pavelyev, B. Volodkin // *Physical Review Letters*. — 2015. — Vol. 115. — № 16. — P. 163901. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.163901.

- [11] **Osintseva, N.** Terahertz Bessel and «perfect» vortex beams generated with a binary axicon and axicon with continuous relief / N. D. Osintseva, V. V. Gerasimov, B. A. Knyazev, M. Komlenok, V. Pavelyev, D. Yablokov // *Computer Optics*. — 2022. — Vol. 46. — № 3. — P. 375–380. — DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1066.
- [12] **Knyazev, B.** Terahertz Bessel Beams Formed by Binary and Holographic Axicons / B. Knyazev, N. Osintseva, M. Komlenok, V. Pavelyev, V. Gerasimov, O. Kameshkov, Y. Choporova K. Tukmakov // *Photonics*. — 2023. — Vol. 10. — № 6. — P. 700. — DOI: 10.3390/photonics10060700.

High - power terahertz vortex Bessel beams formed by axicons with binary and piecewise - continuous reliefs at the NovoFEL

N. D. Osintseva¹, M. S. Komlenok², V. S. Pavelyev^{3,4}, V. V. Gerasimov^{1,5}, Yu. Yu. Choporova¹, K. N. Tukmakov³, B. A. Knyazev⁶

¹ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia

³ Samara National Research University, Samara, Russia

⁴ Image Processing Systems Institute, NRC “Kurchatov Institute”, Samara, Russia

⁵ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁶ Without affiliation

Vortex Bessel beams formed by diffractive binary spiral silicon axicons (topological charge $l = 1-4, 9$) and diamond one with piecewise-continuous relief ($l = 9$) were studied. A cross section of the beams is close to ideal ones except for the circular variation of intensity with a cycle equal to l and $2l$ for the axicons with binary and piecewise-continuous reliefs, respectively. By adjusting the numerical simulation's parameters and contrasting the outcomes with experimental data, it was possible to conclude that the manufacturing inaccuracies of the elements and the operating wavelength's detuning were the primary causes of this effect. The findings of this study make it possible to define quality standards for axicon production and its proper selection in accordance with beam specifications.

Keywords: Bessel beams, Diffractive axicons, Terahertz radiation, Free-electron laser

Регулируемый оптический изолятор на основе эффекта Фарадея

Д. А. Козодаев¹, А. О. Погоньшев¹, Н. С. Пщелко², О. С. Пщелко², М. А. Трусов¹

¹ ООО «АКТИВНАЯ ФОТОНИКА», Зеленоград, Россия

² Военная академия связи им. С. М. Буденного, Санкт-Петербург, Россия

Показана актуальность разработки устройств для оптической изоляции. Данные устройства позволяют избежать вредного влияния отраженного оптического сигнала на лазерные диоды, таким образом существенно уменьшив шумы и повысив стабильность работы лазерных источников излучения на их основе. Разработана и экспериментально опробована относительно простая в изготовлении конструкция оптического изолятора на эффекте Фарадея. В предлагаемой конструкции предусмотрена возможность плавной регулировки магнитного поля за счет изменения расстояния между магнитами, формирующими поле. Это позволяет подобрать необходимую величину магнитного поля, поворачивающую плоскость поляризации света при прохождении через изолятор точно на 45°. Кроме того, в конструкции предусмотрена регулировка угла между оптическими осями поляризаторов. Указанное позволяет достичь высокой степени оптической изоляции.

Ключевые слова: Оптика, Лазеры, Эффект Фарадея, Оптический изолятор, Степень оптической изоляции, Регулировка магнитного поля

Введение

При использовании лазерных диодов в качестве источников лазерного излучения в реальных технических системах неизбежно наблюдается отраженный сигнал той или иной интенсивности в зависимости от конкретных особенностей системы. Уже достаточно давно обнаружено вредное воздействие отраженного сигнала, ведущее к возникновению оптической обратной связи: в лазерных осцилляторах, в частности, в диодах, возникает усиление стимулированного излучения, частотная нестабильность колебаний, релаксация колебаний и другие нежелательные явления [1]. В ряде случаев это не только приводит к ухудшению параметров системы, но и может вывести из строя ее элементы, включая сам лазерный диод.

В связи с развитием лазерных технологий в настоящее время создаются все более чувствительные оптические устройства, требующие тщательной юстировки и высокостабильной работы источника излучения. Это делает особенно актуальной необходимость в защите лазерных систем от влияния эффектов обратной связи. Для решения данной задачи предложены так называемые оптические изоляторы различных конструкций [2]. По ряду соображений считается, что в настоящее время наиболее эффективными в рассматриваемом аспекте являются оптические изоляторы Фарадея [3]. Функция этого оптического элемента заключается в том, что он полностью пропускает свет, распространяющийся в одном направлении, и подавляет любое отраженное излучение, распространяющееся в противоположном. Таким образом, как показывают эксперименты, использование оптического изолятора существенно уменьшает шумы, повышает стабильность работы источника лазерного излучения в целом, а также устраняет другие вредные эффекты оптической обратной связи.

Следует отметить, что в настоящее время изоляторы Фарадея достаточно дорогостоящие устройства, выпускаемые лишь небольшим количеством зарубежных фирм. Выпускаемые в настоящее время изоляторы имеют степень оптической изоляции на уровне 30–35 дБ [4]. Поэтому первой целью настоящей работы является самостоятельная разработка конструкции изолятора Фарадея, пригодной, с учетом различных технологических и финансовых ограничений, для местного производства. Второй целью работы является повышение степени оптической изоляции за счет разработки системы плавной регулировки изолятора путем подстройки необходимой индукции магнитного поля.

Принцип работы и особенности разработанного изолятора Фарадея

Конструкция разработанного оптического изолятора приведена на рис. 1.

Предлагаемый оптический изолятор Фарадея состоит из входного поляризатора 1, собственно вращателя Фарадея — магниточувствительного вещества 7, находящегося в сильном магнитном поле, создаваемом основным магнитом 3 и выходного поляризатора (анализатора) 5. Оси поляризаторов 1 и 5 ориентированы относительно друг друга на 45°. Ось первого поляризатора 1 вертикальна, а ось второго поляризатора 5 — повернута на 45°. После прохождения луча вдоль горизонтальной

оси $O-OI$ через оптические окна 8 и 6 через входной (первый) поляризатор 1 луч света будет линейно поляризован вдоль вертикальной оси. Затем луч попадает во вращатель Фарадея, при этом плоскость поляризации поворачивается на 45° относительно вертикали, и свет беспрепятственно проходит через выходной (второй) поляризатор — анализатор 5. Отраженный свет будет распространяться в обратном направлении. Так как направление поворота плоскости поляризации света в эффекте Фарадея не зависит от направления распространения света [5], вращатель Фарадея повернет плоскость поляризации дополнительно на 45° в ту же сторону. Таким образом, в первый поляризатор 1 свет попадет поляризованным вдоль оси 90° , т. е. поляризованным горизонтально и, в соответствии с законом Малюса, дальше распространяться не будет.

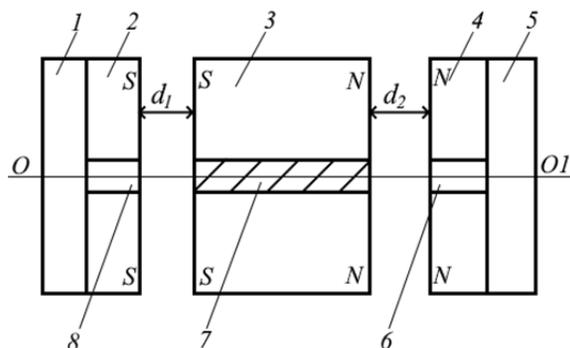


Рис. 1. Оптический изолятор Фарадея с кристаллическим магнитооптическим ротатором для лазеров: 1 — входной поляризатор; 2, 4 — регулировочные магниты; 3 — основной магнит; 5 — выходной поляризатор; 6, 8 — оптические окна; 7 — магниточувствительное вещество

Магнитные поля внутри отверстия, использующегося для прохождения луча в магните, и вне магнита направлены в разные стороны. Особенностью нашей конструкции является предусмотренная в ней возможность изменять расстояния d_1 и d_2 . Поэтому, приближая регулировочные магниты 2 и 4 к основному магниту 3 одноименными полюсами, можно усилить магнитное поле в отверстии, где находится магнитооптический стержень, и поэтому добиться необходимого угла поворота плоскости поляризации (45°) при относительно небольшой длине стержня.

Заключение

Предварительные измерения показали, что использование данной конструкции при тщательной юстировке позволяет добиться высокой степени оптической изоляции (около 40 дБ для длины волны оптического излучения 785 нм). Следует также отметить, что конструкция относительно проста в изготовлении, не содержит труднодоступных радиально намагниченных магнитов. Немаловажно также и то, что, комбинируя различные комбинации магнитов и имея возможность плавной регулировки, в одном и том же корпусе возможно изготовление изоляторов для различных длин волн оптического излучения.

Список источников

- [1] Дворцов, Д. В. Одночастотные лазерные диоды с длинами волн 630–660 нм для интерференционных измерений / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Санкт-Петербург — 2017. — 181 с.
- [2] Патент № 2646551 РФ. Изолятор Фарадея с переменным направлением поля магнитной системы / Е. А. Миронов, О. В. Палашов. — Оpubл. 05.03.2018.
- [3] Патент № 2559863 РФ. Изолятор Фарадея на постоянных магнитах для лазеров большой мощности / А. В. Войтович, Е. А. Миронов, О. В. Палашов. — Оpubл. 20.08.2015.
- [4] Юрчук, Ю. Оптические изоляторы / Ю. Юрчук // Фотоника. — 2016. — №5/59. — С. 34–41.
- [5] Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг. — Учеб. пособие: для вузов. — 6-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 848 с.

Adjustable optical isolator based on the Faraday effect

D. A. Kozodaev¹, A. O. Pogonyshv¹, N. S. Pshchelko², O. S. Pshchelko², M. A. Trusov¹

¹Limited Liability Company "ACTIVE PHOTONICS", Moscow, Zelenograd, Russia

²Military Academy of Telecommunications named after S.M. Budyonny, St. Petersburg, Russia

The relevance of technical design for optical isolation devices is shown. These devices make it possible to avoid the harmful effects of the reflected optical signal on laser diodes used in radiation sources. This significantly reduces noise and increases the stability of operation of laser radiation sources based on them. A relatively easy-to-manufacture design of an optical isolator based on the Faraday effect has been developed and experimentally tested. The proposed design allows for smooth adjustment of the magnetic field by changing the distance between the magnets that form the field. This allows you to select the required magnitude of the magnetic field, which rotates the polarization plane of light when passing through the optical isolator by exactly 45°. In addition, the design provides for adjustment of the angle between the optical axes of the polarizers. This makes it possible to achieve a high degree of optical isolation.

Keywords: Optics, Lasers, Faraday effect, Optical isolator, Degree of optical isolation, Magnetic field adjustment

Моделирование процессов формирования и распространения оптических вихревых пучков, излучаемых микрокольцевыми резонаторами

В. Х. Багманов¹, Л. И. Бакирова¹, Г. С. Воронков¹, В. С. Любопытов¹

¹Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Представлены математические модели, описывающие процессы формирования и распространения оптических вихревых пучков, переносящих орбитальный угловой момент, генерируемых микрокольцевым резонатором с выводящей излучение дифракционной решеткой, образованной отверстиями на поверхности резонатора. Формирование излучения рассматривается как процесс рассеивания бегущей волны на диэлектрических неоднородностях излучающей торцевой поверхности микрокольцевого резонатора, вызванных возмущающими микроотверстиями. Математические модели позволяют установить зависимость характеристик излучения от параметров, определяющих конфигурацию излучающей системы. Проведено численное моделирование процессов с использованием среды *Ansys Lumerical*, подтверждающее адекватность полученной аналитической модели.

Ключевые слова: Оптический вихревой пучок, Микрокольцевой резонатор, Орбитальный угловой момент, Дифракция

Введение

Генерация оптических пучков, несущих орбитальный угловой момент (ОУМ) является весьма актуальной областью исследований в последние десятилетия [1]. За это время было предложено множество методов генерации — от использования оптических компонентов свободного пространства до интегральных устройств [2]. С точки зрения компактности, высокой степени интеграции компонентов и энергоэффективности интерес представляют излучатели вихревых пучков в виде микрокольцевых резонаторов (МКР) на фотонных интегральных схемах [3–4]. В работе рассмотрена математическая модель формирования и распространения оптических вихревых пучков, генерируемых МКР с дифракционной решеткой.

1. Математическая модель формирования излучения

В работе представлены математические модели, описывающие процессы формирования и распространения оптических вихревых пучков, переносящих ОУМ, генерируемых МКР с дифракционной решеткой, образованной отверстиями, перфорированными на излучающей поверхности кольца.

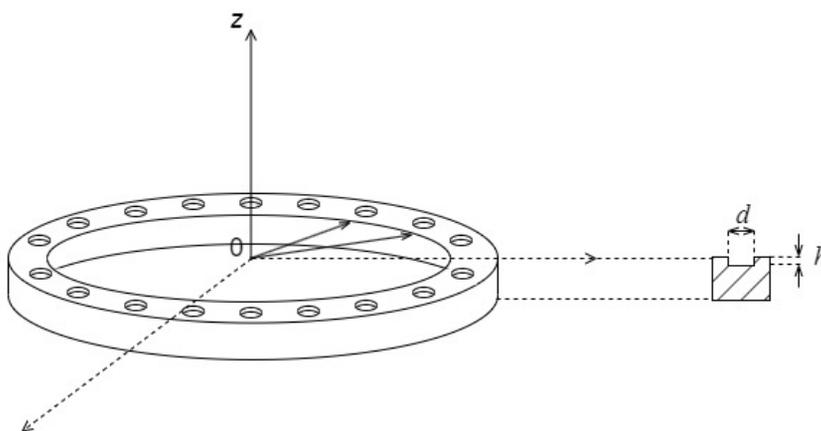


Рис. 1. Схема кольцевого резонатора с периодическими отверстиями

Физической причиной излучения МКР является рассеивание бегущей волны, распространяющейся в резонаторе на неоднородностях диэлектрической проницаемости, образованных полостями с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1$ в теле резонатора $\epsilon \neq 1$.

При диаметре отверстий d и глубине травления h , малыми по сравнению с длиной собственной резонансной волны невозмущенного резонатора λ_m , правомерно использование модели рассеяния Рэлея. Длина резонансной волны определяется соотношениями:

$$\lambda_m = \frac{2\pi R}{m}; \quad (1)$$

$$m = \frac{2\pi R n_{eff}}{\lambda}, \quad (2)$$

где R — медианный радиус МКР; n_{eff} — эффективный показатель преломления; λ — длина волны в вакууме; m — порядок резонанса.

Напряженность рассеиваемого поля определяется выражением [5]:

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{\Pi}_s, \quad (3)$$

где $\vec{\nabla}$ — оператор Гамильтона;

$$\vec{\Pi}_s(\vec{r}) = \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \int_V G(\vec{r}, \vec{r}') (\epsilon - 1) \vec{E}(\vec{r}') dV', \quad (4)$$

где $\vec{E}(\vec{r})$ — напряженность поля в неоднородности (полости); ω — частота; $\vec{\Pi}_s(\vec{r})$ — вектор Герца; $G(\vec{r}, \vec{r}')$ — функции Грина для полупространства, ограниченного плоскостью $z = 0$, проходящей через кольцевую излучающую поверхность резонатора в декартовой системе координат $\vec{r}(x, y, z)$; ϵ — диэлектрическая проницаемость материала резонатора. Интегрирование в выражении (4) производится по объему, занятому неоднородностью.

Для симметричных полостей поле однородно $E(\vec{r}) = const$ [6], $\vec{E} = \vec{E}_i \cdot f$, где f — фактор, зависящий от конфигурации полости; \vec{E}_i — поле падающей волны.

В волновой зоне при $r > \frac{d^2}{\lambda}$ рассеянное поле можно представить в виде:

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = \frac{k^2}{4\pi} \cdot f(\epsilon - 1) V \cdot \frac{\partial \vec{E}_i}{\partial n} \left[\vec{i} \times (\vec{i} \times \vec{e}_s) \right] \frac{e^{ikr}}{r}, \quad (5)$$

где \vec{i} — единичный вектор в направлении волны; \vec{e}_s — единичный вектор в направлении рассеивания; \vec{h} — вектор нормали к плоскости $z = 0$; V — объем полости; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число; r — расстояние.

2. Математическая модель пространственного распределения излучения МКР

Излучение МКР с N перфорированными отверстиями будет определяться с суммой полей индивидуальных рассеиваний. В параксиальном приближении:

$$\vec{E} = -\frac{ik^2}{4\pi z} \cdot f(\epsilon - 1) V \cdot k_z e^{-ik\left(z + \frac{R^2 + \rho^2}{2z}\right)} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{ikR\rho}{z} \cos\left(\varphi - \frac{2\pi n}{N}\right)} \cdot e^{-\frac{i2\pi mn}{N} + i2\pi g} \cdot \vec{e} E_i, \quad (6)$$

где $g = \left[\frac{2m}{N} \right]$ — целая часть числа $\frac{2m}{N}$; k_z — z компонента волнового вектора; \vec{e} — вектор поляризации.

В выражении (6) учтено, что рассеиватели возбуждаются со сдвигом фаз $\frac{2\pi m}{N}$, обусловленным распространением бегущей волны и сдвиг фаз не должен быть кратным π .

При больших значениях N сумму (6) можно приближенно заменить интегралом. В результате для поля излучения получим:

$$\vec{E}(\rho, \varphi, z) = \frac{(-i)^{l+1} k^2}{4z} \sqrt{k^2 - \frac{l^2}{R^2}} \cdot f(\varepsilon - 1) d^2 h \cdot J_l\left(\frac{k\rho R}{z}\right) e^{il\varphi} \cdot E\vec{e}, \quad (7)$$

где E — напряженность электрического поля резонансной волны на поверхности резонатора; $l = n - gm$ — топологический заряд; \vec{e} — единичный вектор поляризации; ρ, z, φ — цилиндрические координаты, соосные с МКР.

Заключение

Математические модели позволяют по конфигурации МКР определить топологический заряд, картину поля, управлять энергетическим распределением поля излучения и согласуются с результатами численного моделирования с использованием среды Ansys Lumerical, что подтверждает адекватность полученной аналитической модели.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНиТ (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники».

Список источников

- [1] **Porfirev, A. P.** Phase singularities and optical vortices in photonics / A. A. Kuchmizhak, S. O. Gurbatov, S. Juodkazis, S. N. Khonina, и Y. N. Kul'chin // Успехи физических наук. — 2022. — Т. 192. — № 8. — С. 841–866. — DOI: 10.3367/UFNr.2021.07.039028.
- [2] **Shen, Y.** Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, X. Yuan // Light Sci Appl. — 2019. — Т. 8. — № 1. — С. 90. — DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [3] **Weng, Y.** Orbital Angular Momentum Based Sensing and Their Applications: A Review / Z. Pan, J. Lightwave Technol. 2022. — С. 1–10. — DOI: 10.1109/JLT.2022.3202184.
- [4] **Cai, X.** Integrated compact optical vortex beam emitters / J. Wang, M. J. Strain, B. J.-Morris, J. Zhu, M. Sorel, J. L. O'Brien, M. G. Thompson, S. Yu // Science. — 2012. — Т. 338. — № 6105. — С. 363–366.
- [5] **Исимару, А.** Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / А. Исимару // Мир. — 1981. — Т. 1. — С. 12–34.
- [6] **Ландау Л.Д.** Электродинамика сплошных сред / Лифшиц Е.М. // Теоретическая физика: Учеб.пособ.:Для вузов. — 2005. — Том VIII. — С. 656

Modeling of the processes involved in the formation and propagation of optical vortex beams generated by micro ring resonators

V. Kh. Bagmanov¹, L.I. Bakirova¹, G.S. Voronkov¹, V.S. Lyubopytov¹,

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Mathematical model describing the emission and propagation of optical vortex beams carrying orbital angular momentum, generated by a microring resonator with a diffraction grating, formed by the holes on the surface of the resonator, are presented. The process of radiation emission is considered as the scattering of a traveling wave by dielectric inhomogeneities on the radiating microring surface caused by micro-holes. The mathematical models allow us to determine the dependence of radiation characteristics on parameters, defining the configuration of the emitting system. A simulation of the processes was conducted using the Ansys Lumerical software, which validated the developed analytical model.

Keywords: Optical vortex beam, Micro-ring resonator, Orbital angular momentum, Diffraction

Секция 3

Системы визуализации

и отображения информации для AR/VR

Оптические решения для современных устройств дополненной реальности: игра компромиссов

А. М. Алексеев, Е. М. Алексеев, Н. В. Никоноров

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Рынок устройств дополненной реальности (AR) претерпел значительные изменения в последние годы в результате появления первых коммерческих устройств, использующих прозрачные очки-дисплеи. Большинство ведущих технологических компаний представили собственные AR-решения, зачастую основанные на значительно отличающихся подходах к построению оптической архитектуры самого устройства. В настоящем докладе мы расскажем о передовых разработках прозрачных AR-очков, используемых основными коммерческими игроками, включая Microsoft, Snapchat, Sony, XReal и Magic Leap. Представлены различные оптические решения, рассмотрены их преимущества и ограничения. В конце доклада сформулированы практические рекомендации по выбору оптической архитектуры в зависимости от целевых сценариев использования.

Ключевые слова: Дополненная реальность, Смешанная реальность, Системы формирования изображения

Введение

Дополненная реальность (Augmented Reality — AR) является одной из наиболее перспективных технологий XXI века. Устройства дополненной реальности позволяют отображать цифровые объекты в реальном мире и уже нашли свое применение в широком спектре областей, включая медицину, образование, строительство, туризм, производство и индустрию развлечений [1, 2]. Для полноценной реализации возможностей, предоставляемых AR-технологиями, требуется использование прозрачных очков-дисплеев. Подобные устройства, во-первых, не ограничивают поле обзора пользователя, позволяя ему беспрепятственно передвигаться в окружающем пространстве, а во-вторых, оставляют его руки свободными для использования инструментов или прямого взаимодействия с предметами цифрового мира. Наиболее трудоемкой частью изготовления прозрачных AR-очков-дисплеев является создание так называемого оптического ядра, состоящего из компактного проектора изображения и прозрачной линзы-дисплея [3]. Ниже описаны современные подходы для решения этой нетривиальной задачи, а также отмечены их ограничения.

1. Оптическая архитектура носимых устройств дополненной реальности

Основными элементами носимых AR-устройств (монокуляров, очков, шлемов) являются миниатюрный проектор (Image Projector), который создает цифровое изображение, и прозрачный, комбинирующий оптический элемент (Optical Combiner), который «смешивает» изображения цифровых объектов и реального мира в глазах пользователя [4]. В зависимости от архитектуры системы, Imaging Projector может состоять из источника света (лазерного или светодиодного), пропускающей (или отражающей) матрицы — пространственного модулятора света, а также оптики, формирующей конечное цифровое изображение (линзы, зеркала, диффузоры и т. д.). Каждый из пикселей матрицы-модулятора может находиться в двух состояниях (on и off) для динамического формирования изображения, отображаемого пользователю. Сама матрица-модулятор может быть создана, например, на основе технологий жидких кристаллов или цифровых микро-зеркал [3,5] (Digital Micromirror Device — DMD).

В большинстве современных AR-очков используются схожие между собой Imaging Projectors, в которых отличается лишь выбор оптических и электронных компонент, составляющих устройство. В тоже время, Optical Combiner представляет собой инновационный оптический элемент и, как будет описано ниже, выбор технологии создания данного элемента во многом зависит от области применения конечного продукта.

Optical Combiners, использованные в первых прототипах AR-очков были изготовлены на основании классических оптических элементов (например, полупрозрачных изогнутых зеркал), как показано на рис. 1а.

Наиболее распространенная оптическая архитектура, используемая для создания Optical Combiners в современных AR-очках, основана на использовании технологии волноводов изображения (Imaging Waveguides). Изображение, созданное проектором, сначала вводится в Imaging Waveguide, а затем выводится в глаза пользователю через голографические оптические элементы [6] (Holographic Optical Element — HOE) или поверхностные дифракционные решетки [7] (Surface Relief Grating — SRG) (рис. 1б). Так как оба элемента, и HOE, и SRG, производятся с использовани-

ем наномасштабных литографических методов, для изготовления Imaging Waveguides приходится использовать сложное и дорогостоящее оборудование. Стоит также отметить, что AR-очки, использующие Imaging Waveguides, способны создавать иллюзию объемного изображения за счет эффекта параллакса [8], но на текущий момент не способны проецировать голографические изображения ввиду ряда фундаментальных ограничений [4].

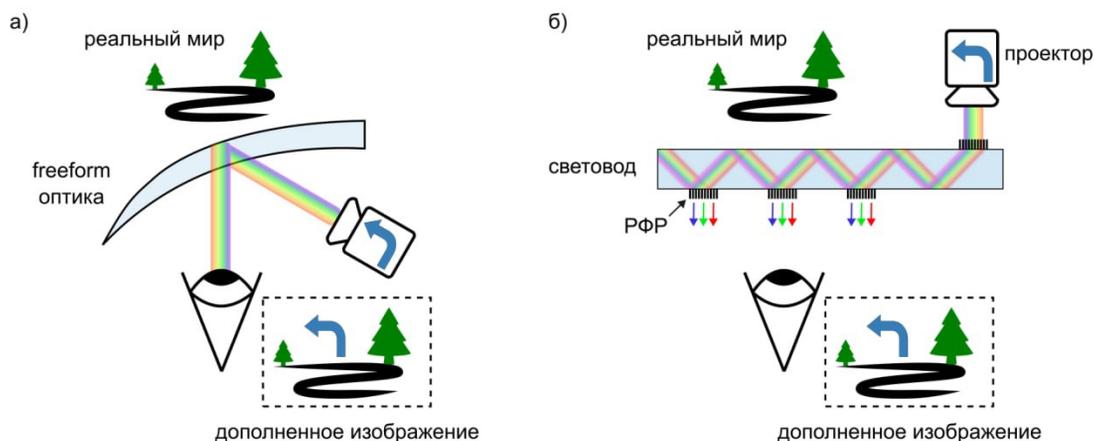


Рис. 1. Схематичное изображение оптического ядра, используемого в носимых AR-гарнитурах на основе (а) полупрозрачного изогнутого зеркала и (б) волноводов изображения

2. Выбор оптической архитектуры в зависимости от сценариев применения

Ниже в таблице представлены рекомендации по выбору архитектуры оптического ядра в зависимости от целевых сценариев использования носимой AR-гарнитуры.

Таблица 1. Варианты применения AR-гарнитур и описания используемой технологии оптического ядра

Индустриальная AR- гарнитура, непрозрачная	Индустриальная AR-гарнитура, прозрачная	AR-гарнитура для служб быстрого реагирования и активного отдыха	Потребительская AR- гарнитура, новая мобильная
Пример устройства от компании RealWear	Пример устройства от компании Sony	Пример устройства от компании Microoled	AR-очки будущего, легкие и компактные
<p>Архитектура: Микро-дисплей с оптикой, формирующей изображение Воспринимается как планшет размером 10 дюймов, расположенный на расстоянии 0,5 м. Непрозрачный, но поддерживает ограниченное наложение цифровых изображений на реальную действительность</p>	<p>Архитектура: Optical Combiner — полупрозрачное зеркало или толстый волновод изображения с отражающим зеркалом. Много сенсоров для картографирования окружающего пространства. Большая картинка и управление голосом или жестами.</p>	<p>Архитектура: Проецирование минимума информации в область периферийного зрения. Не требуют использования специализированного Optical Combiner — изображение проецируется на линзы обычных очков.</p>	<p>Архитектура: Сложный Optical Combiner — тонкий волновод, diffractive, reflective или holographic. Много сенсоров для картографирования окружающего пространства. Большая картинка и управление голосом или жестами.</p>

<p>Для чего:</p> <p>Индустриальные применения, где нужны свободные руки, критичен доступ к инструкциям и информации.</p> <p>Но не требуется наложение цифровых объектов на реальный мир.</p>	<p>Для чего:</p> <p>Индустриальные применения с интеграцией цифровых объектов в реальный мир.</p> <p>Картинка большая как дисплей монитора, можно вывести много информации.</p>	<p>Для чего:</p> <p>Активный отдых — велосипед, сноуборд, плавание и т. д.</p> <p>Службы быстрого реагирования — пожарные, полиция, МЧС и т. д.</p>	<p>Для чего:</p> <p>Для всего — замена мобильного телефона.</p> <p>Для потребительского рынка и рынка индустриальных устройств.</p>
<p>Ограничения:</p> <p>Нет дополненной реальности.</p> <p>Вывод сложной информации на дисплей с большим количеством деталей затруднен.</p> <p>Не компьютер — ассистент с заложенными сценариями.</p>	<p>Ограничения:</p> <p>Главное — размер и удобство использования.</p> <p>Не подойдут для массового потребителя, служб быстрого реагирования и активного отдыха.</p>	<p>Ограничения:</p> <p>Минимум информации, по сути, отдельный гаджет как умные часы.</p> <p>В связи с этим, весьма ограниченные сценарии использования.</p>	<p>Ограничения:</p> <p>Нет — могут быть использованы для всех назначений, описанных в этой таблице.</p>
<p>Преимущества:</p> <p>Более сложные сценарии использования.</p> <p>Использования стандартных приложений.</p>	<p>Преимущества:</p> <p>Полностью заменяют планшеты и персональный компьютер.</p> <p>Настоящее AR — можно взаимодействовать с цифровыми объектами в реальном мире.</p>	<p>Преимущества:</p> <p>Альтернатива умным часам по сравнимой стоимости.</p> <p>Очень компактный дизайн и низкая стоимость.</p>	<p>Преимущества:</p> <p>Полная интеграция пользователя в цифровой мир.</p> <p>Компактный дизайн и приемлемая стоимость.</p>

3. Взгляд в будущее: голографические очки дополненной реальности

В конце доклада обсудим, как будут выглядеть в будущем более совершенные AR-очки на основе голографических метаматериалов (рис. 2). Текущие решения, использующие голографические метаповерхности, позволяют создавать лишь статические изображения, в лучшем случае мультиплексированные в одном устройстве, используя поляризацию, длину волны, направление входящего света и т. д. [9]. Для создания динамических изображений необходимо разработать механизмы управления оптическим откликом голографических метаматериалов в режиме реального времени. Наиболее перспективные варианты решения этой задачи включают в себя использование переключаемых жидкокристаллических ячеек [10, 11] и создание метаповерхностей на основе материалов с фазовым переходом [12, 13]. Такие голографические метаповерхности должны управляться электронно-цифровым образом на уровне отдельных ячеек (метаатомов) в достаточно широком диапазоне модуляции их оптического отклика. За счет сканирования лазером различных областей голографической метаповерхности (MS) и динамического изменения оптического отклика конкретных метаатомов можно формировать волновые фронты любой желаемой формы и направления, т.о. создавая объемные голограммы. Очки, основанные на данной технологии, будут способны создавать реалистичные 3D-изображения, неотличимые от объектов окружающего мира, а также будут легкими и компактными.

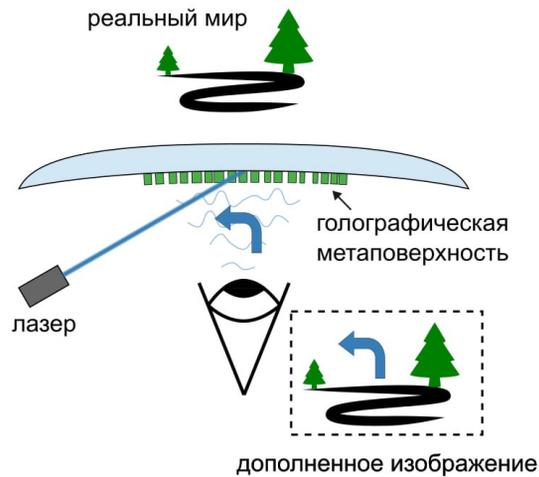


Рис. 2. Оптическое ядро для носимых AR-гарнитур на основании голографической метаповерхности с управляемым откликом

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Reljić, V.** Augmented reality applications in industry 4.0 environment / V. Reljić, Milenković, I., Dudić, S., Šulc, J. and Bažić, B // *Applied Sciences*. — 2021. — Vol. 11(12). — P. 5592.
- [2] **Manuri, F.** A survey on applications of augmented reality / F. Manuri, A. Sanna // *ACSIIJ Advances in Computer Science: an International Journal*. — 2016. — Vol. 5(1). —P. 18–27.
- [3] **Xiong, J.** Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives / J. Xiong, E.L. Hsiang, Z. He, T. Zhan, S.T. Wu // *Light: Science & Applications*. —2021. — Vol. 10(1). —P. 1–30.
- [4] **Kress, B. C.** Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets, SPIE Press Monograph / B. C. Kress // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*. — 2020. —Vol. PM316.
- [5] **Urey, H. March.** Wearable and augmented reality displays using MEMS and SLMs / H. Urey, E. Ulusoy, S.M. Kazempour-radi, D. Mengu, S. Olcer, S.T. Holmstrom // *MOEMS and Miniaturized Systems XV*. — 2016.— Vol. 9760. —P. 14–19.
- [6] **Xiong, J.** Holographic optical elements for augmented reality: principles, present status, and future perspectives / J. Xiong, K. Yin, K. Li, S.T. Wu // *Advanced Photonics Research*. — 2021. — Vol. 2(1). — P. 2000049.
- [7] **Chang, C.H.** Fabrication of sawtooth diffraction gratings using nanoimprint lithography / C.H. Chang, R.K. Heilmann, R.C. Fleming, J. Carter, E. Murphy, M.L. Schattenburg, T.C. Bailey, J.G. Ekerdt, R.D. Frankel, R. Voisin // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*. — 2003. — Vol. 21(6). —P. 2755–2759.
- [8] **Kellnhofer, P.** Motion parallax in stereo 3D: Model and applications / P. Kellnhofer, P. Didyk, T. Ritschel, B. Masia, K. Myszkowski, H.P. Seidel // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. — 2016. — Vol. 35(6). — P. 1–12.
- [9] **Liu, Z.** Metasurface-enabled augmented reality display: a review / Z. Liu, D. Wang, H. Li, M. Gao, H. Zhou, C. Zhang // *Advanced Photonics*. — 2023. — Vol. 5(3). — P. 034001–034001.
- [10] **Badloe, T.** Liquid crystal-powered Mie resonators for electrically tunable photorealistic color gradients and dark blacks / T. Badloe, J. Kim, I. Kim, W.S. Kim, Y.K. Kim, J. Rho // *Light: Science & Applications*. — 2022. —Vol. 11(1). — P. 118.
- [11] **Izdebskaya, Y.V.** Multifunctional metasurface tuning by liquid crystals in three dimensions/ Y.V. Izdebskaya, Z. Yang, V.G. Shvedov, D.N. Neshev, I.V. Shadrivov // *Nano Letters*. — 2023. — Vol. 23(21). — P.9825–9831.
- [12] **De Galarreta, C.R.** Nonvolatile reconfigurable phase-change metadevices for beam steering in the near infrared / C.R. De Galarreta, A.M. Alexeev, Y.Y. Au, M. Lopez-Garcia, M. Klemm, M. Cryan, J. Bertolotti, C.D. Wright // *Advanced Functional Materials*. — 2018. — Vol. 28(10). — P.1704993.
- [13] **De Galarreta, C.R.** Reconfigurable multilevel control of hybrid all-dielectric phase-change metasurfaces / C.R. De Galarreta, I. Sinev, A.M. Alexeev, P. Trofimov, K. Ladutenko, S.G.C. Carrillo, E. Gemo, A. Baldycheva, J. Bertolotti, C.D. Wright // *Optica*. — 2020. — Vol. 7(5). —P.476–484.

Optical architectures for modern Augmented Reality headsets: the game of trade-offs

A. M. Alexeev, E.M. Alexeev, N. V. Nikonorov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The Augmented Reality (AR) wearables market has undergone significant changes in recent years with the emergence of the first commercial transparent AR glasses. Most market leaders have introduced their own AR solutions, often based on substantially different approaches to the optical architecture of the device itself. In this paper, we will discuss recent developments in transparent AR glasses of major commercial players, including Microsoft, Snapchat, Sony, XReal, and Magic Leap. We will present various optical solutions and analyze their advantages and limitations. Finally, we will introduce practical guidelines for selecting specific optical architecture depending on the target use cases of the AR headset.

Keywords: *Augmented reality, Mixed reality, Imaging systems*

Применение голографических волноводных перископов при разработке HUD дисплеев

А. Н. Путилин^{1,3}, С. С. Копёнкин^{2,3}, Н. А. Путилин^{1,3}, С. Е. Дубынин¹, Ю. П. Бородин^{2,3}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

² МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

³ Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАуК), Москва, Россия

В данной работе представлено исследование по моделированию и экспериментальной записи большиеразмерных голографических волноводных перископов для HUD (Head-Up-Display) дисплеев и индикаторов на лобовом стекле (ИЛС). Оптические схемы такого типа устройств относятся к дисплеям дополненной реальности, но характеризуются большим расстоянием от дисплея до зрителя, в нашем случае — от 400 до 1000 мм, и экстремально большим выходным зрачком — до 250×300 мм. Разработанная схема и изготовленный макет формируют виртуальное изображение на бесконечности с угловым полем до 25°, работают с некогерентной проекционной системой в спектральном диапазоне 510–540 нм.

Ключевые слова: Волноводные голограммы, Голографические оптические элементы, Дисплеи дополненной реальности, Индикаторы на лобовом стекле

Введение

Дисплеи дополненной реальности (**Augmented Reality** — AR) являются одними из самых удобных систем отображения информации, когда оператору необходимо отслеживать несколько разнородных потоков информации, в частности, отслеживать окружающую обстановку и одновременно анализировать поток информации от локальных источников. Существует большое количество технологии построения оптических схем дисплеев данного типа: на базе традиционных отражательных и рефракционных оптических элементов, микропризмных и голографических оптических элементов. Тенденция к планаризации оптических схем дисплеев дополненной реальности привела к значительному росту интереса к голографическим оптическим элементам (ГОЭ). Как правило, оптимальная работа таких ГОЭ требует применения когерентных источников света из-за очень большого хроматизма обычных ГОЭ, исключение составляют волноводные голографические перископические системы [1–3]. Оптические схемы дисплеев дополненной реальности (AR) на базе волноводных неизображающих голографических перископов содержат как минимум две голограммы с одинаковой пространственной частотой, работающих в режиме компенсации хроматических искажений, что позволяет разрабатывать AR с некогерентными источниками света. Именно разработке таких схем и посвящена эта работа.

Большиеразмерные голографические волноводные перископы для HUD дисплеев и индикаторов на лобовом стекле

Общая тенденция в создании AR-дисплеев — это минимизация адаптации зрителя под оптимальные условия видения виртуальных изображений (отсутствие индивидуальной настройки) [3]. Одним из самых критичных параметров таких дисплеев является выходной зрачок системы (Eye-box — EB). Если для HMD (**Head-mounted Display**) этот параметр желательно иметь не менее 10–12 мм, то для HUD (**Head-up Display**) — это не менее 100 мм, что связано с большим (до 800 мм) расстоянием оператора от последнего оптического элемента дисплея и необходимостью обеспечения свободного перемещения зрителя относительно AR-дисплея, а также высокой подвижностью зрачка человека при рассмотрении широкоапертурных виртуальных изображений (больше 25–30°). Необходимость синтеза большого выходного зрачка для систем отображения мнимого изображения, используемого в HMD и HUD дисплеях, оказалась очень плодотворной для развития волноводной голографии (рис. 1). В большинстве случаев используется трехголограммная схема размножения зрачка, позволяющая размножить зрачок проектора в 5–10 раз по двум координатам, но при данной конфигурации волноводные голограммы занимают большую площадь волновода и схема не так компактна, как вариант с наложенными голограммами по типу фирмы WaveOptics. Сравнение трейсинга лучей в этих схемах показано на рис. 1.

Для использования в миниатюрных HMD дисплеях, спроектированных по трехголограммной схеме, где третья выводная голограмма имеет размер не более 25–40 мм по диагонали, размер всего волновода не столь критичен, хотя конструктив не позволяет выходить за рамки обычных очковых линз. А вот для схем HUD, где размер выходного зрачка не редко достигает 300–400 мм по диагонали, общий размер волновода становится весьма критичным параметром. Для систем отображения на

фоне лобового стекла транспортных средств и летательных аппаратов мы использовали вторую схему с наложенными голограммами как более компактную [4]. Апертура объектива, формирующая виртуальное изображение, не превышает десятой части апертуры, формирующей выходной зрачок оптической системы такого дисплея. В описываемом случае использовался DLP проектор фирмы 3M или проектор тестового изображения с объективом «Вега 3» (для исследования параметров виртуального изображения). При использовании подложки с показателем преломления 1,52 угловая апертура работы голографического перископа может достигать значений 28° по вертикали и 24° по горизонтали (диагональ до 36°). Запись голограмм осуществлялась на фоторезисте с последующим переносом рельефа на фотополимерный слой. Предложенный режим работы волноводной голограммы не обладает спектральной селективностью (решетки — рельефные), конкретные образцы записывались для восстановления зеленым лазером (532 нм). Для волноводных голографических модулей большого размера особые требования предъявляются к клиновидности пластин, используемых в качестве волновода. Это связано с тем, что в результате многократных переотражений даже самая небольшая клиновидность приводит к значительным искажениям, так как при каждом переотражении отклонение от исходного угла удваивается. Более компактной является схема, в которой вводная голограмма располагается в углу волновода рис. 2. В таком случае она имеет вид прямоугольного треугольника. В данном варианте, учитывая, что АД объектива составляет 42 мм, мы имеем треугольник с катетами 72 мм. Размер области выводной голограммы

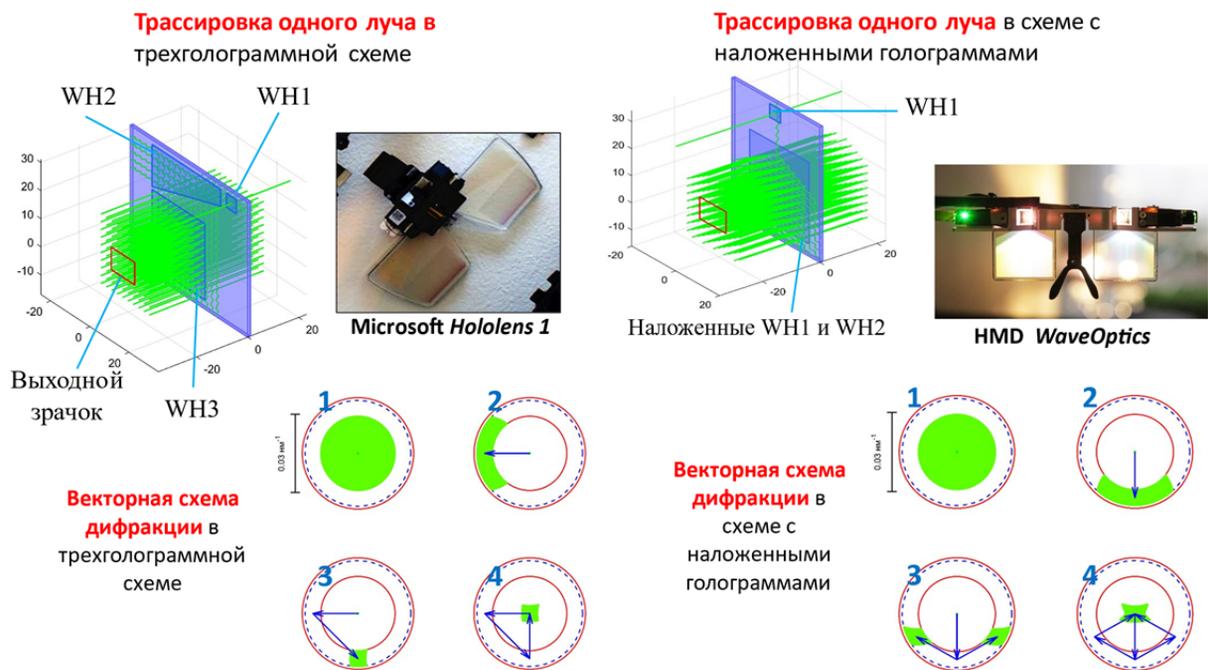


Рис. 1. Работа волноводного голографического перископа по трехголограммной схеме и схеме с наложенными голограммами

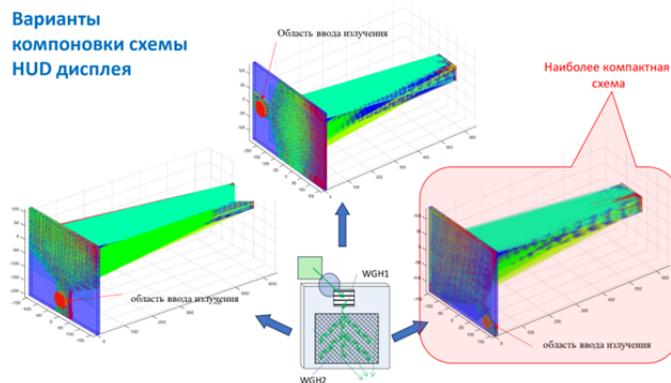


Рис. 2. Конфигурации HUD в схеме с наложенными голограммами

Взаимная ориентация решеток прежняя, однако вся система повернута относительно диагонали волновода. Расстояние от волновода до зрителя — вынос зрочка — составлял от 600 до 900 мм, размер зрочка для комфортного наблюдения виртуального изображения составлял 220×250 мм. Схема записи такой конфигурации голограмм показана на рис. 3.

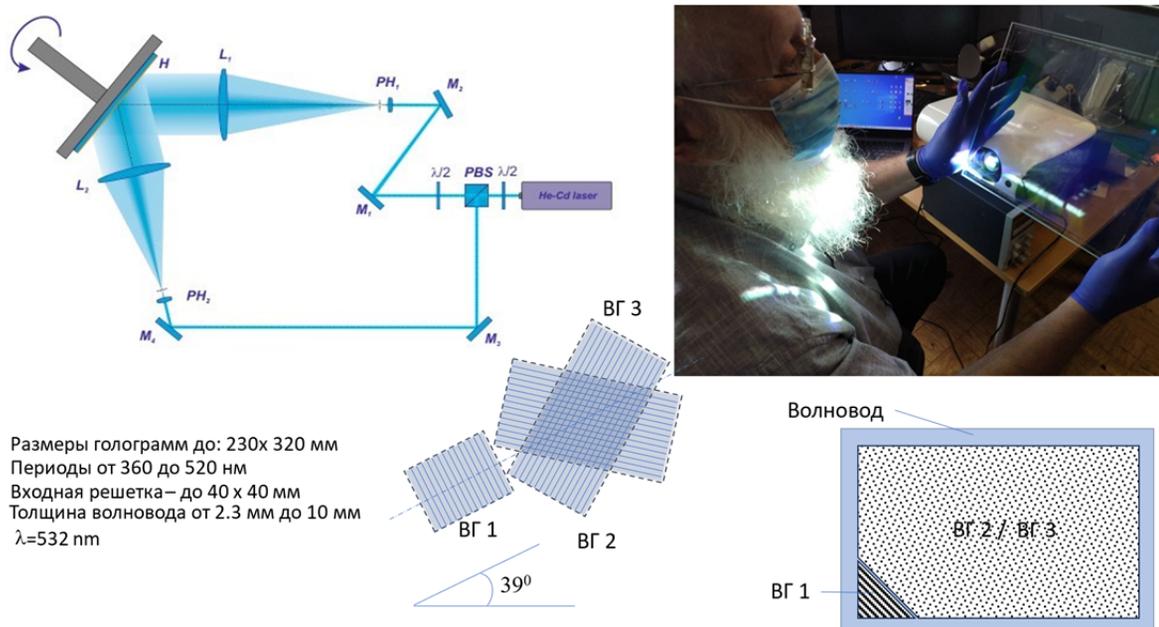


Рис. 3. Схема записи большеразмерного волноводного размножителя зрочка

Регистрирующая среда — фоторезистивные слои — устанавливались на поворотный вертикальный стол с угловым энкодером с точностью до 0,1 градуса, для изменения ориентации записываемых решеток. При первой экспозиции записывается решетка, ориентированная под углом $39^\circ+60^\circ$ к длинной стороне волновода.

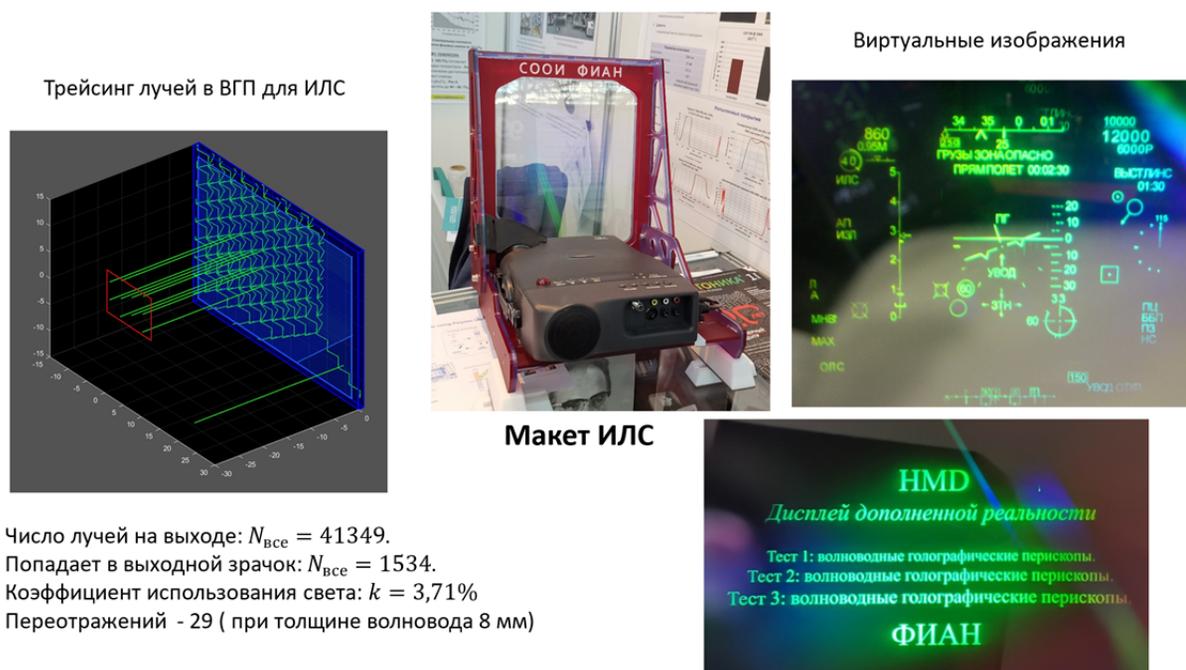


Рис. 4. Макет ИЛС и примеры формируемых виртуальных изображений

Вторая экспозиция производилась при угле 39° – 60° и третья экспозиция производилась через треугольную маску в углу подложки под углом 39° , таким образом формировался полная конфигурация волноводного голографического перископа для двухкоординатного размножения выходного зрачка. Макет ИЛС с использованием стандартного DLP проектора и ВГП размером 320×250 мм показан на рис. 4. Геометрические искажения виртуального изображения, по сравнению с изображением, формируемым проектором, были пренебрежимо малы.

Заключение

Запись большеразмерных волноводных голографических перископов позволила создать макет компактного ИЛС, не использующий специфических оптических объективов и светоотжателей и не требующий жесткого соответствия длин волн излучения при записи и воспроизведении голограмм, т. е. показана возможность использования источников с широким спектральным диапазоном и стандартных проекционных объективов. Получены следующие параметры ИЛС: вынос зрачка до 900 мм, большой выходной зрачок — до 250×300 мм, угловое поле до 25° по диагонали, работа с некогерентной проекционной системой в спектральном диапазоне 510–540 нм.

Список источников

- [1] Upatnieks, J. Edge-illuminated holograms / J. Upatnieks // Applied optics. — 1992. — Т. 31. — № 8. — С. 1048–1052. — DOI: 10.1364/AO.31.001048.
- [2] Putilin, A. N. Waveguide holograms with white light illumination / A. N. Putilin, V. N. Morozov, H. J. Caulfield // Optical engineering. — 1991. — Т. 30. — № 10. — С. 1615–1620. — DOI: 10.1117/12.55969.
- [3] Bernard, C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations / C. Bernard // Proc. SPIE 11062, Digital Optical Technologies. — 2019. — DOI: 10.1117/12.2527680.
- [4] Homan, M. The use of optical waveguides in head up display (HUD) applications / M. Homan // Defense, Security and Sensing. — 2013. — DOI: 10.1117/12.2014513.

The development of HUD displays on the base of holographic waveguide periscopes

Putilin A. N.^{1,3}, Ph.D., Kopenkin S. S.^{2,3}, Putilin N.A.^{1,3}, Dubynin S. E.¹, Borodin Yu. P.^{2,3}

¹ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN), Moscow, Russia

² MIREA - Russian University of Technology, Moscow, Russia

³ Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), Moscow, Russia

This paper presents a study on modeling and experimental recording of large-size holographic waveguide periscopes for HUD (Head-Up-Display) and indicators on the windshield (ILS). Optical circuits of this type of display belong to the augmented reality displays, but are characterized by a large distance from the display to the viewer, in our case from 400 mm to 1000 mm and an extremely large exit pupil – up to 250×300 mm. The developed scheme and the manufactured layout form a virtual image at infinity, an angular field of up to 25° , and work with an incoherent projection system in the spectral range of 510–540 nm.

Keywords: Waveguide holograms, Holographic optical elements, Augmented reality displays, displays on the windshield, HUD, HMD

Исследование режимов дифракции в волноводных голографических перископах в схемах HMD и HUD дисплеев

Н. А. Путилин^{1,2}, С. Е. Дубынин¹, А. Н. Путилин^{1,2}, С. С. Копёнкин^{1,2,3}, Ю. П. Бородин^{1,2,3}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

² Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), Москва, Россия

³ МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Волноводные голографические перископы нашли широкое применение в области HMD и HUD дисплеев дополненной реальности. Как правило, при моделировании работы волноводных голографических перископов рассматриваются только ± 1 -ые порядки дифракции. Однако используемые в подобных системах рельефно-фазовые дифракционные решетки могут иметь достаточную дифракционную эффективность и для 2-х порядков дифракции. В ходе проведенного исследования было установлено, что в волноводных голографических перископах наличие 2-х порядков дифракции может не только вносить ограничения, но и открывать новые возможности при разработке схем волноводных голографических перископов. В работе проанализирован ряд оригинальных схем, использующих дифракцию 2-го порядка. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментально полученными данными.

Ключевые слова: Волноводные голографические перископы, HMD и HUD дисплеи дополненной реальности, Вторые порядки дифракции

Введение

Волноводные голографические перископы (ВГП) наряду с микрзеркальными оптическими элементами являются на данный момент одним из наиболее распространенных типов бим-комбайнеров (совместителей пучков), используемых в системах дополненной реальности [1, 2]. Существует ряд вариантов схем построения ВГП: с однокоординатным размножением, схема типа «Wave-Optics», схемы HoloLens 1 и HoloLens 2, а также их модификации [2, 3]. Однако несмотря на достаточно большое разнообразие применяемых схемных решений все они подчиняются общему условию формирования ВГП на плоских волноводах безабберационного изображения: цепочка векторов дифракционных решеток должна быть замкнутой [4]. Рассмотрим, будет ли выполняться данное условие при учете рассмотрения не только $+1$ порядков, но и -1 , а также ± 2 -х порядков дифракции, так как в неволноводной дифракционной оптике наличие высших порядков дифракции, как правило, является ограничивающим фактором.

1. Размножение лучей при меридиональном падении на волноводную голограмму

На данный момент наиболее распространены ВГП на основе рельефных дифракционных решеток. Нередко для первичной оценки предельной дифракционной эффективности используется разложение в ряд Фурье. На рис. 1а показан рельеф синусоидальной дифракционной решетки, имеющей максимальную дифракционную эффективность (ДЭ) для ± 1 -х порядков (39 %). Однако так как используется не амплитудная, а фазовая решетка, то ее ДЭ для ± 2 порядков не равна нулю, а составляет примерно 10 %, почти столько же, сколько и для 0-го порядка. На рис. 2б рассматривается нормальное падение луча на ВГП, состоящий из одиночной дифракционной решетки (волноводной голограммы). Для трассировки используется собственная программа для моделирования ВГП. В процессе трассировки при каждом взаимодействии луча с волноводной голограммой «рождается» набор новых лучей с порядком дифракции не более заданного (в данном случае $+1$ порядок), при условии возможности существования данных порядков. На рис. 1б помимо трассировки луча приведены точки пересечения лучей с экраном для модели и в эксперименте (математический луч заменялся коллимированным лазерным пучком). При трассировке лучей не рассматривалось изменение интенсивности лучей. Из рис. 1б можно видеть, что модель вполне соответствует эксперименту.

Условимся называть меридиональной плоскостью, ориентированную параллельно вектору дифракционной решетки (волноводной голограммы). На рис. 1в рассмотрен случай падения в данной плоскости под углом к нормали $2-3^\circ$. Здесь можно наглядно видеть различие между моделью, учитывающей только ± 1 -е порядки дифракции, и экспериментом. В действительности возникает значительно большее число лучей, которые сливаются практически в сплошную линейку параллельных лучей. Введение учета 2-х порядков при трассировке дает картину, качественно совпадающую с экспериментом. При этом для нормального падения мультипликация (размножение) луча выглядит также, как и на рис. 1б — координаты точек возврата для данного частного случая для лучей

всех порядков совпадают. Характерно, что введение 2-х порядков не привело к нарушению параллельности лучей на выходе ВГП. Это связано с тем, что дифракция 2-ого порядка возникает только в волноводном режиме, при вводе излучения ± 2 -е порядки отсутствуют (угол дифракции должен был бы превышать 90°).

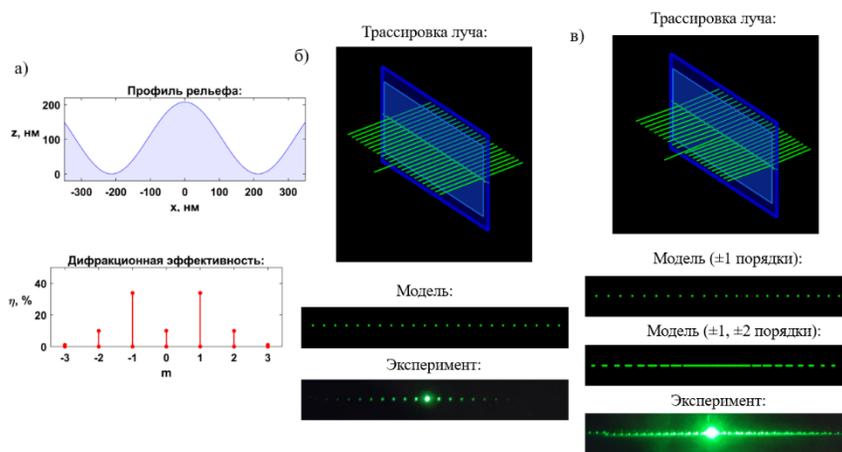


Рис. 1. Падение лучей в меридиональной плоскости на одиночную волноводную голограмму: (а) — оценка дифракционной эффективности рельефной синусоидальной решетки; (б) — случай нормального падения на ВГП; (в) — падение под углом 2° в меридиональной плоскости

2. Падение лучей в сагиттальной плоскости, двулучевой ввод

Изменяя угол падения в сагиттальной плоскости (параллельной штрихам дифракционной решетки), получим картину, представленную на рис. 2а). Наблюдается размножение луча по двум координатам. Это уникальное явление, так как обычно для двухкоординатного размножения необходимо использовать трехголограммные схемы. Данный режим ввода излучения в волновод был выявлен еще в 80-х годах в работе [5], однако именно в системах дополненной реальности его использование становится особенно выгодным.

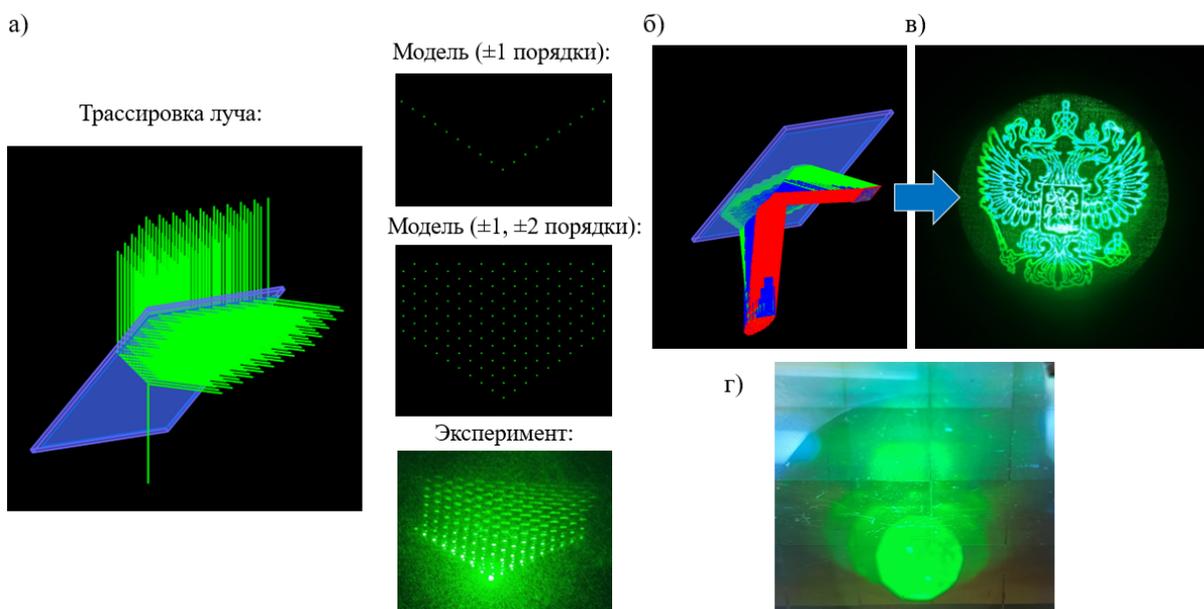


Рис. 2. Двулучевой ввод и двухкоординатная мультипликация зрачка на одиночной волноводной голограмме: (а) — падение луча под углом 45° ; (б) — трассировка пучков лучей (показаны лучи, попадающие в выходной зрачок); (в) — сформированное в данной схеме виртуальное изображение (фотография); (г) — мультипликация пучков лучей в плоскости голограммы (фотография)

На рис. 2а (как и на рис. 2б и 2в)) показано сравнение моделей и экспериментально наблюдаемого размножения лучей. Видно, что именно ± 2 -е порядки дают размножение внутри «вилки». Пре-

имущество данной схемы — использование нулевого отраженного порядка, что заметно поднимает эффективность работы волноводного голографического перископа. Можно заметить, что для используемых голографических решеток мы имеем значительную роль 2-х порядков дифракции. В схеме не возникает паразитных засветок либо абберационных пучков, что обусловлено волноводным режимом распространения. Рис. 2б иллюстрирует размножение пучков лучей согласно результатам моделирования, рис. 2в — формируемое виртуальное изображение (эксперимент), рис. 2г — экспериментально наблюдаемая мультипликация пучков лучей в плоскости голограммы.

3. Схема Wave-Optics с наложенными голограммами

На рис. 3а рассмотрено размножение падающего луча на наложенных голограммах в ВГП типа Wave Optics. Приведена модель, учитывающая только ± 1 -е порядки и фотография реального размножения луча в данной схеме. Выделяется следующее отличие: в самом начале размножения на наложенных голограммах в модели отсутствуют выходящие из волновода лучи, но они есть в эксперименте (данное место выделено стрелкой). Отсутствие данных лучей в схеме с учетом ± 1 -е порядков дифракции наглядно объясняется с помощью векторных диаграмм дифракции для данной схемы ВГП, которые приведены на рис. 3б: 1 — весь возможный диапазон лучей в воздухе при вводе; 2 — ввод на вводной голограмме; 3 — размножение на наложенных голограммах; 4 — вывод при повторной дифракции на наложенных голограммах. Вывод луча при первом падении на наложенные волноводные голограммы возможен при одновременной дифракции на двух наложенных голограммах (иная интерпретация — дифракция на возникшей муаровой горизонтальной дифракционной решетке), либо при наличии 2-х порядков дифракции

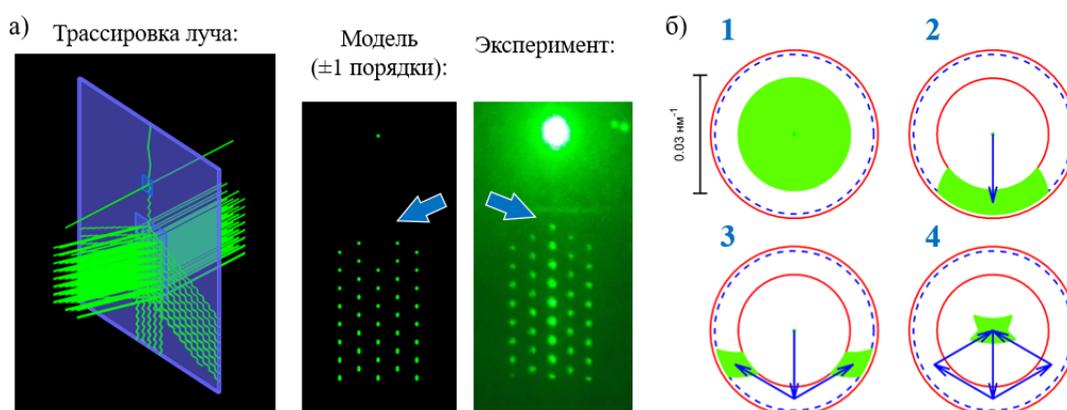


Рис. 3. Размножение лучей в схема Wave Optics: (а) — падение под углом 7° ; (б) — векторные диаграммы схемы дифракции

Заключение

Приведенный анализ показал, что наличие 2-х порядков дифракции в волноводном режиме не всегда приводит к ограничениям в работе волноводных голографических перископов. Напротив, в ряде случаев 2-е порядки дифракции открывают новые возможности при разработке устройств на основе плоских волноводов. В работе приведен анализ оригинальной схемы волноводного голографического перископа, использующей режим двулучевого ввода излучения для двумерной мультипликации зрачка.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Cheng, D. Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook / D. Cheng, Q. Wang, Y. Liu et al. // Light: Advanced Manufacturing. — 2021. — Vol. 2. — № 3. — P. 350–369. — DOI: 10.37188/lam.2021.024
- [2] Kress, B.C. Pace M. Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets / B.C. Kress // Light: Advanced Manufacturing. — 2022. — Vol. 3. — № 4. — P. 771–801. — DOI: 10.37188/lam.2022.042.
- [3] Solomashenko, A. Image quality for near-eye display based on holographic waveguides / A. Solomashenko, D. Lushnikov M. Shishova et al. // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12. — № 21. — P. 11136. — DOI: 10.3390/app12211136.

- [4] Путилин, Н.А. Искажения виртуального изображения в схемах дисплеев дополненной реальности на волноводных голограммах: возникновение тангенциальной дисторсии и хроматизма увеличения / Н.А. Путилин, С.Е. Дубынин, А.Н. Путилин, С.С. Копёнкин, Ю.П. Бородин // Оптический журнал. — 2024. — Т. 91. — № 3. — С. 79–94. — DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-79-94.
- [5] Путилин, А.Н. Исследование двухлучевого режима ввода излучения в планарный волновод / А.Н. Путилин // ЖТФ. — 1986. — Т. 56 — № 7. — С. 1406–1407.

Investigation of diffraction configurations in waveguide holographic periscopes in HMD and HUD display circuits

N. A. Putilin^{1,2}, S. E. Dubynin¹, A. N. Putilin^{1,3}, S. S. Kopenkin^{1,2,3}, Y. P. Borodin^{1,2,3}

¹ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences (FIAN), Moscow, Russia

² Moscow State University of Geodesy and Cartography (MII GAiK), Moscow, Russia

³ MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

Waveguide holographic periscopes have found wide application in the field of HMD and HUD augmented reality displays. As a rule, when modeling the operation of waveguide holographic periscopes, only ± 1 st diffraction orders are considered. However, the relief-phase diffraction gratings used in such systems can have sufficient diffraction efficiency for 2nd diffraction orders. In the course of the study, it was found that in waveguide holographic periscopes the presence of 2nd orders of diffraction can not only introduce restrictions, but also open up new opportunities. The work analyzes a number of original schemes using 2nd order diffraction.

Keywords: Waveguide holographic periscopes, HMD and HUD augmented reality displays, 2nd diffraction orders

Габаритный расчет проводится в соответствии с методикой, опубликованной в работах [3, 4]. Чем ближе наблюдатель к ГОЭ, тем больше у оптической системы должно быть поле зрения. При этом увеличение поля зрения приводит к уменьшению размера выходного зрачка. Результаты расчета приведены в столбце для автомобильной проекции в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики ГОЭ для автомобиля [3] и экспериментальной апробации метода

Параметр	Автомобильный проектор	Первичный эксперимент
Расстояние от диффузора до ГОЭ p	250 мм	200 мм
Расстояние до мнимого изображения q	2000 мм	771,4 мм
Расстояние от глаза до ГОЭ d	460 мм	100 мм
Фокусное расстояние f	285,7 мм	270 мм
Размер ГОЭ	200×150 мм ²	80×80 мм ²
Размер изображения на диффузоре	53,8×26,9 мм ²	50×50 мм ²
Угол наклона ГОЭ θ	45°	40°
Поле зрения	10°×5°	12,6°×12,6°
Размер выходного зрачка	147×81 мм ²	65,4×33,1 мм ²

Схема стенда записи представлена на рисунке 1б. Фокусное расстояние записываемого голограммного зеркала должно быть больше, чем расстояние от диффузора до ГОЭ. Оптически эта ситуация аналогична построению изображения с помощью сферического зеркала, когда объект находится ближе, чем фокусное расстояние.

2. Моделирование преобразования излучения в проекционной системе с голограммным зеркалом

Для моделирования ГОЭ в Zemax были использованы оптически изготовленные голограммы (OFH, optically fabricated hologram) второго типа, которые учитывают влияние aberrаций, внесенной линзами и другими оптическими элементами в предметной и опорной ветвях [5], показанных на рисунках 2а и 2б соответственно. Схема восстановления представлена на рисунке 2в.

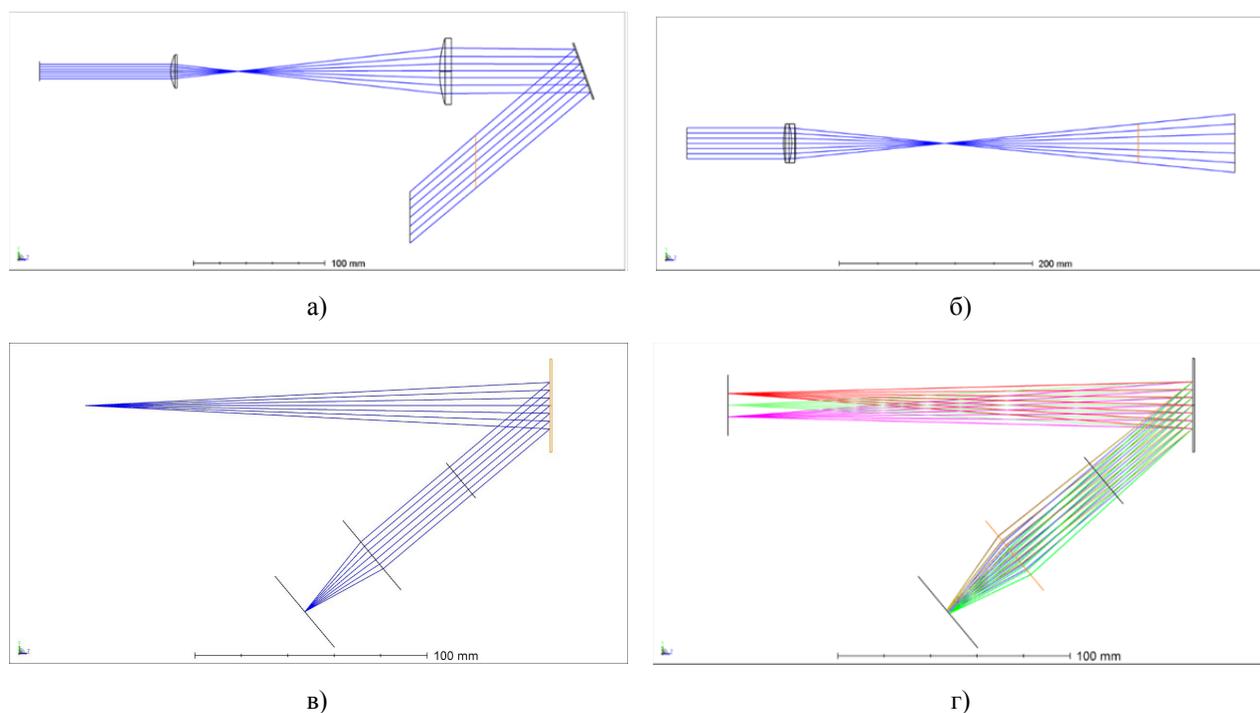


Рис. 2. Оптические системы в Zemax: а) предметный пучок; б) опорный пучок; в) основная схема восстановления голограммы; г) схема для проведения aberrационного анализа

На рисунках 2а и 2в оранжевым отрезком показана апертурная диафрагма, которая располагается в плоскости голограммного зеркала. Коллимированный пучок падает на голограмму под углом 40° , диаметр которой 40 мм. Расходящийся опорный пучок должен быть согласован с восстанавливающим излучением от диффузора. Для анализа качества изображения, в схеме была добавлена идеальная линза, показанная оранжевой линией на рисунке 2г, которая работает как глаз [6]. Его фокусное расстояние составляет 25 мм, диаметр апертуры 4 мм.

Результаты абберрационного анализа показаны на рисунке 3. Для оценки искажений изображения на рисунках 3а и 3б показано, как меняется тест-объект в виде сетки, при расположении его в фокусе голограммного зеркала. Она не влияет на разрешение системы, поэтому мы можем ей пренебречь. Значительный вклад в ухудшение качества изображения дают астигматизм и кривизна поля. Из схемы на рисунке 3в показан астигматизм в неравномерно распределенный в полном кадре. Различные углы наклона пучков записи в меридиональном и сагиттальном направлениях приводят к астигматизму [5]. В данном случае $\theta_x = 0^\circ$, $\theta_y = 40^\circ$, соответственно фокусное расстояние в сагиттальной плоскости намного меньше, чем в меридиональной плоскости, а фокус ближе к плоскости гаусса.

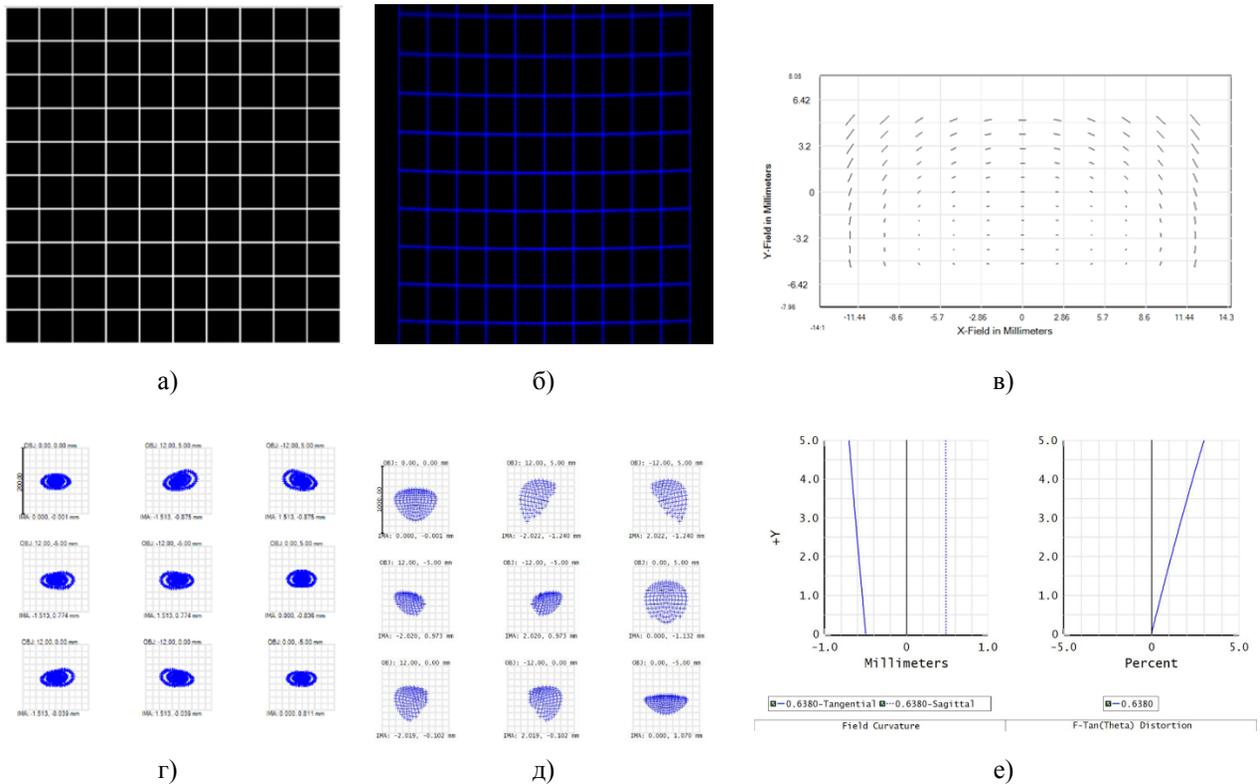


Рис. 3. Анализ качества изображения:

а) исходное изображение для анализа дисторсии; б) изображение, восстановленное с помощью ГОЭ; в) анализ астигматизма; г) диаграмма пятен рассеяния при расположении диффузора в фокальной плоскости ГОЭ; д) диаграмма пятен рассеяния при расположении диффузора на расстоянии меньше, чем фокусное от ГОЭ; е) схемы линий зависимости дисторсий и кривизны поля от высоты объекта

Точечные диаграммы на рисунках 3д и 3е иллюстрируют размеры пятна рассеяния для различных координат объекта. В системе присутствуют существенные сферическая абберрация и кома. Абберрационные кривые дисторсии и кривизны поля показаны на рисунке 3е. Дисторсия на крае поля составляет менее 1,5 %, так как угловое поле в нашей системе небольшое. По графику кривизны поля видно, что линия фокусировки сагиттальных пучков почти совпадает с плоскостью гаусса, а линия фокусировки меридиональных пучков отклонена. Из этого следует, что точка на крае объекта будет формировать изображения эллипса, большая ось которого совпадает с направлением сагиттальной плоскости.

В случае, если объект не находится в фокальной плоскости ГОЭ, как того требует схема формирования изображения, еще более заметны существенная кома, сферическая абберрация и астигматизм. Оптимизация оптической системы для компенсации этих абберраций необходима на следующих этапах разработки системы.

3. Экспериментальные результаты

Необходимо отметить, что ГОЭ, записанный в первичном эксперименте (табл. 1) для подтверждения гипотез по формированию изображения, отличался по размеру от расчетного в связи с техническими ограничениями, из-за чего происходило диафрагмирование виртуального изображения, как показано на рисунке 1. Чтобы угловое поле не обрезалось, ограничивали размер оригинального изображения, а также устанавливали диффузор ближе к ГОЭ. На рисунке 4а показан стенд записи, где в качестве источника излучения используется He-Ne лазер, подходящий для проведения экспериментов с ПФГ-03м и фотополимером Baufol HX200. Рисунок 4б иллюстрирует проецируемое изображение, полученное с помощью голограммного фотополимерного зеркала. Заметен существенный сагитальный астигматизм, связанный с ошибками юстировок пучков при записи.



Рис. 4. Оптические системы в Zemax: а) фото стенда записи; б) фото результата восстановления

Заключение

Проведен анализ схемы записи ГОЭ для автомобильного проектора и разработан стенд для апробации метода с перспективой улучшения качества записываемого ГОЭ. В оптической системе наблюдается дисторсия и аберрации, возникающие из-за отклонения пучков записи от направления главного луча, в также из-за отклонения условий восстановления и записи [7].

В дальнейшей работе для улучшения качества изображения, проецируемого с помощью голограммного зеркала, предлагается использовать симметричную систему с устранением комы и дисторсии [8]. Также можно изменить угол наклона коллимированного пучка при записи, и форму подложки [9]. В дальнейшей работе для решения проблемы срезания поля из-за малого размера ГОЭ, в схеме планируется использовать асферическое коллимационное зеркало или коллимационный объектив, которые бы имели большую апертуру. Для реализации цветного дисплея предполагается использовать метод мультиплексирования голограмм [10].

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы Приоритет 2030, МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Список источников

- [1] Zhou, C. Automotive augmented reality head-up displays / C. Zhou, W. Qiao, J. Hua, L. Chen // *Micromachines*. — 2024. — Vol 15. — № 4. — P. 442.
- [2] Skirnewskaja, J. Automotive holographic head-up displays / J. Skirnewskaja, T. D. Wilkinson // *Advanced materials*. — 2022. — Vol 34. — № 19. — P. 2110463.
- [3] Lv, Z. Dual-view and multi-content head-up display using a single picture generation unit and two-layer volume holographic grating / Z. Lv, J. Liu, Y. Yang // *IEEE Photonics Journal*. — 2022. — Vol 14. — №. 4. — P. 1–8.
- [4] Wang Z. et al. Holographic multiplane augmented reality head-up display with switchable display modes based on polymer dispersed liquid crystal // *Applied Optics*. — 2024. — Vol 63. — № 3.— P. 692–698.
- [5] How to Model Holograms in OpticStudio // URL: <https://support.zemax.com/hc/zh-cn/articles/1500005577722-%E5%A6%82%E4%BD%95%E5%9C%A8-OpticStudio-%E4%B8%AD%E5%BB%BA%E6%A8%A1%E5%85%A8%E6%81%AF%E5%9B%BE>
- [6] Which tools to use when working on a Head-up-Display? // URL: <https://support.zemax.com/hc/zh-cn/articles/1500005577782-%E8%AE%BE%E8%AE%A1%E6%8A%AC%E5%A4%B4%E6%98%BE%E7%A4%BA%E5%99%A8%E6%97%B6%E8%A6%81%E4%BD%BF%E7%94%A8%E5%93%AA%E4%BA%9B-OpticStudio-%E5%B7%A5%E5%85%B7/>

- [7] **Mehta, P. C.** Higher order aberrations in holographic lenses / P. C. Mehta, K. S. S. Rao, R. Hradaynath // Applied Optics. — 1982. — Vol 21. — № 24. — P. 4553–4558.
- [8] **Ghosh, A.** Design and fabrication of different types of holographic lenses, with analysis of their imagery and aberration / A. Ghosh, A. K. Nirala // Measurement Science and Technology. — 2017. — Vol 28. — № 12. — P. 125402.
- [9] **Dubik, B.** Aberrations of holographic lenses in image quality evaluation // Optical engineering. — 1992. — Vol 31. — № 3. — P. 478–490.

Image distortions in a projection system with a reflective holographic optical element

ZheYu Yan, M. V. Shishova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Selective holographic mirrors or combiners as part of augmented reality systems are used to project images into the driver's field of view. This allows navigation or speed information to be monitored without disconnecting from the traffic situation. Such mirrors can be combined with aircraft or car windshields. It is characterized by high diffraction efficiency and transparency. Typically, they are reflection holographic optical elements recorded in counter beams, operating in the Bragg diffraction mode. One of the main problems in such holographic combiners for a projection system is the distortion of the resulting image reconstructed in first order diffraction. Due to errors in the location of components from the recording setup, the holographic optical element can introduce significant astigmatism and other aberrations, resulting in a significant deterioration in projector's resolution. The paper investigates the reasons for the formation of the described distortions and gives recommendations for the design of the recording setup. The results on calculation and recording of reflective holographic optical elements, as well as modeling in the projection system are presented.

Keywords: Optics, Holography, Diffraction optical elements

Разработка окуляра с вынесенным зрачком для AR-устройства

А. Б. Соломашенко, О. Л. Афанасьева, Л. Н. Тимашова

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Устройства вспомогательной реальности (AR — assisted reality), представляющие собой носимые непрозрачные дисплеи, находят свое применение в промышленном сегменте. Окуляры таких устройств, по сути, являются лупой для увеличения изображения с микродисплея, но должны обладать определенными свойствами: достаточный вынос выходного зрачка от глаза (не менее 40 мм), высокое разрешение, низкая дисторсия, размер выходного зрачка не менее 6 мм при рабочем угловом поле 25° и выше, а также компактные размеры. В докладе предложено несколько модификаций окуляров для самосветящихся дисплеев диагональю 0,40 дюйма, приведены их абберационные характеристики.

Ключевые слова: Дисплей, Выходной зрачок, Окуляр

Наряду с гарнитурами дополненной и виртуальной реальностью существует еще один класс устройств – вспомогательной реальности, которые представляют собой небольшие носимые непрозрачные дисплеи с окуляром [1]. Дисплей необходим для вывода дополнительной (вспомогательной) текстовой или графической информации, а окуляр коллимирует излучение от него, чтобы вынести плоскость формирования изображения на расстояние нескольких метров от глаза пользователя и далее, минимизируя конфликт аккомодации и вергенции при наблюдении окружающего пространства и выводимой информации.

Устройства вспомогательной реальности (RealWear, Vuzix) нашли свое применение в промышленном секторе [2], а по функционалу и возможностям их можно сравнить с носимым на голове или интегрируемым в защитную каску планшетом или смартфоном, основной функцией которого является вывод виртуальных подсказок или видеозвонок удаленному эксперту. Наличие виртуального помощника (или удаленного эксперта) позволяет, с одной стороны, минимизировать возможные ошибки, возникающие в результате наличия человеческого фактора, а с другой, — обеспечить оператора необходимым дополнительным функционалом, например цифровыми технологическими картами, инструкциями, чертежами или объемными моделями оборудования в режиме «handsfree» [3], т. е. свободные руки, что дает ему максимально понятную информацию об объекте, но не ограничивает движения и перемещения.

Основным оптическим узлом такого устройства является дисплей с окуляром. Особенностью таких окуляров является то, что, с одной стороны, они должны обладать большим размером выходного зрачка для удобства подстройки под глаз пользователя, а, с другой, значительным его удалением, чтобы не мешать пользователю при ношении гарнитуры. Кроме того, с учетом того, что устройство является носимым, габариты и масса оптической части должны быть минимальными.

Для разработки окуляра AR-устройства проведено его моделирование в программной среде Zemax. На рисунке 1 представлено два варианта на основе 3 и 4 линз для цветного самосветящегося дисплея диагональю 0,4 дюйма (типа OLED или Si-OLED).

Основные технические параметры двух предложенных реализаций окуляров представлены ниже в таблице. При разработке подобных окуляров приходится искать компромисс между размером и удалением выходного зрачка. Тем не менее обе предложенные реализации обеспечивают приемлемый размер (свыше 6 мм) и удаление зрачка (30 мм и выше) при угловом поле 25 градусов и выше.

Таблица. Параметры разработанных окуляров

Параметр	Окуляр 1	Окуляр 2
Угловое поле, град.	25	30
Фокусное расстояние, мм	23,55	21
Расстояние до выходного зрачка, мм	30	36
Диаметр выходного зрачка, мм	6,5	8
Длина оптической системы, мм	28	27
Угловой размер пятна рассеяния:		
в центре, угл. мин.	1,7	1,7
на краю, угл. мин.	3,3	3,5
Дисторсия, %	4	6
Количество линз, шт.	3	4

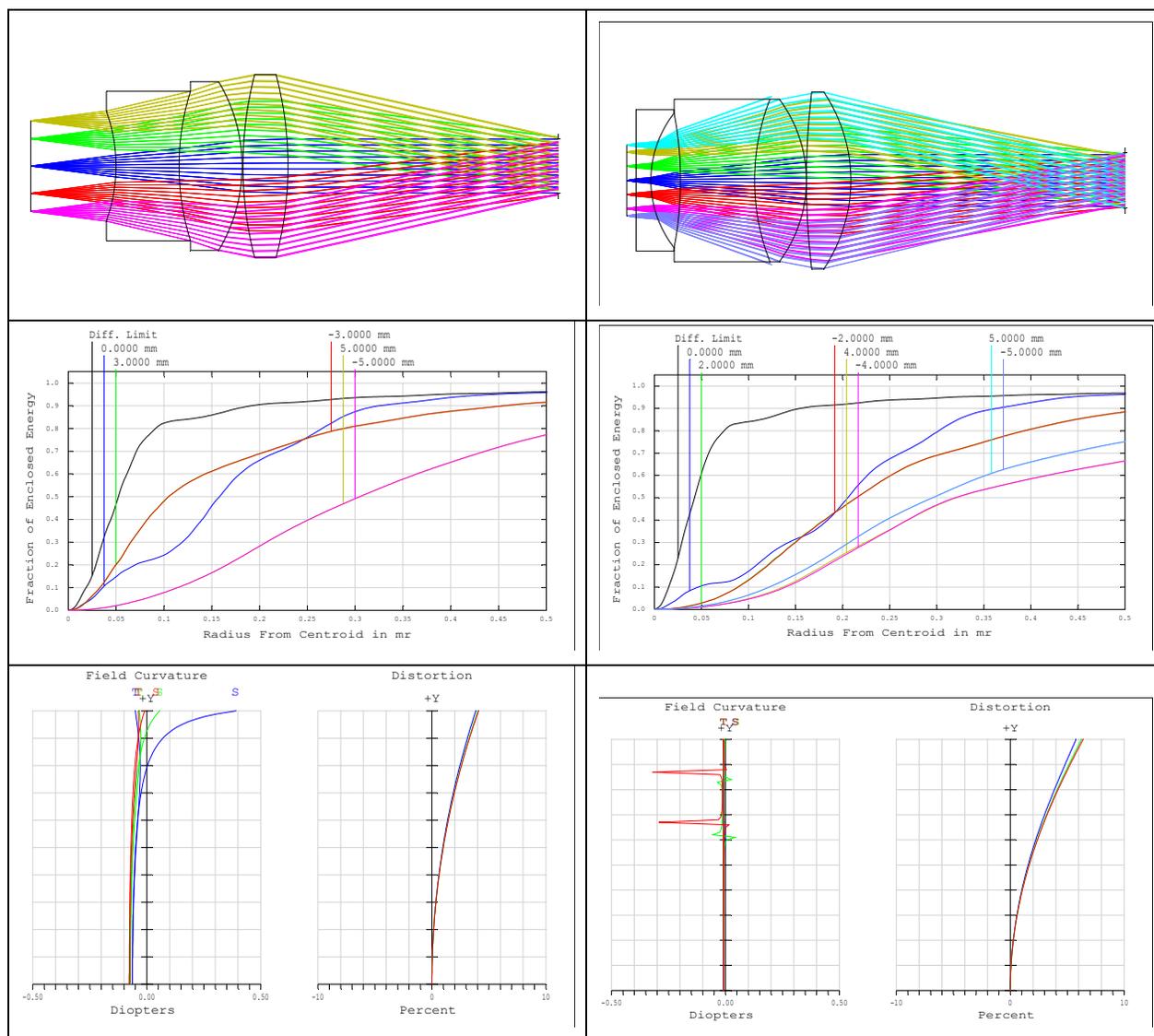


Рис. 1. Ход лучей, МПФ и графики кривизны поля для 3-линзового варианта (слева) и 4-линзового варианта (справа)

В качестве базового варианта предлагается использовать второй окуляр на основе 4-линзовой схемы. Несмотря на наличие дополнительной линзы, он обладает лучшими параметрами и уменьшенными (длина от дисплея до последней поверхности 27 мм) габаритными размерами. При этом первая поверхность входной линзы специально выполнена плоской для удобства позиционирования и размещения окуляра относительно плоской поверхности дисплея.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы Приоритет 2030, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Wei, F.** Head-mounted display augmented reality in manufacturing: A systematic review / F. Wei, L. Chen, T. Zhang, Ch. Chen, Zh. Teng, L. Wang // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. — 2023. — Vol 83. — P. 102567.
- [2] **Santi, G. M.** Augmented reality in industry 4.0 and future innovation programs / G. M. Santi, A. Ceruti, A. Liverani, F. Osti, // *Technologies*. — 2021. — Vol 9 (2). — P. 33.
- [3] **Cheng, H.** AR technology in the design of oil and gas field surface engineering: Applications and prospects. / H. Cheng, Z. Liu, F. Cai, L. Zhang, X. Ma, X. Sun, P. Wang // *Wearable Technology*. — 2024. — Vol 3(2). — P. 23–31.

Development of an eyepiece with an extended pupil for an AR device

A. B. Solomashenko¹, O. L. Afanaseva¹, L. N. Timashova¹

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Assisted reality (AR) devices, which are wearable opaque displays, are used in the industrial segment. The eyepieces of such devices are essentially a magnifying glass for magnifying an image from a microdisplay, but must have certain properties: sufficient exit pupil relief from the eye (at least 40 mm), high resolution, low distortion, exit pupil size of at least 6 mm at the working angle field of 25 degrees and above, as well as compact dimensions. The report proposes several modifications of such eyepieces for self-luminous displays with diagonals of 0.40 and 0.23 inches, and their aberration characteristics are given.

Keywords: Display, Exit pupil, Eyepiece

Применение технологий вспомогательной реальности для телемедицины: текущее состояние и перспективы

Е. Ю. Вальщиков, О. Л. Афанасьева

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Доклад посвящен анализу текущего состояния применения технологий вспомогательной реальности (AR) в телемедицине. Исследуется, как интеграция виртуальных элементов в реальный мир посредством AR улучшает качество медицинской помощи и расширяет доступность телемедицинских услуг. В докладе рассматриваются реальные примеры внедрения AR в клиническую практику, оцениваются преимущества и недостатки использования этих технологий в медицинской сфере. Кроме того, анализируются перспективы дальнейшего развития данного направления, выявляются ключевые тенденции и формулируются рекомендации по преодолению существующих вызовов и барьеров.

Ключевые слова: Вспомогательная реальность, Телемедицина, Медицинские технологии, Удаленные консультации, Визуализация данных, Клиническая практика, Обучение медицинского персонала

Технология вспомогательной реальности (assisted reality — AR) представляет собой одно из наиболее перспективных направлений в развитии современных медицинских услуг. Интеграция виртуальных элементов в реальный мир посредством AR открывает новые возможности для улучшения качества медицинской помощи и расширения доступности услуг телемедицины. Телемедицина уже доказала свою эффективность в предоставлении удаленного доступа к медицинским консультациям, диагностике и лечению. Однако внедрение AR-технологий позволяет значительно расширить функциональные возможности телемедицинских услуг. Врачи могут получать более детализированную визуальную информацию, а пациенты — более наглядное представление о своем состоянии и предстоящих процедурах. Данный доклад посвящен анализу текущего состояния применения AR-технологий в телемедицине. Рассматриваются реальные примеры их внедрения в клиническую практику, оцениваются преимущества и недостатки использования AR в медицинской сфере. Кроме того, исследуются перспективы дальнейшего развития данного направления, выявляются ключевые тенденции и формулируются рекомендации по преодолению существующих вызовов и барьеров.

Вспомогательная реальность представляет собой технологию, которая позволяет пользователю получать информацию через дисплей, не изменяя и не дополняя видимую реальность. Эта технология предоставляет данные в виде наложенного изображения на экран, который находится перед глазами пользователя. В отличие от дополненной реальности, где виртуальные объекты интегрируются с окружающим миром, вспомогательная реальность предоставляет информацию отдельно, как если бы вы смотрели на экран смартфона или компьютера. Типичным примером использования вспомогательной реальности являются специальные очки, на которые крепится маленький дисплей. Через этот дисплей пользователь может видеть картинку или видео, транслируемые с другого устройства, обычно управляемого удаленным оператором. Это похоже на видеозвонок, но экран не в руках пользователя, а перед его глазами.

Вспомогательная реальность находит широкое применение в телемедицине, предлагая множество способов улучшения качества медицинских услуг и эффективности работы медицинского персонала. Один из ключевых способов применения AR в телемедицине — это удаленные консультации. С помощью таких очков медицинские специалисты могут проводить осмотры пациентов на расстоянии, видя то, что видит пациент, и предоставляя ему необходимые рекомендации в режиме реального времени. Это особенно полезно для пациентов в удаленных или труднодоступных регионах, а также мест с повышенной жизненной опасностью, где доступ к квалифицированной медицинской помощи ограничен. Еще один способ применения AR в телемедицине — это обучение и тренировка медицинского персонала. Студенты и молодые специалисты могут использовать очки AR для наблюдения за операциями и процедурами, проводимыми опытными врачами, получая при этом комментарии и объяснения в реальном времени, как показано на рис. 1. Это позволяет ускорить процесс обучения и повысить его качество. В хирургии AR может применяться для получения удаленной помощи и консультаций во время операций (рис. 2). Опытные хирурги могут наблюдать за ходом операции через очки и давать советы менее опытным коллегам, помогая им справляться с сложными ситуациями и минимизировать риски. Таким образом, AR открывает новые возможности для телемедицины, улучшая доступность и качество медицинских услуг.

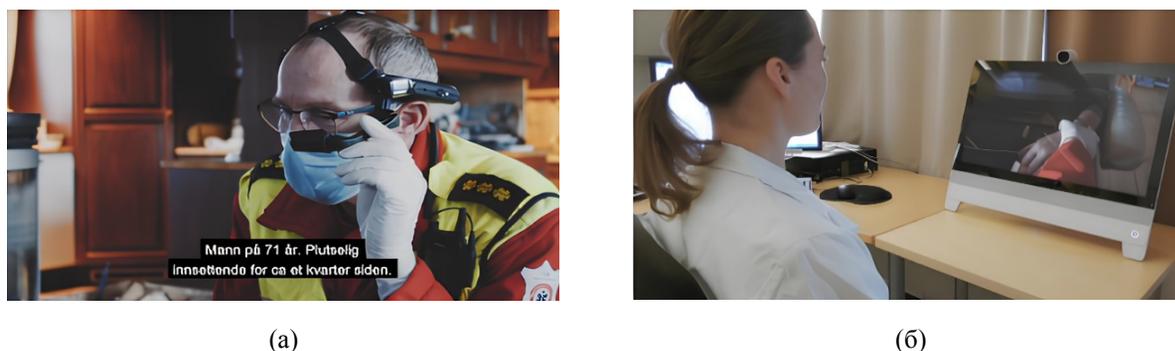


Рис. 1. Применение гарнитуры AR в сценарии удаленного эксперта:
 а — передача живого изображения и звука удаленной команде медицинских работников;
 б — вид от лица работника больницы

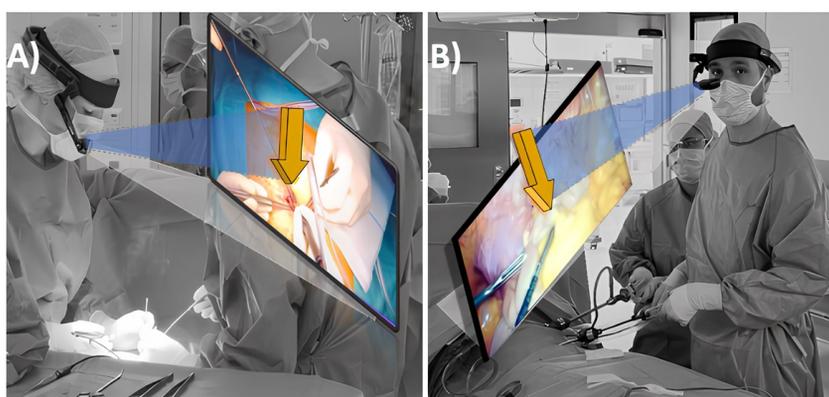


Рис. 2. Применение гарнитуры AR в качестве вспомогательного дисплея во время операции

Внедрение и эксплуатация очков вспомогательной реальности (AR) в реальных условиях сталкивается с рядом проблем, давайте их рассмотрим, а также определимся с их решениями. Одной из основных проблем является высокая стоимость оборудования и его обслуживания. Очки AR и связанные с ними устройства часто дорогостоящие, что может стать препятствием для их широкого внедрения, особенно в небольших медицинских учреждениях. Решением этой проблемы может стать постепенное снижение стоимости технологий по мере их распространения и развития, а также привлечение инвестиций и субсидий для медицинских учреждений. Еще одна проблема — это технические сложности и необходимость обучения персонала. Медицинские работники должны быть обучены использованию новых технологий, что требует времени и дополнительных ресурсов. Решение заключается в разработке простых и интуитивно понятных интерфейсов для очков AR, а также в проведении специализированных тренингов и курсов для медицинского персонала. Плюсы использования очков AR включают в себя улучшение качества медицинской помощи за счет удаленных консультаций и мониторинга, а также повышение эффективности обучения медицинского персонала. Врачи могут получать своевременные советы и помощь от коллег, находясь в разных частях мира, что способствует более быстрому и точному принятию решений. Кроме того, пациенты в удаленных регионах могут получать квалифицированную медицинскую помощь, не покидая своих домов. Однако есть и минусы. Одним из них является возможность технических сбоев и недостаточная надежность оборудования в некоторых условиях. Это может привести к задержкам в предоставлении медицинской помощи и возникновению дополнительных рисков для пациентов. Решением может быть создание резервных систем и регулярное техническое обслуживание оборудования. Другой минус — это возможные проблемы с конфиденциальностью и безопасностью данных. Передача медицинской информации через интернет может быть уязвима для хакерских атак и утечек данных. Решение этой проблемы требует внедрения надежных систем шифрования и защиты данных, а также соблюдения строгих стандартов конфиденциальности. В итоге, несмотря на существующие проблемы, очки вспомогательной реальности имеют значительный потенциал для улучшения медицинской помощи. Их правильное внедрение и эксплуатация могут привести к значительным положительным изменениям в здравоохранении, повышая доступность и качество медицинских услуг.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы Приоритет 2030, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Wrzesińska, N.** The use of smart glasses in healthcare—review / N. Wrzesińska // MEDtube Sci 31. — 2015.
- [2] **Dinh, A.** Augmented reality in real-time telemedicine and telementoring: scoping review / A. Dinh, et al. // JMIR mHealth and uHealth. — 2023. — Vol 11. P. e45464.
- [3] **Rivera, M.** Usability Evaluation of a Prehospital Emergency Telemedicine System / M. Rivera // MS thesis. NTNU. — 2022.

Application of assisted reality technologies for telemedicine: current status and prospects

E. Y. Valshchikov, O. L. Afanaseva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The report is devoted to the analysis of the current state of application of assisted reality (AR) technologies in telemedicine. Explores how virtual elements can be integrated into the real world by improving the quality of medical care and expanding the availability of telemedicine services. The report presents real-life examples of the use of these technologies in clinical practice, which demonstrate the advantages and disadvantages of using these technologies in the medical field. In addition, the prospects for further development of this area are analyzed, changes are identified and recommendations are formulated to overcome existing challenges and barriers.

Keywords: *Assisted reality, Telemedicine, Medical technologies, Remote consultations, Data visualization, Clinical practice, Medical personnel training*

Секция 4

Оптические защитные технологии

Неклонлируемый защитный знак основанный на лазерно-индуцированных поверхностных периодических структурах

М. К. Москвин, Е.В. Прокофьев, Д. Д. Учанова, А. Д. Долгополов, Д. А. Синева, Г. В. Романова

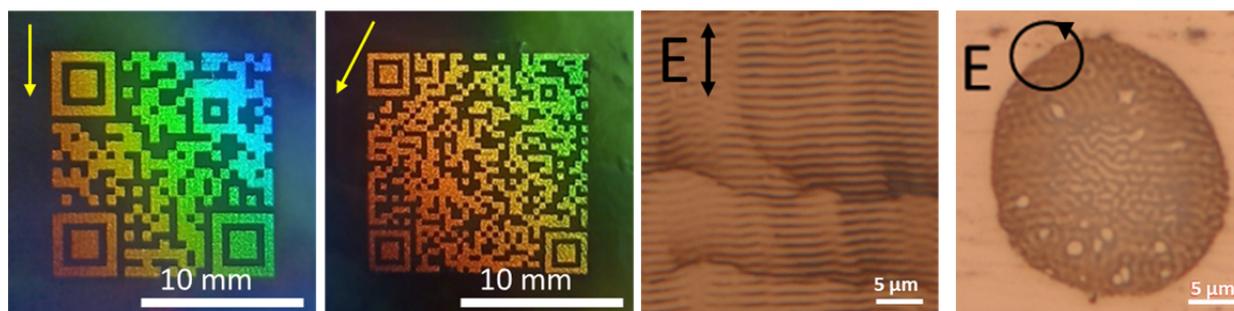
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В данном исследовании рассматривается использование явления бифуркаций (ветвлений) лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) как физически неклонлируемых функций для создания случайных и неклонлируемых защитных меток на металлических изделиях. Выявлено, что местоположение точек бифуркаций является случайным в лазерном отпечатке, несмотря на определенные зависимости от параметров излучения. Предложен алгоритм записи и идентификации защитных голограмм который позволяет настраивать локальные структурные признаки.

Ключевые слова: Лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС), Неклонлируемые метки

Для эффективной защиты продукции от фальсификации используются метки, механизм формирования которых основан на различных стохастических процессах — физически неклонлируемых функциях (ФНФ). Такие метки обладают непредсказуемыми идентификационными параметрами, и даже при наличии подходящего оборудования процесс копирования защитного знака становится невозможным. На данный момент существует достаточно ограниченный ряд исследований, где предлагаются доступные технологии создания неклонлируемых защитных меток, среди них люминесцентные [1, 2] и плазмонные метки [3, 4], метки на основе комбинационного рассеяния света [5], а также на основе случайно сформированной топографии поверхности [6].

В данной работе рассматривается использование явления возникновения бифуркаций (ветвлений) лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИППС) для использования в качестве физически неклонлируемой функции, в роли которой выступают координаты точек бифуркации. На рисунке 1 представлен пример реализованной защитной метки на стали 08X18H10 с эффектом переключения изображения и случайным элементом. Общая форма защитной голограммы и набор оптических эффектов, таких как переключение изображения, объем и динамика изображения, могут быть заранее заданы управляемыми параметрами дифракционной решетки на основе ЛИППС. А уникальным аспектом ЛИППС является стохастический характер возникновения точек бифуркации, которые обычно рассматриваются как дефекты. Количество возникающих ветвлений структур зависит от эллиптичности поляризации лазерного излучения. Эти точки бифуркации создают уникальную картину, взаимное расположение которой формируется случайным образом и невозможно воспроизвести.



а) фотографии защитного знака при его визуальном наблюдении с эффектом смены изображения

б) элементарная дифракционная решетка

в) субмикронный неклонлируемый защитный элемент

Рис. 1. Защитная голограмма, записанная на стали 08X18H10, с демонстрацией нескольких уровней защиты от фальсификации (визуально различимое голографическое изображение, включающее скрытые микросимволы и субмикронную структуру с заданными характеристиками лазерно-индуцированного поверхностного периодического рельефа)

Процесс записи реализован на базе системы МиниМаркер-2 (ООО «Лазерный Центр») с волоконным наносекундным лазером (IPG-Photonics), имеющим максимальную среднюю мощность 20 Вт, длину волны 1064 нм, длительность импульсов от 4 до 200 нс и частоту повторения импульсов от 20 до 99 кГц. Перемещение по полю обработки в направлениях X/Y осуществлялось при помощи

гальванометрической сканирующей системы. Лазерный пучок фокусировался с использованием объектива плоского поля с фокусным расстоянием 216 мм. Диаметр сфокусированного пучка составлял 50 мкм на уровне $1/e^2$.

Универсальность генерации ЛИППС позволяет формировать разнообразные паттерны на различных типах материалов, что обеспечивает относительно простой способ создания физически неклонированной метки с максимальным уровнем защиты, интегрированную непосредственно в поверхность металлических изделий.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы Приоритет 2030, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Larin, A. O.** Luminescent erbium-doped silicon thin films for advanced anti-counterfeit labels / A. O. Larin, et al. // *Advanced Materials*. — 2021. — Т. 33. — № 16. — С. 2005886. <https://doi.org/10.1002/ADMA.202005886>.
- [2] **Ponkratova, E.** Coding of Non-Linear White-Light Luminescence from Gold-Silicon Structures for Physically Unclonable Security Labels / E. Ponkratova, et al. // *Advanced Functional Materials*. — 2022. — Т. 32. — № 41. — С. 2205859. — DOI: 10.1002/ADFM.202205859.
- [3] **Kustov, P.** Mie-Resonant Silicon Nanoparticles for Physically Unclonable Anti-Counterfeiting Labels / P. Kustov, et al. // *ACS Applied Nano Materials*. — 2022. — Т. 5. — № 8. — С. 10548–10559. — DOI: 10.1021/ACSANM.2C01878.
- [4] **Guay, J. M.** Laser-induced plasmonic colours on metals / J. M. Guay, et al. // *Nature communications*. — 2017. — Т. 8. — № 1. — С. 16095. — DOI: 10.1038/ncomms16095.
- [5] **Gu, Y.** Gap-enhanced Raman tags for physically unclonable anticounterfeiting labels / Y. Gu, et al. // *Nature communications*. — 2020. — Т. 11. — № 1. — С. 516. — DOI: 10.1038/s41467-019-14070-9.
- [6] **Bae, H. J.** Biomimetic microfingerprints for anti-counterfeiting strategies / H. J. Bae, et al. // *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*. — 2015. — Т. 27. — № 12. — С. 2083–2089. — DOI: 10.1002/ADMA.201405483.

Non-clonable security sign based on laser-induced surface periodic structures

M. K. Moskvina, E. V. Prokofiev, D. D. Uchanova, A. D. Dolgoplov, D. A. Sinev, G. V. Romanova

ITMO University, St. Petersburg, Russia

This study considers the use of the phenomenon of bifurcations (branching) of Laser Induced Periodic Surface Structures (LIPSS), to create random and non-clonable protective marks on metal surfaces. It is shown that the location of bifurcation points is random in the laser spot despite certain dependencies on the radiation parameters. An algorithm for recording and identification of protective holograms is proposed, which allows to tune local structural features.

Keywords: *Laser-induced surface periodic structures (LIPSS), Non-clonable sign*

Секция 5

Интегральная фотоника

и оптические коммуникации

Генерация комбинаций вихревых мод средствами интегральной фотоники

Р. В. Кутлуяров, И. В. Степанов, В. С. Любопытов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

В работе предлагаются эффективные методы генерации вихревых оптических пучков с заданным орбитальным угловым моментом и включающих их модовых композиций. Рассматриваются способы генерации и мультиплексирования как перпендикулярно плоскости чипа, так и непосредственно в интегральном оптическом световоде. В первом случае в интегральном микрокольцевом резонаторе возбуждается до четырех мод, которые благодаря периодическим неоднородностям излучаются в пространство, формируя вихри. Каждый канал может быть независимо промодулирован. Во втором в едином интегральном световоде формируется комбинация вихря первого порядка и фундаментальной моды, которые могут быть независимо промодулированы. Предложенные решения могут быть использованы как для быстрого переключения излучаемой моды, так и для мультиплексирования информационных сигналов.

Ключевые слова: Кремниевая фотоника, Оптический вихрь, Мультиплексор

Введение

Перспективные приложения принципа управления орбитальным угловым моментом (ОУМ) света определяют необходимость контроля над порядком ОУМ создаваемых вихрей и возможность одновременно управлять вихрями разных порядков в одном оптическом пучке. Компактные и стабильные по своим характеристикам устройства для этого могут быть реализованы на основе фотонных интегральных схем (ФИС). В общем случае, методы генерации оптических вихрей на основе интегральной фотоники можно разделить на методы генерации в свободном пространстве, вне объема чипа (out-of-plane), и методы генерации непосредственно в интегральном световоде (in-plane). В данной работе рассматривается способ генерации двух пар сопряженных вихрей с различными порядками ОУМ вне чипа на основе микрокольцевого резонатора (МКР) и способ генерации суммы вихря первого порядка и фундаментальной моды в интегральном световоде.

1. Генерация комбинации оптических вихрей вне чипа

Генерация вихрей вне чипа в большинстве предложенных решений реализуется на основе микрокольцевых резонаторов (МКР) с периодическими неоднородностями [1]. Для генерации одновременно двух пар сопряженных вихрей на одной длине волны излучения предложено устройство, состоящее из кольцевого резонатора и двух входных волноводов, выполненных по технологии «кремний-на-изоляторе» (рис. 1). Периодические неоднородности выполняются в виде цилиндрических выемок внутри световода МКР. Возможные порядки вихрей фиксированы и определяются геометрией конструкции. Условия фазового синхронизма для устройства должны быть удовлетворены таким образом, чтобы излучение, поступившее в первый световод ввода, было связано с модой TE₀₀ в МКР, а излучение, поступившее во второй световод ввода, было связано с модой TE₁₀ в МКР. Необходимо, чтобы геометрия резонатора обеспечивала резонанс основной моды TE₀₀ и резонанс моды TE₁₀ на одной длине волны. При оптимизации задается диапазон значений радиуса кольца и ширины кольцевого волновода, для всех комбинаций которых проводятся дальнейшие расчеты. После интерполяции полученных значений по сетке с необходимой точностью осуществляется поиск оптимальных геометрических параметров резонатора.

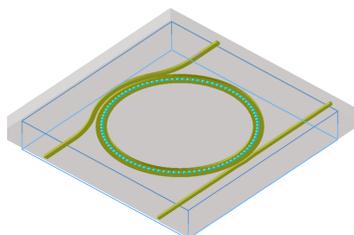
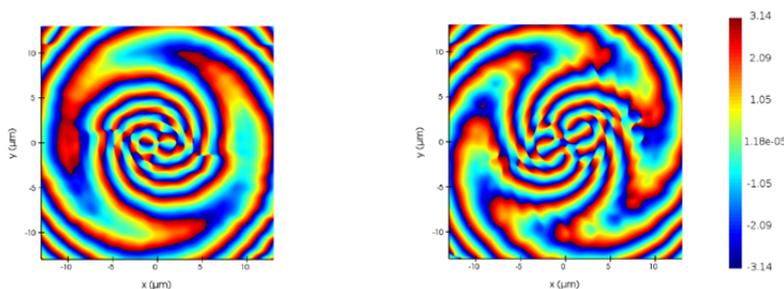


Рис. 1. Схематический вид устройства

С помощью программного обеспечения Lumerical FDTD проводилась полная численная проверка рассчитанных при оптимизации параметров интегрального устройства. На рисунке 2 показана

ны фазовые распределения излучателя в фундаментальной (TE_{00}) и TE_{10} модах. Распределения даны для резонанса на длине волны 1555 нм.



а) y -компонента электрического поля в режиме TE_{00} б) y -компонента электрического поля в режиме TE_{10}

Рис. 2. Распределение фазы y -компонент электрического поля

2. Генерация комбинации мод в интегральном световоде

На рисунке 3 приводится схематическое изображение интегрального устройства, позволяющего непосредственно в световоде получить сумму вихревой моды первого порядка и фундаментальной моды, при этом каждый модовый сигнал может быть промодулирован независимым полезным сигналом.

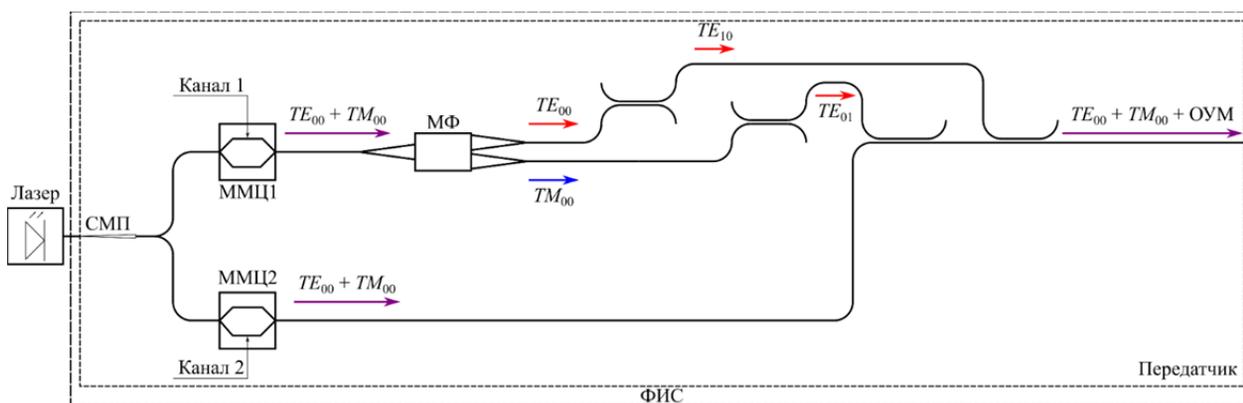


Рис. 3. Схема передатчика для мультиплексирования вихревого сигнала с фундаментальной модой в интегральном световоде:

СМП — согласователь размера модового пятна; ММЦ — модулятор Маха-Цендера; МФ — модовый фильтр

Разделение мод для получения мод TE_{01} и TE_{10} осуществляется в многомодовом ответвителе. В схеме используются фундаментальные электрическая (TE_{00}) и магнитная (TM_{00}) моды, так как преобразование TM_{00} в TE_{01} эффективнее, чем TE_{00} в TE_{01} . Приемная схема строится по аналогичному принципу.

Заключение

Таким образом, предложенные устройства позволяют мультиплексировать вихревые моды в едином оптическом канале как для случая атмосферного пучка, так и для оптического сигнала, передаваемого по интегральному световоду.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки России для УУНиТ (соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024 г.) в молодежной научно-исследовательской лаборатории Евразийского НОЦ «Сенсорные системы на основе устройств интегральной фотоники» в части генерации вихрей в световоде, частично выполнено при поддержке Российского Научного Фонда по гранту 19-49-04112 в части генерации вне чипа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Cai, X. Integrated compact optical vortex beam emitters / X. Cai, J. Wang, M. J. Strain, B. Johnson-Morris, J. Zhu, M. Sorel, J. L. O'Brien, M. G. Thompson, S. Yu // Science. — 2012. — Vol. 338. — № 6105. — P. 363–366.

Generation of vortex modes combinations using integrated photonics

R. V. Kutluyarov, I. V. Stepanov, V. S. Lyubopytov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

The paper proposes effective methods for the optical vortex beams generation with certain orbital angular momentum and mode compositions that include them. Both out-of-plane and in-plane generation and multiplexing methods are considered. In the first case up to four modes are excited in an integrated microring resonator, which forming vortices due to periodic inhomogeneities. Each channel can be independently modulated. In the second case, a first-order vortex and fundamental mode combination is formed in a single integrated waveguide, both modes can be independently modulated. The proposed solutions can be used both for fast orbital angular momentum switching and for signal multiplexing.

Keywords: *Silicon photonics, Optical vortex, Multiplexer*

Исследование быстродействия электрооптического модулятора на кольцевом микрорезонаторе из тонкопленочного ниобата лития на изоляторе

Д. М. Кобцев^{1,2}, И. О. Венедиктов^{1,2}, С. С. Святодур^{1,3}, А. Д. Голиков³, В. В. Ковалюк^{1,2}, Г. Н. Гольцман^{1,4}

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

² Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

³ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁴ Российский квантовый центр, Москва, Россия

В работе показаны результаты измерений основных характеристик и описан технологический процесс изготовления электрооптических модуляторов из тонкопленочного ниобата лития на изоляторе в виде кольцевых микрорезонаторов. Разработанный маршрут позволил получить резонаторы с добротностью 18000. Быстродействие изготовленных устройств телекоммуникационном диапазоне длин волн (С-диапазон) составило 3,9 ГГц (при напряжении 5 В), а коэффициент амплитудной модуляции 49 %.

Ключевые слова: Интегральная оптика, Активные оптические элементы, Электрооптический модулятор

Введение

Основной функцией модуляторов является изменение параметров несущей волны в соответствии с изменениями передаваемого сигнала. Модуляторы применяются во многих областях, к которым можно отнести телекоммуникации, сенсорику, квантовую обработку информации и др. [1, 2]. На сегодняшний день можно выделить термооптические, акустооптические, магнитооптические, микрооптические, электромеханические и электрооптические модуляторы (ЭОМ) [3]. Электрооптические модуляторы используются в областях, где необходимо высокое быстродействие и компактный дизайн одновременно. В основе работы таких устройств лежит эффект Поккельса, сущность которого заключается в линейном изменении показателя преломления от напряженности приложенного электрического поля и может быть описана формулой:

$$n_{eff}(E) = n_0 - \frac{1}{2} r n_0^3 E, \quad (1)$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления; E — напряженность электрического поля; n_0 — показатель преломления материала в отсутствие поля; r — линейный электрооптический тензор.

Для создания модулятора мы использовали геометрию кольцевого микрорезонатора с активной зоной вдоль кольца радиусом 100 мкм. Основным преимуществом рассматриваемой реализации является компактность устройства, но это преимущество накладывает и определенные ограничения на характеристики [4], по сравнению с интерферометрами Маха-Цендера [5].

В качестве платформы для изготовления был выбран ниобат лития на изоляторе в силу его оптических свойств:

- широкое окно прозрачности ($\Lambda \sim (0,35-5)$ мкм);
- малые потери на распространение ($\alpha \sim 0,4$ дБ/см);
- высокое значение показателя преломления ($n \sim 2,2$ для $\lambda = 1550$ нм);
- высокое значение элемента электрооптического тензора ($r_{33} \sim 30,9$ пм/В).

Технологический процесс изготовления

Для изготовления рассматриваемых электрооптических модуляторов была выбрана коммерчески доступная подложка компании NANOLN, состоящая из кремниевой основы толщиной 500 мкм, слоя диоксида кремния толщиной 4,75 мкм и ниобата лития толщиной 600 нм. Процесс изготовления начинался с напыления твердотельной маски из хрома и диоксида кремния. Затем на поверхность маски наносился электронный резист методом центрифугирования, после чего происходила электронно-лучевая литография. На следующем этапе производилось плазмохимическое травление твердотельной маски и удаление электронного резиста. Завершающим этапом технологического процесса было травление ниобата лития в аргоновой плазме и очистка подложки методом RCA-1 [6].

Изображение одного из устройств, полученных в ходе описанного выше технологического процесса показано на рис. 1.

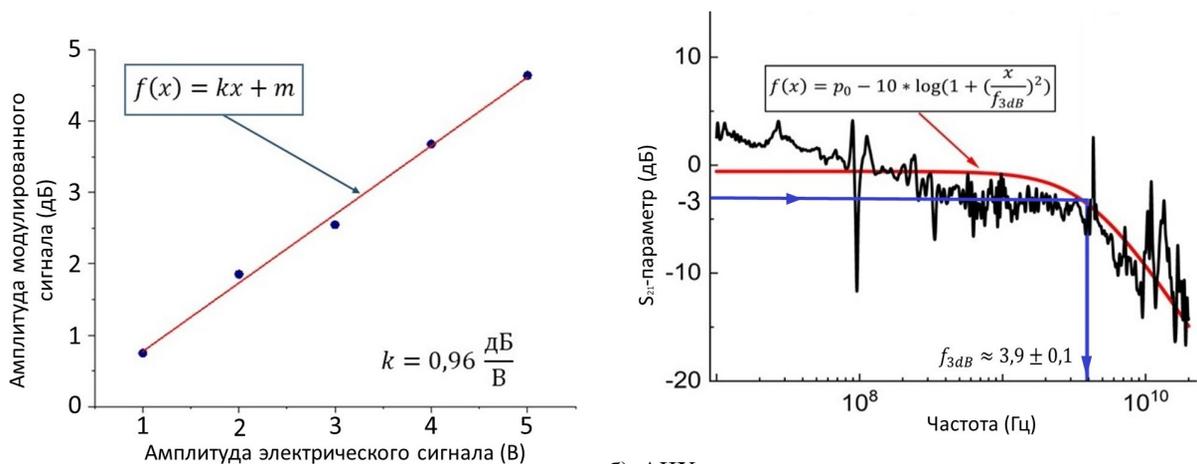


Рис 1. Изображение массива изготовленных структур (а) и расположения контактов на кольцевом микрорезонаторе (б)

Измерение характеристик

Характеристики изготовленных структур исследовались на созданном экспериментальном стенде, включающем в себя перестраиваемый лазерный источник (1480–1640 нм), векторный анализатор спектра (Seuear 3671D), работающий в диапазоне до 18 ГГц, широкополосный усилитель (ZVA-183W-S+) и быстродействующий фотодетектор (Thorlabs DXM50AF).

Сначала были измерены оптические характеристики структур: добротность и глубина резонансов. По результатам измерений была определена структура с наибольшей добротностью ($Q \sim 18000$) и интерференционный пик с наибольшей глубиной резонанса (~ 40 дБ). Далее осуществлялось измерения скорости изменения мощности, в зависимости от амплитуды подаваемого сигнала, которая составила $0,96$ дБ/В (рис. 2а). Затем у структуры с лучшими характеристиками исследовалась полоса модуляции. Для этого выбиралась рабочая точка, соответствующая максимуму производной резонанса кольцевого микрорезонатора вблизи телекоммуникационной длины волны $1,55$ мкм. Свет на рабочей длине волны через дифракционную решетку вводился в резонатор, а на электрические контакты при помощи векторного анализатора спектра подавался высокочастотный сигнал, который позволил определить быстродействие изготовленного электрооптического модулятора. Амплитудно-частотная характеристика модулятора (АЧХ) от частоты сигнала показана на рис. 2б.



а) зависимость амплитуды модулированного сигнала от подаваемого электрического сигнала; красная кривая — аппроксимация теоретической функции; k — скорость изменения мощности от амплитуды сигнала.

б) АЧХ модулятора от частоты электрического сигнала, где черная кривая — экспериментальные данные; красная кривая — аппроксимация теоретической функции, синяя прямая — срез, приходящийся 3 дБ спад сигнала.

Рис. 2. Графики зависимости отношения мощностей от амплитуды сигнала (а) и АЧХ измеренной структуры (б)

Выводы

В представленной работе интегральный электрооптический модулятор из тонкопленочного ниобата лития на изоляторе обладает добротностью, достигающей 18000, и пропускной способностью до 3,9 ГГц. Этот модулятор потенциально может работать при криогенных температурах. Будущие исследования будут направлены на увеличение добротности таких структур, создание фазовых модуляторов и интеграцию с сверхпроводниковыми однофотонными детекторами на одном чипе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Amiri, I. S.** Interaction between optical sources and optical modulators for high-speed optical communication networks / I. S. Amiri, A. N. Z. Rashed, P. Yupapin // Journal of Optical Communications. — 2022. — Т. 43. — № 4. — С. 625–632.
- [2] **Arrazola, J. M.** Quantum circuits with many photons on a programmable nano-photonics chip / J.M. Arrazola, V. Bergholm, K. Bradler, T.R. Bromley, M.J. Collins, I. Dhand, A. Fumagalli, T. Gerrits, A. Goussev, L.G. Helt, J. Hundal, T. Isacsson, R.B. Israel, J. Izaac, S. Jahangiri, R. Janik, N. Killoran, S.P. Kumar, J. Lavoie, A.E. Lita, D.H. Mahler, M. Menotti, B. Morrison, S.W. Nam, L. Neuhaus, H.Y. Qi, N. Quesada, A. Repeatingon, K.K. Sabapathy, M. Schuld, D. Su, J. Swinerton, A. Szava, K. Tan, P. Tan, V.D. Vaidya, Z. Vernon, Z. Zabaneh, Y. Zhang // Nature. — 2021. — Т. 591. — № 7848. — С. 54–60.
- [3] **Ковалюк, В.В.** Волноводный сверхпроводниковый однофотонный детектор для фотонного и ионного квантовых процессоров и нейроморфных вычислений / В. В. Ковалюк, И. О. Венедиктов, К. О. Седых, С. С. Святодух, С. Хыдырова, К. М. Моисеев, И. Н. Флоря, А. И. Проходцов, В. С. Галанова, Д. М. Кобцев, А. Ю. Кузин, А. Д. Голиков, Г. Н. Гольцман // Известия вузов. Радиофизика. — 2023. — Т. 66. — № 11. — С. 927–985.
- [4] **Bahadori, M.** Ultra-efficient and fully isotropic monolithic microring modulators in a thin-film lithium niobate photonics platform / Meisam Bahadori, Yansong Yang, Ahmed E.Hassanien, Lynford L. Goddard, Songbingong // Optics Express. — 2020. — Т. 28. — № 20. — С. 29644–29661.
- [5] **Tao, J.** Broadband Thin-Film Lithium Niobate Electro-Optic Modulator / Jikun Liu, Lun Qu, Wei Wu, Chunyan Jin, Zhihao Chen, Zhidong Gu, Weiye Liu, Chenxiong Wang, Dahuai Zheng, Hongde Liu, Wei Cai, Mengxin Ren* and Jingjun Xu // Photonics. — MDPI. — 2024. — Т. 11. — № 4. — С. 325.
- [6] **Celler, G. K.** Etching of silicon by the RCA standard clean 1 / G. K. Celler, D. L. Barr, J. M. Rosamilia // Electrochemical and Solid-State Letters. — 1999. — Т. 3. — № 1. — С. 47.

Study of bandwidth of electro-optical modulator on ring resonator made of thin-film lithium niobate on an insulator

D. M. Kobtsev^{1,2}, I. O. Venediktov^{1,2}, S. S. Svyatodukh^{1,3}, A. D. Golikov³, V. V. Kovalyuk^{1,2}, G. N. Goltsman^{1,4}

¹National Research University Higher School of Economic, Moscow, Russia

²University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

³Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia

⁴Russian Quantum Center, Moscow, Russia

The paper shows the results of measurements of the main characteristics and describes the technological process of manufacturing electro-optical modulators from thin-film lithium niobate on an insulator in the form of ring microresonators. The developed route made it possible to obtain resonators with a Q-factor of 18000. The performance of the manufactured devices in the telecommunication wavelength range (C-band) was 3.9 GHz (at a voltage of 5 V), and the amplitude modulation coefficient was 49 %.

Keywords: Integrated optics, Active optical elements, Electro-optic modulator

Интегрально-оптический СВЧ-модулятор на основе квази-одномодового волновода на подложке тонкопленочного ниобата лития

М. В. Парфенов, А. В. Варламов, И. В. Ильичев, А. А. Ускова, Ю. М. Задиранов, А. В. Тронеv, П. М. Агрузов, А. В. Шамрай

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Была предложена конфигурация интегрально-оптического фазового СВЧ-модулятора на подложке тонкопленочного ниобата лития с канальным оптическим волноводом, имеющим достаточно большую ширину для изготовления стандартной контактной фотолитографией. Квази-одномодовый режим распространения излучения в нем обеспечивается за счет модовой фильтрации на близко расположенных металлических электродах, поглощающих мощность высших оптических мод. Близкое расположение электродов обеспечивает высокую эффективность модуляции с параметром $V\pi L$ менее 4 В·см. Экспериментально продемонстрирована высокочастотная модуляция оптического излучения в полосе свыше 30 ГГц с длиной волны 1550 нм.

Ключевые слова: Интегральная оптика, Модуляторы, Ниобат лития, Оптические волноводы

Актуальным и современным направлением исследований в интегральной оптике на ниобате лития (LiNbO_3) является изготовление устройств на основе гибридных подложек токопленочного ниобата лития (ТПНЛ), которые представляют собой тонкие монокристаллические пленки LiNbO_3 субмикронной толщины, сформированные на буферном слое аморфного диоксида кремния на подложке из кремния или ниобата лития [1, 2].

Волноводы, формируемые на основе ТПНЛ, имеют высокий контраст показателя преломления, что позволяет существенно миниатюризировать волноводных схемы до размеров, сопоставимых со схемами кремниевой фотоники, при этом сохраняя ряд ценных свойств ниобата лития, в первую очередь — линейный электрооптический эффект (эффект Погкельса), используемый для высокочастотной модуляции света [1].

Несмотря на новые возможности интегрально-оптических устройств на основе ТПНЛ, для их изготовления требуется более точное литографическое оборудование — электронная литография, плохо подходящая для производства. Пространственное разрешение широко используемой контактной фотолитографии, применяющейся для изготовления волноводных схем на объемных подложках ниобата лития, не позволяет воспроизводимо формировать волноводные каналы размером менее 1 мкм, при которых тонкопленочные волноводы остаются одномодовыми при работе на стандартной телекоммуникационной длине волны света $\lambda = 1,5$ мкм. В данной работе была исследована возможность изготовления эффективных СВЧ-модуляторов на основе тонкопленочного ниобата лития с шириной оптического волновода более 1 мкм, т. е. такой, которая может быть изготовлена с использованием стандартной контактной фотолитографии без применения специального дополнительного оборудования.

Была предложена концепция модовой фильтрации. Для обеспечения работы широкого и, как следствие, многомодового волновода, в квази-одномодовом режиме были использованы электроды модулятора, близко сдвинутые к краям оптического волновода. При этом, как было теоретически предсказано и экспериментально продемонстрировано в проведенном отдельно исследовании [3], металлические электроды позволяют вносить в высшие моды оптического волновода сильное затухание ввиду их слабой локализации в волноводном канале, по сравнению с фундаментальной модой. Ранее данный подход был продемонстрирован для волновода, окруженного низкочастотными электродами. На основе полученных из него результатов была спроектирована топология высокочастотного интегрально-оптического модулятора. Оптический волновод модулятора был сформирован травлением тонкой пленки ниобата лития в х-ориентации на глубину $h = 300$ нм при исходной толщине кристаллической пленки $H = 700$ нм с шириной гребня $W = 2$ мкм (рис. 1). Толщина буферного слоя диоксида кремния для выбранной подложки составляла $h_{\text{SiO}_2} = 2$ мкм. Электроды модулятора были изготовлены из серебра (Ag) толщиной $h_e = 2$ мкм в копланарной конфигурации, при этом величина межэлектродного зазора модулятора на участке взаимодействия света с электродами была выбрана $G = 5$ мкм, ширина центрального электрода — $W_e = 10$ мкм. В одном из межэлектродных зазоров копланарных электродов располагался оптический волновод. Согласно ранее полученным результатам, в такой конфигурации электроды могут обеспечивать подавление высших мод оптического излучения на уровне > 20 дБ/см [3]. Ввод света в оптический волновод производился методом торцевой стыковки оптического волновода чипа с линзированными оптическими волокнами, ввод и терминирование модулирующего свет СВЧ-излучения производились при помощи

СВЧ зондов, для которых на концевых участках копланарных электродов были сформированы специальные площадки. Измерение производилось для ТЕ-моды оптического излучения, для которой пленка ниобата лития имеет наибольший электрооптический коэффициент. Были изготовлены образцы двух конфигураций модуляторов, различающихся длинами электрооптического взаимодействия $L=5$ и 10 мм.

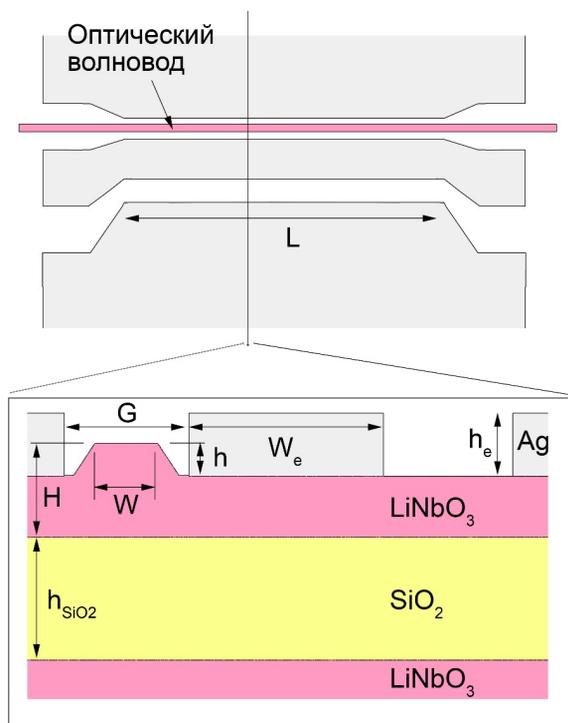


Рис. 1. Конфигурация исследуемого фазового модулятора (вид сверху и вид сечения на участке электрооптического взаимодействия)

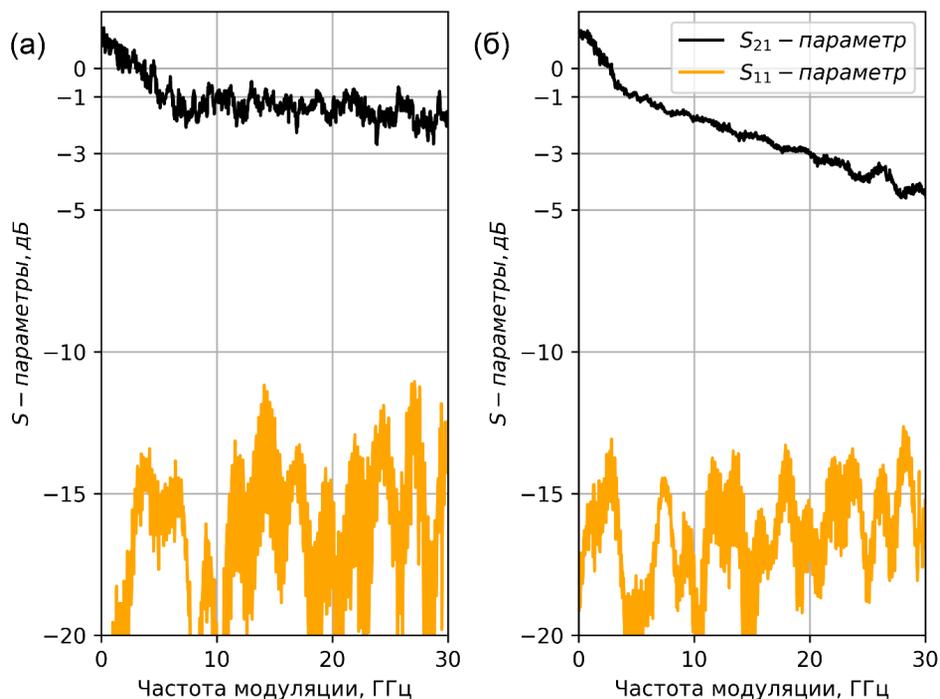


Рис. 2. Примеры экспериментально измеренных зависимостей S -параметров модуляторов от частоты модуляции при длине электрооптического взаимодействия (а) 5 мм и (б) 10 мм

Исследование электрооптических характеристик изготовленных образцов модуляторов проводилось в волоконно-оптическом интерферометре, в одно из плеч которого был помещен исследуемый фазовый модулятор. Была измерена частотная зависимость передаточной характеристики модуляторов (S_{21} -параметр, рис. 2) для двух длин электрооптического взаимодействия, при этом продемонстрирована возможность эффективной модуляции на частотах свыше 30 ГГц (для модулятора с $L = 5$ мм) при обратных отражениях модулирующего СВЧ сигнала (S_{11} -параметр) на уровне менее 10 дБ.

Впервые продемонстрирована сверхширокополосная высокочастотная модуляция с использованием фазового модулятора изготовленного с использованием контактной фотолитографии на основе концепции модовой фильтрации на металлических электродах. Экспериментально подтверждена работоспособность изготовленных фазовых СВЧ-модуляторов и продемонстрирована эффективная модуляция оптического излучения в полосе частот свыше 30 ГГц.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Петров, В.М.** Широкополосные интегрально-оптические модуляторы: достижения и перспективы развития / В.М. Петров, П.М. Агрозов, В.В. Лебедев, И.В. Ильичев, А.В. Шамрай // УФН. — 2021. — Т. 191. — С. 760–780.
- [2] **Chen G.** Advances in lithium niobate photonics: development status and perspectives / G. Chen, N. Li, J.D. Ng, H.-L. Lin, Y. Zhou, Y. H. Fu, L. Y. T. Lee, Y. Yu, A.-Q. Liu, A.J. Danner // Advanced Photonics. — 2022. — Vol. 4. — 034003. — DOI: 10.1117/1.AP.4.3.034003.
- [3] **Parfenov, M.** Metal Electrodes for Filtering the Localized Fundamental Mode of a Ridge Optical Waveguide on a Thin Lithium Niobate Nanofilm / M. Parfenov, P. Agrozov, A. Tronev, I. Ilichev, A. Usikova, Y. Zadiranov, A. Shamrai // Nanomaterials. — 2023. — Vol. 13. — 2755. — DOI: 10.3390/nano13202755.

Integrated optical high - frequency modulator based on quasi - single - mode optical waveguide on thin - film lithium niobate substrate

M.V. Parfenov, A.V. Varlamov, I.V. Ilichev, A.A. Usikova, Y.M. Zadiranov, A.V. Tronev, P.M. Agrozov, A.V. Shamrai

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

Configurations of integrated optical high-frequency phase modulators based on thin-film lithium niobate substrates with a wide optical waveguide suitable for chip fabrications by means of standard contact photolithography were investigated. Single-mode regime of operation of a waveguide was obtained with help of metal electrodes placed near waveguide edge which provide differential absorption of high-order optical modes. Effective high-frequency modulation in fabricated modulator samples was demonstrated. The archived modulation bandwidth was higher than 30 GHz.

Keywords: *Integrated optics, Modulators, Lithium niobate, Optical waveguides*

Влияние анизотропии на спектральную характеристику оптического резонатора из ниобата лития

Д. Н. Москалев¹, В. В. Криштоп¹

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Настоящая статья посвящена разработке матричной модели анизотропного кольцевого резонатора. С этой целью сначала определяются матрицы для делителя и кольцевого волновода и после их объединения получается матрица кольцевого резонатора. Элементы матрицы передачи кольцевого волновода определяются с помощью теории связанных мод. Таким образом, разработанная модель учитывает изменение постоянных распространения фундаментальных мод, и связь между модами вследствие наличия анизотропии.

Ключевые слова: Оптический резонатор, Модовая гибридизация, Спектральная характеристика, Ниобат лития

Введение

Для задач моделирования анизотропных кольцевых резонаторов в основном используется трехмерный метод конечных разностей во временной области (КРВО). Более эффективным с вычислительной точки зрения и сравнительно простым способом моделирования кольцевых резонаторов является теория связанных мод (ТСМ). В статье [1] разработана ТСМ на основе подходов квантовой механики и предложена модель изогнутого волновода, идея которой заключается в замене изогнутого волновода эквивалентным прямым волноводом тензор диэлектрической проницаемости, которого зависит от угла поворота исходного волновода. В настоящей статье предложена математическая модель анизотропного кольцевого резонатора на основе T-матриц и ТСМ, разработанной Маркузе в статье [2].

1. Модель кольцевого резонатора

Рассматривается классическая all-pass конфигурацию кольцевого резонатора, представляющую собой область связи и кольцевой волновод (рис. 1).

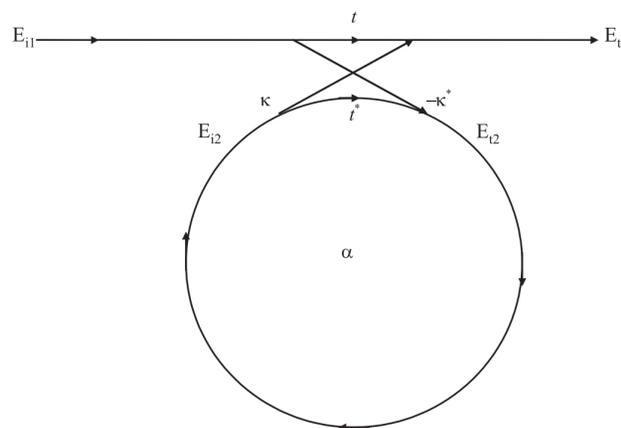


Рис. 1. Схема кольцевого резонатора

Методика вывода уравнений, описывающих анизотропный кольцевой резонатор, следует подходу, проделанному в [3] для изотропного кольцевого резонатора. Матрица передачи делителя для двух поляризаций записывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} E_{i1}^{TE} \\ E_{i2}^{TE} \\ E_{i1}^{TM} \\ E_{i2}^{TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{TE} & k_{TE} & 0 & 0 \\ -k_{TE}^* & k_{TE}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t_{TE} & k_{TE} \\ 0 & 0 & -k_{TE}^* & -k_{TE}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}^{TE} \\ E_{i2}^{TE} \\ E_{i1}^{TM} \\ E_{i2}^{TM} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где t_{TE} , t_{TM} , k_{TE} , k_{TM} — амплитудные коэффициенты прохождения и перекачки для TE- и TM-мод.

При записи матричного уравнения (1) было сделано допущение о малости перекрестной перекачки мощности из моды в моду с противоположными поляризациями. Матрица передачи кольца, описывающая процесс распространения излучения по кольцу и перекачки мощности из одной моды в другую, будет определяться следующим матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} E_{i2}^{TE} \\ E_{i2}^{TM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i2}^{TE} \\ E_{i2}^{TM} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где T_{11} и T_{22} — коэффициенты прямой передачи ТЕ- и ТМ-моды соответственно; T_{12} и T_{21} — коэффициенты перекрестной передачи из ТЕ- в ТМ-моду и из ТМ- в ТЕ-моду. После объединения матриц и приведения подобных уравнения для излучения, циркулирующего в кольцевом резонаторе, и для излучения, проходящего кольцевой резонатор, принимают вид:

$$E_{i2}^{TE} = T_{11} \frac{-k_{TE}^* (1 - t_{TM}^* T_{22}) E_{i1}^{TE} - k_{TM}^* t_{TE}^* T_{12} E_{i1}^{TM}}{(1 - t_{TE}^* T_{11})(1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}} + T_{12} \frac{-k_{TM}^* (1 - t_{TE}^* T_{11}) E_{i1}^{TM} - k_{TE}^* t_{TM}^* T_{21} E_{i1}^{TE}}{(1 - t_{TE}^* T_{11})(1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}}; \quad (3)$$

$$E_{i2}^{TM} = T_{21} \frac{-k_{TE}^* (1 - t_{TM}^* T_{22}) E_{i1}^{TE} - k_{TM}^* t_{TE}^* T_{12} E_{i1}^{TM}}{(1 - t_{TE}^* T_{11})(1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}} + T_{22} \frac{-k_{TM}^* (1 - t_{TE}^* T_{11}) E_{i1}^{TM} - k_{TE}^* t_{TM}^* T_{21} E_{i1}^{TE}}{(1 - t_{TE}^* T_{11})(1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}}; \quad (4)$$

$$E_{i1}^{TE} = t_{TE} E_{i1}^{TE} + \frac{-|k_{TE}|^2 E_{i1}^{TE} [(1 - t_{TM}^* T_{22}) T_{11} + t_{TM}^* T_{21} T_{12}] - k_{TE} k_{TM}^* E_{i1}^{TM} [(1 - t_{TE}^* T_{11}) T_{12} + t_{TE}^* T_{11} T_{12}]}{(1 - t_{TE}^* T_{11})(1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}}; \quad (5)$$

$$E_{i1}^{TM} = t_{TM} E_{i1}^{TM} + \frac{-k_{TM} k_{TE}^* E_{i1}^{TE} [(1 - t_{TM}^* T_{22}) T_{21} + t_{TM}^* T_{21} T_{22}] - |k_{TM}|^2 E_{i1}^{TM} [(1 - t_{TE}^* T_{11}) T_{22} + t_{TE}^* T_{12} T_{21}]}{(1 - t_{TE}^* T_{11})(1 - t_{TM}^* T_{22}) - t_{TE}^* T_{12} t_{TM}^* T_{21}}. \quad (6)$$

Элементы матрицы передачи кольца могут быть рассчитаны с помощью методики, описанной в [4].

Заключение

Разработанная модель позволяет рассчитывать спектральную характеристику кольцевого резонатора на основе анизотропного в плоскости пластины материала. Для валидации модели были использованы экспериментально данные из [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Cortes-Herrera, L. Coupled-mode theory of the polarization dynamics inside a microring resonator with a uniaxial core / L. Cortes-Herrera, X. He, J. Cardenas, GP. Agrawal // Physical Review A. — 2021. — Т. 103. — № 6. — С. 063517.
- [2] Marcuse, D. Coupled-mode theory for anisotropic optical waveguides / D. Marcuse // The Bell System Technical Journal. — 1975. — Т. 54. — № 6. — С. 985–995.
- [3] Rabus, D. G. Integrated ring resonators / D.G. Rabus. — Heidelberg: Springer, 2007. — P. 269.
- [4] Москалев, Д.Н. Моделирование межмодовой связи в изогнутых волноводах на основе тонкопленочного ниобата лития с помощью теории связанных мод / Д.Н. Москалев, Е.Д. Вобликов, В.В. Криштоп, В.А. Максименко, А.Б. Волинцев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2024.
- [5] Pan, A. Fundamental mode hybridization in a thin film lithium niobate ridge waveguide / A. Pan, C. Hu, C. Zeng, J. Xia // Optics express. — 2019. — Т. 27. — № 24. — С. 35659–35669.

The effect of anisotropy on the spectral characteristic of a lithium niobate optical resonator

D. N. Moskalev¹, V. V. Krishtop¹

¹ Perm State National Research University, Perm, Russia

This article is devoted to the development of a matrix model of an anisotropic ring resonator. For this purpose, the matrices of the divider and ring waveguide are first defined, and after combining them, the matrix of the ring resonator is obtained. The transmission matrix elements of the ring waveguide are determined using the coupled mode theory. Thus, the developed model considers the change in propagation constants of fundamental modes and the coupling between modes due to anisotropy.

Keywords: Optical resonator, Mode hybridization, Spectral characteristic, Lithium niobate

Подавление антифазных границ в GaAs, выращенном на подложке «кремний - на - изоляторе» через буферные слои $A^{III}B^V/Ge$

А. А. Сушков¹, Д. В. Юрасов², Р. Н. Крюков¹, Д. А. Павлов¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

*Сформированы и исследованы гетероструктуры $A^{III}B^V/Ge/Si$ на подложке «кремний-на-изоляторе» для оптимизации параметров роста слоев $A^{III}B^V$ на основе GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии. Отечественные подложки «кремний-на-изоляторе» изготовлены по технологии Smart Cut. Слои Ge/Si выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием режима двухстадийного роста Ge. Установлены параметры роста эпитаксиальных слоев $A^{III}B^V$, способствующие аннигиляции основной плотности антифазных границ в пределах толщины буферных слоев, и параметры *in-situ* отжига, способствующие уменьшению плотности антифазных границ. Впервые продемонстрирована фотолюминесценция при комнатной температуре от квантовых ям InGaAs/GaAs гетероструктуры $A^{III}B^V/Ge/Si$, выращенной на подложке «кремний-на-изоляторе».*

Ключевые слова: Радиофотоника, Кремниевая фотоника, Гибридная гетероструктура GaAs/Ge/Si, «Кремний-на-изоляторе», МОС-гидридная эпитаксия, Просвечивающая электронная микроскопия, Атомно-силовая микроскопия

Создание энергоэффективных оптических межсоединений с высокой скоростью передачи данных и низкой потерей сигнала в структурах типа «Система на Кристалле» и «Система в Корпусе», которые используются при создании систем обработки больших объемов данных является актуальной задачей радиофотоники и кремниевой фотоники [1]. Для развития этого направления необходимо создание новой технологической платформы, в которой будут интегрированы источники излучения, другие элементы фотоники, а также КМОП электроники в одном кристалле. На пути создания такой платформы лежит множество еще не до конца решенных физических, материаловедческих и технологических задач, особенно когда за кремниевую основу используется не гомогенная пластина Si, а структура «кремний-на-изоляторе» с рядом преимуществ [2]. Одна из проблем — формирование эпитаксиальными методами на подложках класса «кремний-на-изоляторе» гетероструктур $A^{III}B^V$ на основе GaAs высокого кристаллического качества. Фундаментальные особенности гетероэпитаксии $A^{III}B^V$ на поверхности кремния являются основными причинами низкого кристаллического качества полупроводников $A^{III}B^V$. К таким особенностям относятся различные дефекты в числе прочего и те, которые образуются в слоях $A^{III}B^V$ в процессе роста, например, прорастающие дислокации, антифазные границы [3]. Недавние исследования продемонстрировали, что технология роста $A^{III}B^V$ на кремнии через буферный слой Ge представляется актуальной как для уменьшения толщины буферных слоев [4], так и для уменьшения плотности прорастающих дислокаций [5]. Однако при гетероэпитаксии на платформе с буферным слоем Ge требуется поиск и развитие промышленно-ориентированных подходов для подавления антифазных границ.

Цель работы — выявление закономерностей формирования эпитаксиальных слоев в гетероструктурах $A^{III}B^V$ на основе GaAs, выращенных на платформе Ge/Si/КНИ (001), для уменьшения плотности антифазных границ.

Сформированы гетероструктуры $A^{III}B^V$ (образцы А и В) на основе GaAs на одинаковых платформах Ge/Si/КНИ (001) методом МОС-гидридной эпитаксии. Платформы Ge/Si/КНИ (001) созданы по отработанной ранее методике, описанной в статье [6]. Основные отличительные особенности процессов роста $A^{III}B^V$ заключаются в следующем. В образце А по сравнению с образцом В использовались низкие скорости роста буферных слоев $A^{III}B^V$ при сохранении отношения потоков V/III, а также отсутствовала выдержка при высокой температуре во время термоциклического отжига буферных слоев $A^{III}B^V$.

При исследовании поперечного среза образцов А и В методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) обнаружено, что параметры роста буферных слоев $A^{III}B^V$ — отношение потоков V/III=80, температура роста 690 °С — способствуют аннигиляции основной плотности антифазных границ в пределах их толщины. При этом чем ниже скорость роста буферных слоев $A^{III}B^V$, тем при меньшей толщине происходит аннигиляция.

Исследование образцов А и В комплексом методов: ПЭМ, атомно-силовая микроскопия и *in-situ* измерения отражательной способности — позволило установить следующее. Отжиг при температуре ≈ 725 °С во время паузы после роста буферных слоев $A^{III}B^V$ с общим временем ≈ 30 мин способствует уменьшению плотности антифазных границ, а также модификации поверх-

ности таким образом, что вклад в дальнейший рост от наиболее благоприятного для зарождения антифазных доменов ступенчатого режима роста становится преобладающим над 2D-островковым. Все это приводит к выравниванию фронта роста и, как следствие, к уменьшению среднеквадратичной шероховатости поверхности готовой гетероструктуры.

Используя оптимизированные параметры роста $A^{III}B^V$, удалось впервые продемонстрировать фотолуминесценцию при комнатной температуре гетероструктуры $A^{III}B^V$ на основе квантовых ям InGaAs/GaAs, выращенной на платформе Ge/Si/КНИ (001).

Представленные результаты являются научным заделом для дальнейшего развития методов подавления антифазных границ, внедренных в процесс роста слоев $A^{III}B^V$ на платформе Ge/Si/КНИ (001), в двух направлениях: увеличение эффективности и уменьшение толщины буферных слоев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90229. Исследование поддержано стипендией Президента РФ (СП-1790.2022.5).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Miller, D. A. B.** Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips / D. A. B. Miller // Proc IEEE Inst Electr Electron Eng. — 2009. — Vol. 97. — № 7. — P. 1166–1185. — DOI:10.1109/JPROC.2009.2014298.
- [2] **Celler, G. K.** Frontiers of silicon-on-insulator / G. K. Celler, S. Cristoloveanu // J. Appl. Phys. — 2003. — Vol. 93. — № 9. — P. 4955–4978. — DOI:10.1063/1.1558223.
- [3] **Park, J.-S.** Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon / J.-S. Park, M. Tang, S. Chen, H. Liu // Crystals. — 2020. — Vol. 10. — № 12. — P. 1163. — DOI:10.3390/cryst10121163.
- [4] **Yang, J.** All-MBE grown InAs/GaAs quantum dot lasers with thin Ge buffer layer on Si substrates / J. Yang, Z. Liu, P. Jurczak, M. Tang, K. Li, S. Pan, A. Sanchez, R. Beanland, J.-C. Zhang, H. Wang, F. Liu, Z. Li, S. Shutts, P. Smowton, S. Chen, A. Seeds, H. Liu // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2021. — Vol. 54. — P. 035103. — DOI:10.1088/1361-6463/abbb49.
- [5] **Wang, B.** Effectiveness of InGaAs/GaAs superlattice dislocation filter layers epitaxially grown on 200 mm Si wafers with and without Ge buffers / B. Wang, G. J. Syaranamual, K. H. Lee, S. Bao, Y. Wang, K. E. K. Lee, E. A Fitzgerald, S. J Pennycook, S. Gradecak, J. Michel // Semicond. Sci. Technol. — 2020. — Vol. 35. — № 9. — P. 095036. — DOI:10.1088/1361-6641/ab9a16.
- [6] **Sushkov, A. A.** Comparison of III-V Heterostructures Grown on Ge/Si, Ge/SOI, and GaAs / A. A. Sushkov, D. A. Pavlov, A. I. Andrianov, V. G. Shengurov, S. A. Denisov, V. Yu. Chalkov, R. N. Kriukov, N. V. Baidus, D. V. Yurasov, A. V. Rykov // Semiconductors. — 2022. — Vol. 56. — № 2. — P. 122–133. — DOI:10.1134/S1063782622010171.

Suppression of anti-phase boundary defects in GaAs grown on a silicon-on-insulator substrate through $A^{III}B^V$ /Ge buffer layers

A. A. Sushkov¹, D. V. Yurasov², R. N. Kryukov¹, D. A. Pavlov¹

¹ Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

² Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

$A^{III}B^V$ /Ge/Si-heterostructures on a silicon-on-insulator substrate are fabricated and investigated to optimize the growth of GaAs-based $A^{III}B^V$ layers by metalorganic chemical vapor deposition. The domestic silicon-on-insulator substrate is fabricated via Smart Cut technology. Ge/Si layers are grown by molecular beam epitaxy via two-stage growth. The parameters for $A^{III}B^V$ growth and in-situ annealing have been determined, contributing to a reduction in the density of anti-phase boundaries. Photoluminescence at room temperature from InGaAs/GaAs quantum wells of the $A^{III}B^V$ /Ge/Si heterostructure grown on a silicon-on-insulator substrate has been demonstrated for the first time.

Keywords: Microwave photonics, Silicon photonics, GaAs/Ge/Si hybrid heterostructure, Silicon-on-insulator, Metalorganic chemical vapor deposition, Transmission electron microscopy, Atomic force microscopy

Интегральный плазмонный электро-абсорбционный модулятор на платформе кремний-на-изоляторе

Д. С. Земцов, И. А. Пшеничнюк, А. К. Земцова, А. С. Смирнов, Д. М. Жигунов, К. Н. Гарбузов, С. С. Косолобов, В. П. Драчев

Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

Создан интегральный кремниевый электро-абсорбционный модулятор в виде гибридного плазмонного волновода со слоем прозрачного проводящего оксида индия олова. Управление концентрацией свободных электронов в оксиде индия олова обеспечивает переключаемую связь фотонной и плазмонной мод, а также влияет на их параметры. Изготовленные структуры продемонстрировали полосу модуляции 40 ГГц и экстинкцию 2 дБ. Показаны конфигурации плазмонного интерфейса, подходящие для модуляции ТЕ или ТМ моды. Все изготовленные модуляторы имеют длину менее 15 мкм.

Ключевые слова: Электрооптический модулятор, Прозрачный проводящий оксид, Микроволновая фотоника, Фотонные интегральные схемы, Кремний-на-изоляторе

Кремний-на-изоляторе, вероятно, является наиболее перспективной платформой для построения компактных интегральных систем микроволновой фотоники. Во многом это связано с хорошо отработанными процессами производства комплементарных структур металл — оксид — полупроводник (КМОП) на основе кремния. К тому же благодаря высокому контрасту показателей преломления материалов волновода и окружающей среды, кремниевые фотонные интегральные схемы имеют малые размеры по сравнению с устройствами на других технологических платформах. Еще одним важным преимуществом контраста показателей преломления является высокая эффективность периодических структур, таких как решетки ввода/вывода. Для простых решеток эффективность стыковки может превышать -3 дБ, в то время как для сложных структур эффективность может быть выше -1 дБ [1, 2].

Электрооптическую модуляцию принято считать сильной стороной кремниевой фотоники благодаря хорошо изученному и активно применяемому на практике эффекту плазменной дисперсии в p - n и p - i - n кремниевых волноводных структурах [3]. У этого подхода есть несколько недостатков. Использование легированного кремния в качестве волновода приводит к повышенным потерям излучения. При этом полоса модуляции для таких структур обычно не превышает 10 ГГц. Кремниевые модуляторы на p - n переходе имеют длину в несколько миллиметров, что, во-первых, требует согласования групповых скоростей СВЧ и оптической волн в области модуляции, а, во-вторых, несоизмерно с многими другими устройствами кремниевой фотоники. Применение интерферометров или резонаторов может способствовать уменьшению размеров структуры при сохранении глубины модуляции, однако, предъявляет повышенные требования к стабилизации температуры, напряжения смещения и ограничивает допустимую полосу входного излучения.

В последние годы активно исследуются интегральные структуры, позволяющие с использованием связанного состояния фотонной и плазмонной мод осуществлять электрооптическую модуляцию в структуре со слоем прозрачного проводящего оксида (ППО), например, такого как оксид индия-олова (ИТО). Такие модуляторы обладают размерами порядка 10 мкм и потенциально способны работать с полосой модулирующего сигнала в 40 ГГц и более [4]. В большинстве модуляторов на основе ППО на кремниевом волноводе формируется конденсатор ППО/ SiO_2 /Au. Мода кремниевого волновода при попадании в область модуляции частично переходит в поверхностную плазмонную моду, поле которой в значительной степени локализовано внутри слоя ППО. Прикладывая напряжение к конденсатору, можно управлять концентрацией электронов в заряженном слое ППО на границе с SiO_2 . Преобразование волноводной моды в плазмонную и их затухание в зависимости от напряжения на конденсаторе и параметров заряженного слоя обеспечивает амплитудную модуляцию оптического сигнала.

Для формирования плазмонного интерфейса нужно, чтобы поверхность металла была перпендикулярна плоскости колебаний электрического поля. Поэтому обычно используют конфигурацию планарного конденсатора и ТМ волноводной моды [5]. Однако, модуляция ТЕ волноводной моды предполагает вертикально расположенный плазмонный интерфейс.

В этой работе мы демонстрируем две конфигурации плазмонных модуляторов на основе ИТО, подходящих для модуляции ТЕ и ТМ мод. Для модуляции ТЕ моды используется специальный плавниковый интерфейс, обеспечивающий связь фотонной и поверхностной плазмонной мод через промежуточное угловое плазмонное состояние [6, 7]. Модулятор ТМ волноводной моды в свою очередь представляет собой планарный конденсатор. На рисунке 1 схематично показаны перпенди-

кулярные направлению распространения излучения поперечные сечения ТЕ (слева) и ТМ (справа) модуляторов.



Рис. 1. Схематические изображения поперечных сечений ТЕ (слева) и ТМ (справа) модуляторов. Посередине изображены обозначения использованных материалов

Модуляторы были изготовлены с использованием электронно-лучевой литографии, травления в индуктивно связанной плазме и электронно-лучевого осаждения. Изготовленные структуры исследовались в составе аналогового оптического тракта, включающего в себя перестраиваемый лазер Thorlabs TLX1, эрбиевый усилитель Keopsys CEFA-HG и фотодетектор Finisar XPDV2150R. Модулятор подключался в тракт с помощью линзованных оптических волокон и СВЧ зонда. СВЧ характеристики оценивались с помощью векторного анализатора цепей Keysight N5224A. Нормированный S21 отклик модулятора в ТЕ конфигурации показан на рис. 2.

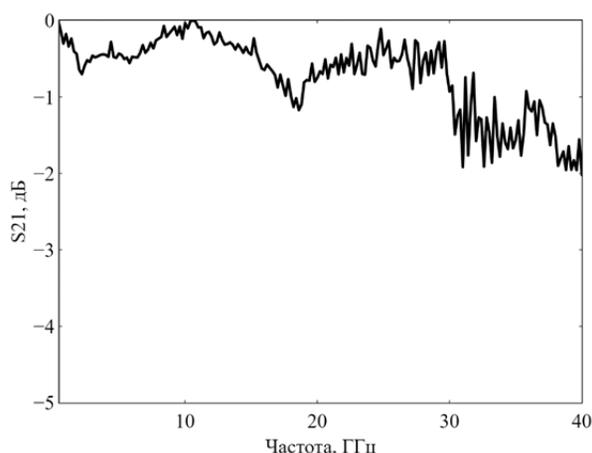


Рис. 2. Нормированный S21 отклик модулятора в ТЕ конфигурации [8]

Изготовленные и экспериментально исследованные модуляторы ТЕ моды обладают полосой модуляции более 40 ГГц и экстинкцией до 2 дБ. Использование ТМ моды позволяет увеличить связь между фотонной и плазмонной модами, что сказывается на более высокой экстинкции около 3 дБ, однако, приводит к ограничению полосы модуляции. Длина области модуляции созданных структур менее 15 мкм.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zemtsov, D. S.** Broadband silicon grating couplers with high efficiency and a robust design / D. S. Zemtsov, D. M. Zhigunov, S. S. Kosolobov, A. K. Zemtsova, M. Puplauskis, I. A. Pshenichnyuk, V. P. Drachev // *Optics Letters*. — 2022. — Vol. 47. — № 13. — P. 3339–3342.
- [2] **Zaoui, W. S.** Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits / W. S. Zaoui, A. Kunze, W. Vogel, M. Berroth, J. Butschke, F. Letzkus, J. Burghartz // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 4. — № 2. — P. 518–526.
- [3] **Reed, G. T.** Silicon optical modulators / G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, D. J. Thomson // *Nature Photonics*. — 2010. — Vol. 22. — № 2. — P. 1277–1286.
- [4] **Huang, Y.** High-bandwidth Si/In2O3 hybrid Plasmonic waveguide modulator / Y. Huang, J. Zheng, B. Pan, L. Song, K.-A. Chen, Z. Yu, H. Ye, D. Dai // *APL Photonics*. — 2022. — Vol. 7. — № 5. — P. 051301.
- [5] **Pshenichnyuk, I. A.** Nonlinear optical switching in hybrid plasmonic waveguides / I.A. Pshenichnyuk, F. Yousry, D.S. Zemtso, S. S. Kosolobov, V. P. Drachev // *Physical Review B*. — 2024. — Vol. 109. — № 3. — P. 035401.

- [6] **Zemtsov, D. S.** Plasmon-Assisted Si-ITO Integrated Electro-Optical Rib-Shape Modulator / D. S. Zemtsov, I. A. Pshenichnyuk, S. S. Kosolobov, A. K. Zemtsova, D. M. Zhigunov, A. S. Smirnov, K. N. Garbuzov, V. P. Drachev // *Journal of Light-wave Technology* — 2023. — Vol. 41. — № 19. — P. 6310–6314.
- [7] **Pshenichnyuk, I. A.** Edge-plasmon assisted electro-optical modulator / I. A. Pshenichnyuk, G. I. Nazarikov, S. S. Kosolobov, A. I. Maimistov, V. P. Drachev // *Physical Review B*. — 2019. — Vol. 100. — № 19 — P. 195434.
- [8] **Косо́лов, С.С.** Кремниевая интегральная фотоника / С.С. Косо́лов, И.А. Пшеничнюк, К.Р. Тази́ев, А.К. Земцова, Д.С. Земцов, А.С. Смирнов, Д.М. Жигунов, В.П. Драчев // *Успехи физических наук* — 2024.

Integrated plasmonic electroabsorption modulator on silicon-on-insulator platform

D. S. Zemtsov, I.A. Pshenichnyuk, A. K. Zemtsova, A. S. Smirnov, D. M. Zhigunov, K. N. Garbuzov, S. S. Kosolobov, V. P. Drachev

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

An integrated silicon electroabsorption modulator in the form of a hybrid plasmonic waveguide with a layer of transparent conductive indium tin oxide has been created. The control of the concentration of free electrons in indium tin oxide provides a switchable coupling between photonic and plasmonic modes, and also affects their parameters. The manufactured structures demonstrated a 40 GHz modulation band and 2 dB extinction. The configurations of the plasmonic interfaces suitable for modulating TE or TM modes are shown. All fabricated modulators have a length of less than 15 microns.

Keywords: *Electro-optical modulator, Transparent conductive oxide, Microwave photonics, Photonic integrated circuits, Silicon-on-insulator*

Свойства нитрида кремния легированного атомами эрбия

И. М. Подлесных^{1,2}, М. С. Ковалев^{1,2}, М. А. Тархов³, С. И. Кудряшов^{1,2}

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³ Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Россия

В настоящей работе было проведено лазерное легирование нитрида кремния атомами эрбия с целью создания источника излучения, интегрированного в материал фотонной интегральной схемы. Был проведен анализ кристаллической структуры образцов, демонстрирующий ее сохранение после лазерной обработки. Посредством анализа концентрации химических элементов было показано перераспределение атомов эрбия по глубине нитрида кремния. К тому же была продемонстрирована широкополосная фотолюминесценция на длине волны 980 нм при длине волны накачки 785 нм.

Ключевые слова: Нитрид кремния, Эрбий, Лазерное легирование, Фотонные интегральные схемы, Источник излучения

1. Введение

Основным материалом для формирования пассивных компонентов фотонных интегральных схем, перспективной платформы для высокоскоростных квантовых вычислений, является нитрид кремния, обладающий оптической прозрачностью и низкими потерями в ближнем инфракрасном диапазоне спектра [1]. Однако в настоящее время остро стоит вопрос о создании активных элементов — приемников и источников излучения, интегрированных в объем материала [2, 3]. Одним из подходов к созданию интегрированного источника излучения в области телекоммуникационных длин волн (1,5 мкм) является лазерное легирование нитрида кремния атомами эрбия. В настоящей работе проведен комплексный анализ химических, структурных и оптических характеристик легированного атомами эрбия нитрида кремния ($\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$).

2. Материалы и методы

В качестве исходной подложки для создания $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ была выбрана пластина монокристаллического кремния *p*-типа с кристаллографической ориентацией (100) толщиной приблизительно 500 мкм. С использованием технологии плазмохимического осаждения из газовой фазы (Plasma Enhanced CVD, PECVD) были последовательно сформированы слои оксида (SiO_2) и нитрида (Si_3N_4) кремния толщиной 4 мкм и 220 нм, соответственно. В дальнейшем с помощью атомно-слоевого осаждения (Plasma-enhanced atomic layer deposition, PE-ALD) на поверхность Si_3N_4 была нанесена пленка эрбия толщиной приблизительно 7–10 нм.

Легирование нитрида кремния атомами эрбия проводилось путем облучения пластины импульсным лазерным излучением в среде инертного газа, аргона, подававшегося в изолированную камеру под давлением 2,5 атм, с целью замещения атмосферных газов. В качестве источника была выбрана лазерная система QX500 (Solar Systems), оснащенной генератором второй гармоники, с центральной длиной волны 532 нм и частотой следования импульсов 20 Гц. В процессе легирования энергия лазерных импульсов составляла 3 мДж, а экспозиция — 5 импульсов в точку.

В дальнейшем структурные, химические и оптические характеристики определялись методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) и фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии.

3. Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены КР спектры образца $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ до и после осуществления лазерного легирования при длине волны возбуждающего излучения 532 нм. Спектры КР образцов до и после легирования характеризуются основными кристаллическими кремниевыми пиками при волновых числах 305, 521 и 955 см^{-1} , что говорит о сохранении кристаллической структуры после лазерной обработки.

Таблица 1 демонстрирует концентрацию основных химических элементов образца $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ до и после осуществления лазерного легирования. EDX анализ был проведен при облучении поверхности пластин электронным пучком при ускоряющем напряжении 5 keV. Расчетная глубина зондирования составляет 145 нм. После лазерного легирования концентрация эрбия значительно уменьшается, что говорит о перераспределении примесных атомов по глубине слоя нитрида кремния.

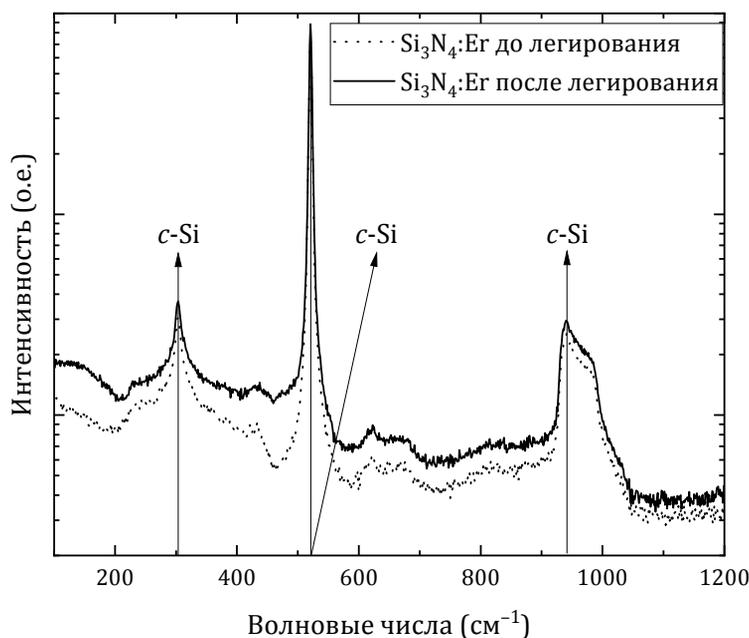


Рис. 1. КР спектры образца $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ до и после лазерного легирования

Таблица 1. Концентрация основных химических элементов образца $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ до и после легирования

Образец	Концентрация				
	Si, ат. %	N, ат. %	Er, ат. %	O, ат. %	C, ат. %
$\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ до легирования	26,27	42,55	12,01	10,81	8,35
$\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ после легирования	42,63	43,25	2,49	6,14	5,49

На рисунке 2 представлен спектр фотолюминесценции образца $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ после осуществления лазерного легирования при длине волны возбуждающего излучения 785 нм, что соответствует накачке эрбия до энергетического уровня $^4\text{I}_{9/2}$. Спектр ФЛ образца демонстрирует широкополосную люминесценцию на длине волны приблизительно 980 нм, что соответствует излучению фотона с уровня $^4\text{I}_{11/2}$, которая предварительно сопровождается безызлучательной релаксацией. Полученный результат по ФЛ демонстрирует потенциальную возможность излучения фотонов с длиной волны 1,5 мкм с уровня $^4\text{I}_{13/2}$ при накачке образца излучением с длиной волны 980 нм (до уровня $^4\text{I}_{11/2}$).

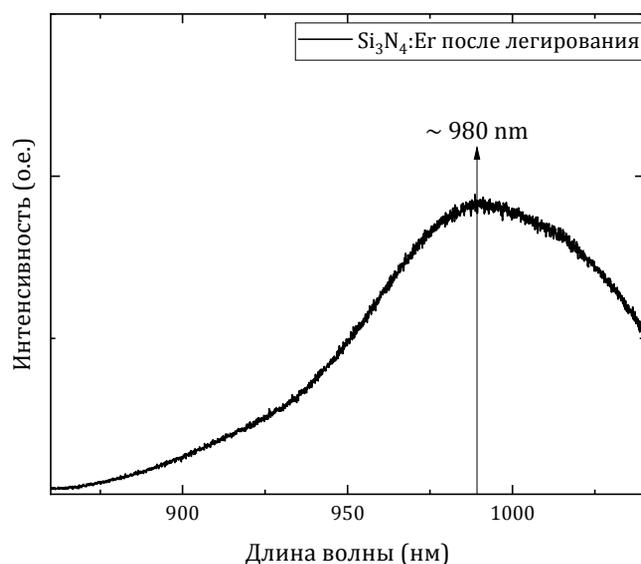


Рис. 2. Спектр ФЛ образца $\text{Si}_3\text{N}_4:\text{Er}$ после лазерного легирования

Заключение

В данной работе были исследованы основные свойства образцов нитрида кремния, легированных атомами эрбия. Анализ КР и ФЛ спектров продемонстрировал сохранения кристаллической структуры образцов после лазерной обработки и широкополосную люминесценцию на длине волны 980 нм, соответственно. Анализ концентрации основных химических элементов показал перераспределение атомов эрбия по глубине подложки нитрида кремния.

Благодарность

Исследование было проведено в рамках Госзадания №FSFN-2024-0019.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ковалев, М. С.** Планарная фотоника ближнего инфракрасного диапазона на основе сверхлегированного кремния: перспективы / М. С. Ковалев, И. М. Подлесных, К. Э. Певчих, С. И. Кудряшов // Фотоника. — 2024. — Том 18. — № 2. — С. 136–151.
- [2] **Xiang, C.** High-performance lasers for fully integrated silicon nitride photonics. / C. Xiang, J. Guo, W. Jin // Nature communications. — 2021. — Vol. 12. — P. 6650.
- [3] **Liang, D.** Recent progress in lasers on silicon. / D. Liang, J. Bowers // Nature photonics. — 2010. — Vol. 4. — P. 511–517.

Characteristics of silicon nitride doped with erbium atoms

I. M. Podlesnykh^{1,2}, M. S. Kovalev^{1,2}, M. A. Tarkhov³, S. I. Kudryashov^{1,2}

¹ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³ Institute of Nanotechnology of Microelectronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In the present work, laser doping of silicon nitride with erbium atoms was carried out in order to create a light source integrated into the photonic integrated circuit material. The crystal structure of the samples was analyzed, demonstrating its preservation after laser treatment. By analyzing the concentration of chemical elements, the redistribution of erbium atoms along the depth of silicon nitride was shown. In addition, broadband photoluminescence was demonstrated at a wavelength of 980 nm at a pump wavelength of 785 nm.

Keywords: Silicon nitride, Erbium, Laser doping, Photonic integrated circuits, Light source

Сравнение двух подходов к расчету интерференционных логических элементов на фотонно-кристаллических структурах

Ю. Ю. Кривошеева¹, Д. Л. Головашкин^{1,2}, В. С. Павельев^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия

² Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

На примере фотонно-кристаллического интерференционного логического элемента «НЕ» на кристалле с Y-образным дефектом рассматривались два подхода к синтезу элементов интегральной оптики: нестохастические методы безградиентной оптимизации и генетический алгоритм. Оба подхода характеризуются решением прямой задачи дифракции FDTD методом. Сравнение рассчитанных результатов демонстрирует преимущество авторского модифицированного генетического алгоритма по сравнению с методами покоординатного спуска и Хука-Дживса. В частности, в среднем, эффективность элемента, рассчитанного при помощи генетического алгоритма в 1,76 раза больше, чем при безградиентной оптимизации.

Ключевые слова: Фотонные кристаллы, Интерференционные логические элементы, Генетический алгоритм, Методы оптимизации

В настоящей работе производится сравнение нестохастических и стохастических подходов к расчету фотонно-кристаллического интерференционного элемента «НЕ»: метода покоординатного спуска [1], метода Хука-Дживса [2] и метода генетической оптимизации по авторской модификации генетического алгоритма [3]. Первая группа методов характеризуется быстрой сходимостью по сравнению с генетической оптимизацией, однако такие методы являются локальными (т. е. не гарантируют нахождение глобального экстремума).

Применение генетического алгоритма для оптимизации Y-образного логического элемента «НЕ» привело к увеличению эффективности с 41 до 95 % [3]. Для расчета эффективности методами линейного поиска в качестве начального приближения брались случайно сгенерированные точки. Результаты такого расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение методов оптимизации для Y-образного элемента «НЕ»

Случай	Эффективность		Количество обращений к функции	
	ГА	0,95		1000
«Линейный поиск»	Метод покоординатного спуска		Метод Хука-Дживса	
	Эффективность	Количество итераций	Эффективность	Количество итераций
Случайная точка 1	0,66	67	0,55	55
Случайная точка 2	0,66	74	0,60	99
Случайная точка 3	0,34	61	0,28	119
Случайная точка 4	0,65	66	0,39	79
Случайная точка 5	0,67	71	0,60	105

Из таблицы видно, что методам линейного поиска требуется в среднем в 12 раз меньше обращений к функции, решающей прямую задачу дифракции, чем генетическому алгоритму, однако эффективность, полученная градиентной оптимизацией, в среднем выше, чем при безградиентной в 1,76 раз. Сравнение полученных результатов показывает, что методы нестохастической безградиентной оптимизации неприменимы для расчета фотонно-кристаллических интерференционных логических элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Жданов, В. А. О методе покоординатного спуска / В. А. Жданов // Математические заметки. — 1977. — Т. 22. — № 1. — С. 137–142.
- [2] Аттетков, А. В. Метод Хука-Дживса: Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин — Москва : Изд-во МГТУ им. НЭ Баумана, 2003. — С. 285.
- [3] Pavelyev, V. S. Genetic Optimization of the Y-Shaped Photonic Crystal NOT Logic Gate / V. S. Pavelyev, Yu. Yu. Krivosheeva, D. L. Golovashkin // Photonics. — 2023. — Vol. 10. — № 10. — DOI: 1173. 10.3390/photonics10101173.

Comparison of two approaches to the design of interference logic gates on photonic crystal structures

Yu. Yu. Krivosheeva¹, D. L. Golovashkin^{1,2}, V. S. Pavelyev^{1,2}

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

² Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara, Russia

Using the example of a photonic crystal interference logic gate NOT on a crystal with a Y-shaped defect, two approaches to the design of integrated optics elements were considered: non-stochastic methods of gradient-free optimization and a genetic algorithm. Both approaches are characterized by solving the direct diffraction problem using the FDTD method. A comparison of the calculated results demonstrates the advantage of the author's modified genetic algorithm compared to the coordinate descent and Hook-Jeeves methods. In particular, on average, the efficiency of an element calculated using a genetic algorithm is 1.76 times greater than with gradient-free optimization.

Keywords: Photonic crystals, Interference logic gates, Genetic algorithm, optimization methods

Разработка микро-опто-электромеханического модулятора

В. С. Галанова^{1,2*}, С. С. Святодух^{3,4}, А. Д. Голиков³, В. В. Ковалюк^{1,3}, Д. А. Горин², Г. Н. Гольцман^{4,5}

¹Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

³Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁵Российский квантовый центр, Москва, Россия

В работе приведены результаты численного моделирования активной зоны микро-опто-электромеханического модулятора, представлен разработанный технологический процесс, а также результаты измерения их спектра пропускания в телекоммуникационном (С-диапазоне). Полученные результаты могут быть использованы не только для изготовления оптических амплитудных и фазовых модуляторов, но и для создания газовых и биосенсоров.

Ключевые слова: Микро-опто-электромеханический модулятор, Фотонная интегральная схема, Активный оптический компонент

Введение

Интерес к фотонным интегральным схемам (ФИС) непрерывно растет так же, как и спектр их возможных применений. ФИС стали одной из ведущих платформ для реализации различных фотонных квантовых применений. Способность активно перестраивать и перенаправлять оптическое излучение является важной особенностью ФИС. Микро-опто-электромеханические (МОЭМ) модуляторы являются многообещающей альтернативой широко распространенным в настоящее время термооптическим и электрооптическим модуляторам для масштабируемых приложений благодаря компактным размерам, низкому энергопотреблению и высокой относительной эффективности [1, 2].

Принцип работы МОЭМ модуляторов основан на механическом смещении волноводных структур под действием внешнего электрического поля. В данной работе представлена одна из возможных конфигураций МОЭМ модулятора с рабочей областью в виде подвешенного слотового волновода внутри кольцевого микрорезонатора, формируемого травлением оксида кремния в растворе плавиковой кислоты.

Моделирование

Активная область МОЭМ модулятора представляет собой подвешенный слотовый волновод, обладающий высокой чувствительностью эффективного показателя преломления к изменению ширины сердцевинки. Было проведено численное моделирование зависимостей коэффициента отражения (R), пропускания (T) и поглощения (A) от ширины сердцевинки (g_s), зазора между тейпером и согласующим волноводом (g_t), длины тейпера (l_t) и ширины оболочки слотового волновода (w_s) методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics с использованием модуля волновой оптики (рис. 1).

В результате численного расчета были подобраны геометрические параметры, обеспечивающие максимальное пропускание (T), а также минимальные отражение (R) и поглощение (A). Так как слотовый волновод чувствителен к изменениям геометрии, то для модуляции оптического излучения может быть использована монолитная конструкция, состоящая из подвешенного волновода, мостика и золотых электродов, прикладывание напряжения к которым индуцирует смещение волновода.

Технологический процесс

Структуры были изготовлены на кремниевой пластине, покрытой оксидом (SiO_2) и стехиометрическим нитридом кремния (Si_3N_4). Технологический процесс состоял из двух основных этапов: формирование контактных площадок посредством экспонирования электронного резиста с последующим термическим напылением и изготовление волноводных структур с помощью методов электронно-лучевой литографии, плазмохимического травления пленки из нитрида кремния и жидкостного травления оксида кремния.

Жидкостное травление в буферном растворе плавиковой кислоты было выбрано ввиду малой селективности сухого травления SiO_2 [3]. Остаточный слой нитрида кремния выступал в качестве маски, обеспечивающей сохранность структур вне открытого под травление окна. Параметром, определяющим качество изготовления, является наличие остаточного оксида, образующегося в ре-

зультате недостаточного времени выдержки. Для контроля полного удаления оксида кремния в окне, была определена скорость травления SiO_2 с помощью рефлектометра. При стандартных условиях, скорость травления составила ~ 90 нм/мин. На рисунке 2 показаны микрофотографии одной из изготовленных структур в оптический микроскоп и отдельные элементы, выделенные и подписанные на фотографии — в сканирующий электронный микроскоп.

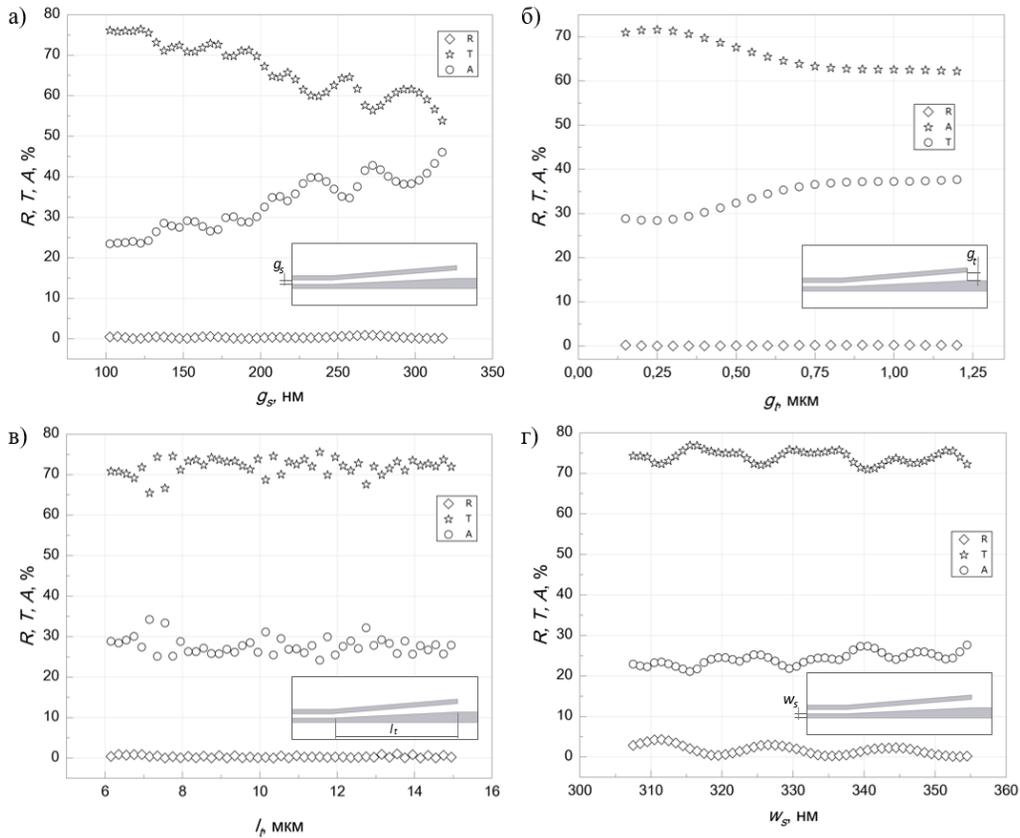
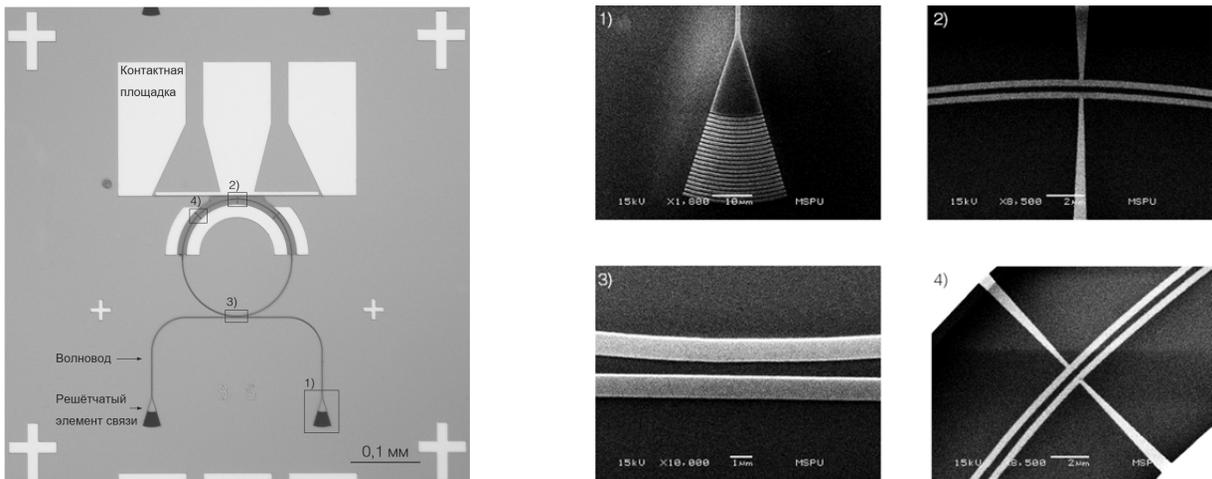


Рис. 1. Зависимости коэффициентов отражения (R), поглощения (A) и пропускания (T) от параметров (а) – (г) а) ширина сердцевины слотового волновода; б) расстояние между тейпером и согласующим волноводом; в) длина тейпера; г) ширина слотового волновода



а) оптическая

1) решетчатый элемент связи, 2) подвешенный слотовый волновод (центральный), 3) зазор между кольцевым и согласующим волноводами, 4) подвешенный слотовый волновод (боковой)

б) электронные

Рис. 2. Микрофотографии изготовленных структур

Экспериментальное исследование изготовленных структур

Так как качество и работоспособность структур во многом зависит от корректно подобранной дозы экспонирования, то помимо визуального контроля осуществлялось измерение спектров пропускания изготовленных кольцевых резонаторов в диапазоне длин волн (1480–1620 нм).

Параметры решетчатых элементов связи, используемых для ввода и вывода оптического излучения в данной структуре, подобраны таким образом, чтобы максимум пропускания был на центральной длине волны, равной 1550 нм. На рисунке 3 показаны зависимости нормализованные на входные потери спектры пропускания кольцевых микрорезонаторов, изготовленные с разной дозой экспонирования, и их измеренная добротность ($Q = \lambda_c / \text{FWHM}$). При увеличении дозы экспонирования добротность структур растет (с 3500 до ~10000), что нами связывается с более точным воспроизведением геометрических параметров слотового волновода, приводящего к уменьшению параметра резкости (уширению резонансных пиков).

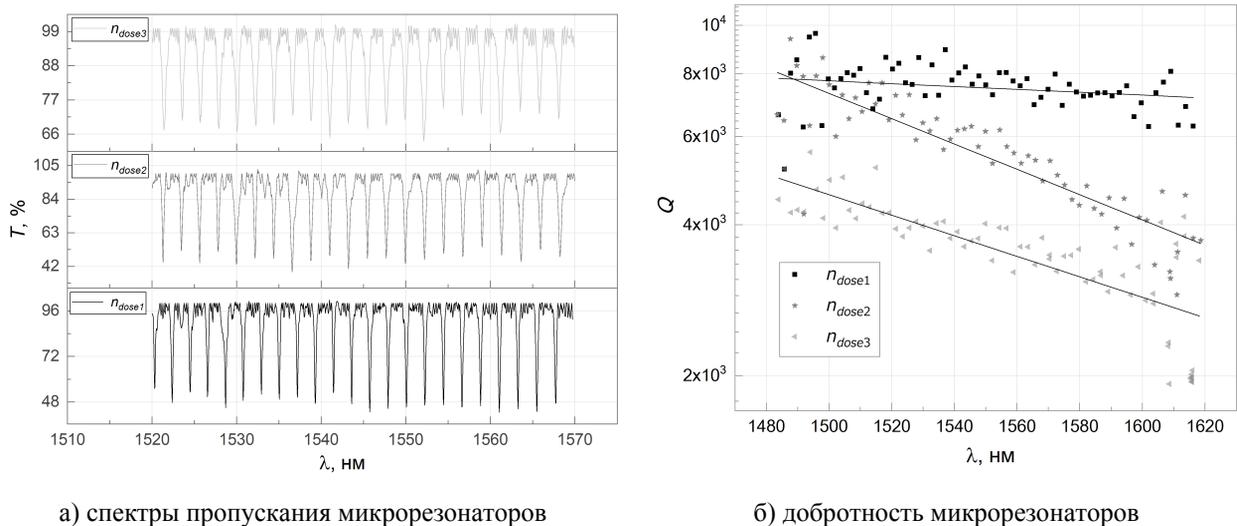


Рис. 3. Результат обработки экспериментальных данных

Заключение

МОЭМ модулятор является перспективной альтернативой другим типам модуляторов в приложениях, в которых предъявляются жесткие требования к размерам устройств. Однако изготовление МОЭМ модулятора является трудоемкой задачей ввиду необходимости формирования подвешенного активного участка, что усложняет технологический процесс.

Дальнейшее развитие связано с экспериментальным исследованием данных структур в качестве модуляторов оптического излучения, определения их основных параметров, таких как полоса пропускания, вносимые потери и относительная эффективность.

Благодарность

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSME-2022-0008 (изготовление), а также РФФ № 23-79-00056 (численное моделирование и экспериментальное исследование).

Список источников

- [1] Grottkе, T. Optoelectromechanical phase shifter with low insertion loss and a 13π tuning range / T. Grottkе, W. Hartmann, C. Schuck, W.H. Pernice // *Optics Express*. — 2021. — Vol 29. — № 4. — P. 5525–5537. DOI: 10.1364/OE.413202
- [2] Baghdadi, R. Dual slot-mode NOEM phase shifter / R. Baghdadi, M. Gould, S. Gupta, M. Tymchenko, D. Bunandar, C. Ramey, N.C. Harris // *Optics Express*. — 2021. — Vol 29. — № 12. — P. 19113–19119. DOI: 10.1364/OE.423949
- [3] Hsiao, S. N. Selective etching of SiN against SiO₂ and poly-Si films in hydrofluoroethane chemistry with a mixture of CH₂FCH₂F, O₂, and Ar / S. N. Hsiao, K. Ishikawa, T. Hayashi, J. Ni, T. Tsutsumi, M. Sekine, M. Hori // *Applied Surface Science*. — 2021. — Vol 541. — C. 148439.

Development of the micro-opto-electromechanical modulator

V. S. Galanova¹, S. S. Svyatodukh^{3,4}, A. D. Golikov³, V. V. Kovalyuk^{1,3}, D. A. Gorin², G. N. Goltsman^{4,5}

¹National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

²Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

³Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia

⁴National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia

⁵Russian Quantum Center, Moscow, Russia

In this work the results of numerical modeling of the active zone of a micro-opto-electromechanical modulator, the developed technological process, as well as the results of measuring transmission spectrum in C-band range are presented. The obtained results can be used not only for the fabrication of optical amplitude and phase modulators, but also for the creation of gas and biosensors.

Keywords: *Micro-opto-electromechanical modulator, Photonic integrated circuit, Active optical component*

Способ размещения квантовых точек CdSe/CdS/ZnS на волноводах из нитрида кремния

Р. Х. Касимов^{1,2}, А. И. Аржанов², К. О. Седых^{2,3}, А. Д. Голиков², В. С. Галанова¹, В. В. Ковалюк^{1,3}, А. В. Наумов^{2,4}, Г. Н. Гольцман^{3,5}

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁴ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Троицкое обособленное подразделение, включающее «Троицкий Технопарк ФИАН», Троицк, Россия

⁵ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Использование квантовых точек в качестве источников одиночных фотонов, встроенных в интегральные оптические схемы, обеспечивает масштабируемую, надежную и эффективную генерацию и манипулирование одиночными фотонами для различных приложений квантовых технологий. Однако интеграция большого количества квантовых точек на чип все еще остается нерешенной задачей. В этой работе мы сообщаем о размещении 49 коллоидных квантовых точек CdSe/CdS/ZnS (диапазон излучения 600–700 нм) на поверхности волноводных схем с использованием электронно-лучевой литографии. Изготовленные структуры позволяют возбуждать и детектировать фотоны как с помощью конфокальной микроскопии, так и через отдельные волноводные каналы, открывая путь к полностью интегральным квантово-оптическим микросхемам на чипе.

Ключевые слова: Интегральная оптика, Квантовые точки, Фотонная эмиссия

Введение

Быстрое развитие квантовой информатики за последние несколько десятилетий стало важной движущей силой текущих исследований источников и детекторов одиночных фотонов. По своей сути квантовая информатика включает в себя кодирование, передачу, манипулирование и измерение информации с использованием квантово-механических объектов. Многие протоколы квантовой криптографии, ярким примером которых является квантовое распределение ключей (QKD), требуют, чтобы именно одиночные фотоны перемещались по каналу связи [1]. Коллоидные квантовые точки (КТ), полученные методом химического синтеза, также обладают значительным потенциалом в качестве источников одиночных фотонов, позволяя регулировать длину волны излучения, потенциально распространяющуюся на телекоммуникационный диапазон, посредством точного контроля геометрии и состава материала [2]. Фотонные интегральные схемы также хорошо подходят для этой задачи благодаря их способности обеспечивать воспроизводимую репликацию компактных функциональных блоков, низкие потери в канале и экономичное производство на монокристаллических чипах [2].

1. Дизайн и технологический процесс

Проектирование ФИС было выполнено на основе ранее представленной работы [2] в среде Python (gds-helpers). Изготовление осуществлялось в ЦКП МФТИ на литографе SABL 9000 C. В качестве основы были выбраны кремниевые пластины (Si) толщиной 545 мкм со слоем оксида кремния (SiO₂) толщиной 2,5 мкм и верхним слоем из нитрида кремния (Si₃N₄) толщиной 220 нм, сформированным методом химического осаждения из паровой фазы при низком давлении (англ. Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD).

Процесс изготовления ФИС включал в себя несколько этапов (рис. 1). На первом этапе были сформированы литографические метки для совмещения с использованием электронно-лучевой литографии, напылением и lift-off процессом в ацетоне.

На втором этапе были сформированы волноводы, отверстия и решеточные элементы связи с использованием электронно-лучевой литографии, проявлением и плазмохимическим травлением на половину толщины. На третьем этапе были сформированы отверстия в резисте для высаживания квантовых точек с использованием электронно-лучевой литографии. На четвертом этапе были высажены квантовые точки drop-cast методом с использованием микролитрового шприца, центрифуги и раствора квантовых точек. На пятом этапе лишние квантовые точки, не попавшие в отверстие, были убраны с помощью lift-off процесса в ацетоне.

После каждого травления следовала чистка в N-Метил-2-пирролидоне (NMP), ацетоне, деионизованной воде и изопропиловом спирте. Общее количество интегральных схем — 49.

Микрофотографии устройства и схема распространения света в волноводе показаны на рисунке 2.

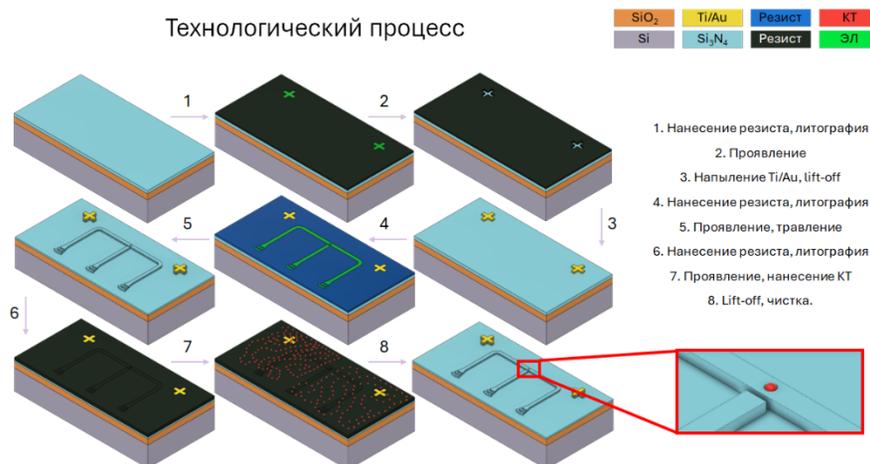
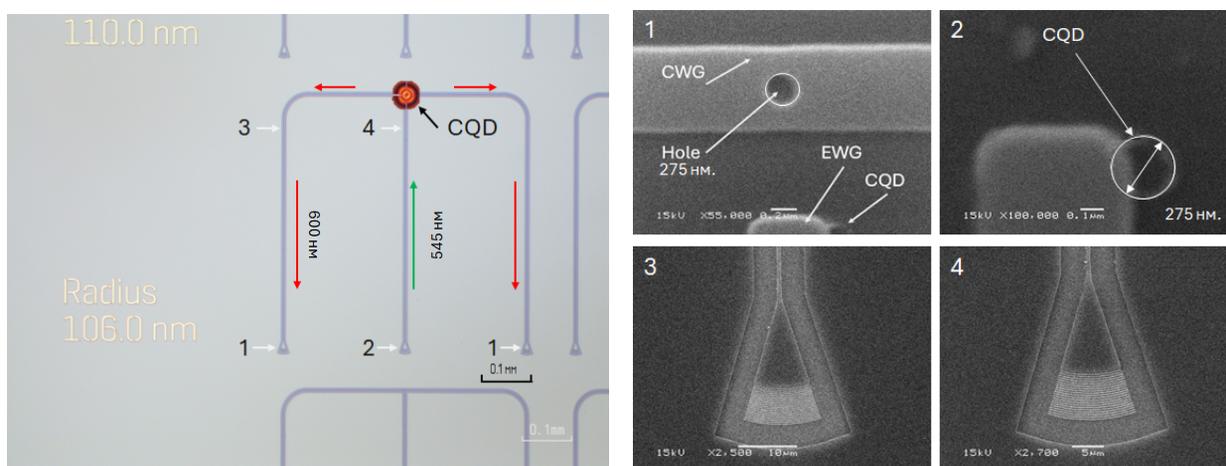


Рис. 1. Технологический маршрут изготовления устройства



- | | |
|--|--|
| <p>1) фокусирующий элемент связи для 600 нм;
 2) фокусирующий элемент связи для 532 нм;
 3) собирающий волновод; 4) Возбуждающий волновод;</p> | <p>1) отверстие в волноводе; 2) квантовые точки;
 3) фокусирующий элемент связи для 532 нм;
 4) фокусирующий элемент связи для 600 нм;</p> |
|--|--|

Рис. 2. Микрофотографии изготовленного устройства: оптическая (а); электронные (б)

Дизайн схемы, показанный на рис. 2, выполнен на основе работы [2]. Схема подразумевает, что с помощью фокусирующего элемента связи (2) в возбуждающий волновод (4) вводится свет $\lambda_p = 540$ нм для возбуждения квантовой точки (CQD), расположенной в отверстии в центре собирающего волновода (3), пройдя по которому излучение от квантовой точки выводится наружу с помощью фокусирующих решеток (1), расположенных по краям и работающих в диапазоне 600–700 нм.

2. Результаты

Измерения изготовленного образца проводились на установке с использованием конфокального микроскопа, наведенного на отверстие в волноводе. Для возбуждения квантовых точек использовался лазерный источник $\lambda_p = 545$ нм. Излучение квантовых точек регистрировалось в диапазоне 600–700 нм с помощью микрообъектива с увеличением $\times 100$ и числовой апертурой $NA = 0,95$. Для определения области излучения квантовых точек были сделаны люминесцентные карты вокруг отверстия в волноводе размером 10×10 мкм и снята спектральная характеристика. Результаты измерений показаны на рисунке 3.

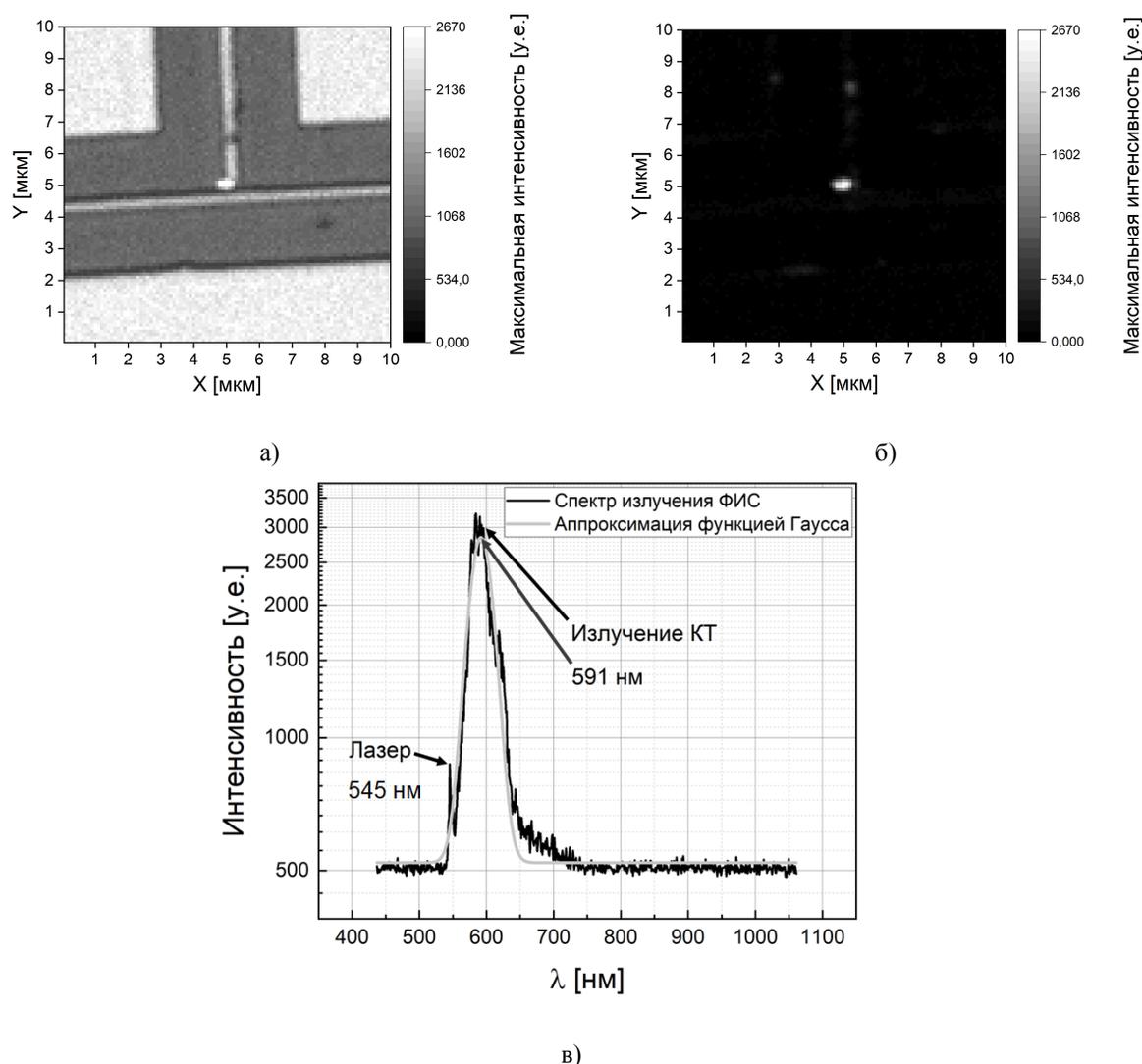


Рис. 3. Характеристики излучения квантовой точки:

а) люминесцентная карта волноводов и квантовых точек; б) люминесцентная карта квантовых точек; в) спектр излучения квантовых точек

Максимальная интенсивность излучения квантовых точек соответствует $\lambda_e = 591$ нм, а ширина спектра (569–613 нм) объясняется большим количеством точек квантовых разного размера. Квантовые точки находятся не в отверстии на волноводе, что видно на рисунке 1б. Фотографии, сделанные в электронном микроскопе, указывают на неточность в проведении третьего этапа, что подтверждают люминесцентные карты различных структур, т. к. максимальная интенсивность находилась в идентичных координатах. На это и указывает область расположения квантовых точек — она имеет такую же форму и радиус, как и отверстие в волноводе.

Заключение

В работе был продемонстрирован метод размещения квантовой точки на фотонную интегральную схему. Было определено положение квантовых точек на чипе, и измерены спектральные характеристики излучения квантовых точек. Полученные данные будут использованы для улучшения точности размещения и повышения вероятности высадки одной квантовой точки в отверстие.

Благодарность

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSME-2022-0008 (изготовление), а также РФФ № 23-79-00056 (численное моделирование и экспериментальное исследование)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Eisaman, M. D.** Invited Review Article: Single-photon sources and detectors / M. D. Eisaman, J. Fan, A. Migdall, S. Polyakov // *Review of Scientific Instruments*. — 2011. — Vol 82 — № 7. — P. 071101. DOI: 0.1063/1.3610677.
- [2] **Eich, A.** Single photon emission from individual nanophotonic-integrated colloidal quantum dots / A. Eich, T. Spiekermann, H. Gehring, L. Sommer, J. R. Bankwitz, P. Schrunner, J. Preuß, S. Michaelis de Vasconcellos, R. Bratschitsch, W. Pernice, C. Schuck // *ACS Photonics*. — 2022. — Vol 9. — № 2. — P. 551–551. DOI: 10.1021/acsp Photonics.1c01493.

Drop-cast technique for placing CdSe/CdS/ZnS quantum dots on silicon nitride waveguides

R. K. Kasimov^{1,2}, A. I. Arzhanov², K. O. Sedykh^{2,3}, A. D. Golikov², V. S. Galanova¹, V. V. Kovalyuk^{1,3}, A. V. Naumov^{2,4}, G. N. Goltsman^{3,5}

¹ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

² Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia

³ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

⁴ Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia

⁵ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

The use of quantum dots as single photon sources embedded in optical integrated circuits enables scalable, reliable, and efficient single photon generation and manipulation for a variety of quantum technology applications. However, integrating large numbers of quantum dots onto a chip is still an unsolved challenge. In this work, we report the drop-casting of colloidal CdSe/CdS/ZnS quantum dots (emission range 600–700 nm) on the surface of waveguide circuits using electron beam lithography. The fabricated structures allow photons to be excited and detected both using confocal microscopy and through individual waveguide channels, paving the way to fully integrated quantum optical circuits on a chip.

Keywords: *Integrated optics, Quantum dots, Photon emission*

Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп с модулятором двулучепреломления

И. Л. Кубланова, А. В. Куликов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В настоящем докладе предлагается новая оптическая схема волоконно-оптического гироскопа. Модуляция в нем осуществляется с помощью модулятора двулучепреломления, что нивелирует воздействие поверхностных паразитных эффектов в электрооптическом кристалле ниобата лития на результирующий сигнал гироскопа. Представлены результаты термических испытаний собранного прибора. Волоконно-оптический гироскоп с модулятором двулучепреломления работоспособен и показывает улучшенные результаты по сравнению с предыдущей версией прибора, что открывает перспективы для исследования его уникальных свойств.

Ключевые слова: Волоконно-оптический гироскоп, Модулятор двулучепреломления, Ниобат лития

Введение

Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) измеряет угловую скорость вращения за счет эффекта Саньяка-Лауэ, детектируя набег фаз на чувствительном элементе — волоконно-оптическом контуре [1–2]. ВОГ, предложенный Э. Лефевром [3], широко применяется в навигации и гиросtabilизации, а также сейсмическом мониторинге тем не менее, подвержен ряду паразитных эффектов [4–6]. В частности, разнесенное расположение двух фазовых модуляторов на поверхности кристалла ниобата лития делает результирующий сигнал прибора подверженным влиянию паразитных поверхностных пьезо- и пироэлектрического эффектов. В предлагаемом ВОГ используется модулятор двулучепреломления (ВОГ-МДЛП), имеющий один волновод на поверхности электрооптического кристалла, что нивелирует воздействие указанных эффектов [7]. Тем не менее, изменение абсолютной температуры вызывает в сигнале ВОГ-МДЛП нелинейный отклик [8]. В настоящей работе апробируется предположение о природе возникновения этого отклика и способах борьбы с ним.

1. Предположение и преобразование

При обратном распространении волн, прошедших через волоконно-оптический контур и модулятор, излучение проходит через соединение с ориентацией осей двулучепреломления 45° , при этом, в каждой оси двулучепреломления волокна распространяются волны из медленной и из быстрой осей волновода модулятора. При их векторном сложении по амплитуде выходной сигнал зависит от разности фаз быстрой и медленной волн. При разности фаз, отличной от нуля, амплитуда выходного сигнала значительно меняется с изменением полярности модулятора двулучепреломления. Наводится паразитная амплитудная модуляция. Для избавления от нежелательного эффекта между линейным поляризатором и модулятором двулучепреломления был добавлен дополнительный участок оптического волокна (рис. 1).

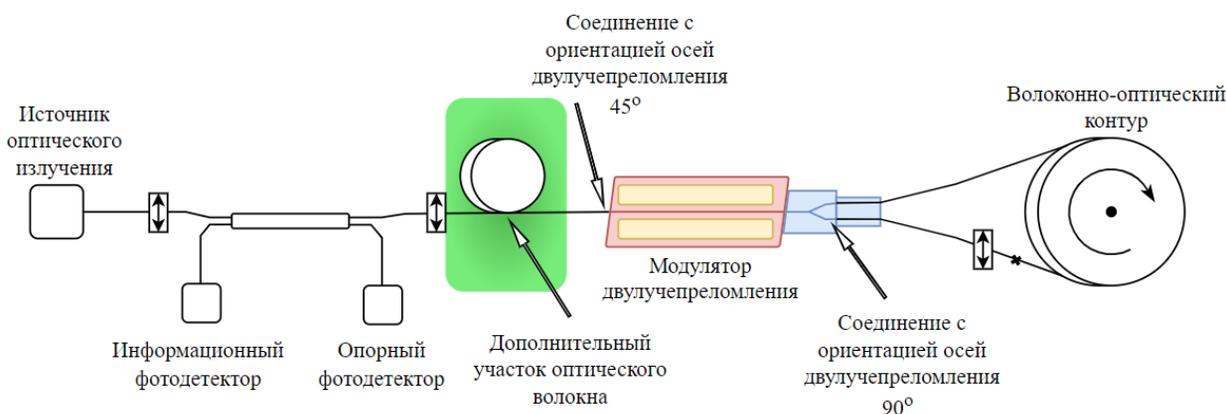


Рис. 1. Оптическая схема ИВОГ-МДЛП после преобразования

2. Методология и термические испытания

Для выявления зависимости сигнала ВОГ-МДЛП от изменения абсолютной температуры проводились термические испытания в камере тепла-холода, в ходе которых прибор помещался в камеру полностью и претерпевал изменения температуры от 15 до 35 °С.

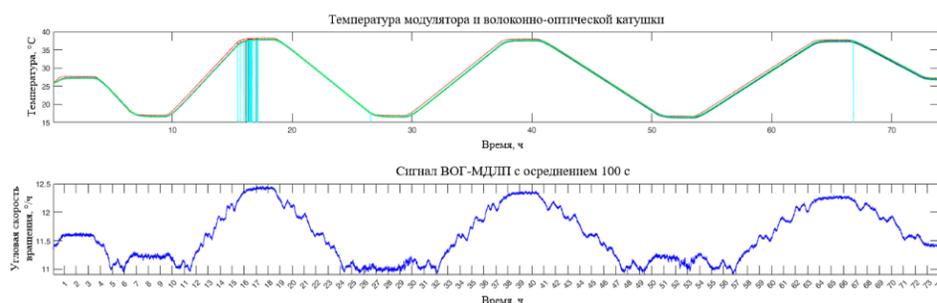


Рис. 2. Результаты термических испытаний ВОГ-МДЛП до изменений в оптической схеме

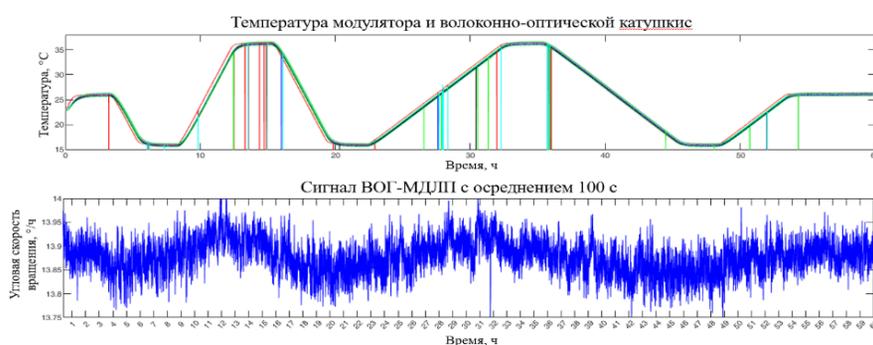


Рис. 3. Результаты термических испытаний ВОГ-МДЛП после изменений в оптической схеме

Как видно из рисунка 2, до преобразований в оптической схеме изменение абсолютной температуры вызывало в результирующем сигнале угловой скорости вращения ВОГ-МДЛП нелинейные участки. Результатом описанных выше преобразований послужило не только избавление от нелинейных участков в областях изменения абсолютной температуры, но и снижение зависимости от изменения температуры в целом (рис. 3).

Заключение

В заключение, предположение о природе возникновения нелинейности оказалось верным. В результате добавления дополнительного участка оптического волокна между линейным поляризатором и модулятором двулучепреломления, изменение абсолютной температуры более не вызывает в сигнале угловой скорости вращения появления нелинейных участков.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006). Благодарность АО «Государственный научный центр Российской Федерации «Концерн ЦНИИ Электроприбор», а именно заместителю руководителя. 084 отд. А. А. Унтилову за возможность проведения испытаний и инженеру С. Т. Нефоросному за помощь в проведении испытаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sagnac, G. L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme / G. Sagnac // CR Acad. Sci. — 1913. — № 157 — P. 708–710.
- [2] Laue, M. Über einen Versuch zur Optik der bewegten Körper / M. Laue // Münchener Sitzungsberichte. — 1911 — № 12 — P. 405–412.
- [3] Lefevre, H. C. The fiber-optic gyroscope / H. C. Lefevre // Norwood: Artech house. — 2022.

- [4] **Udd, E.** Applications and development of the Sagnac interferometer. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* / E. Udd, Jr. W. Spillman // Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. — 2024. — P. 201–211.
- [5] **Capezzuto, M.** Fiber-optic gyroscope for rotational seismic ground motion monitoring of the Campi Flegrei volcanic area / M. Capezzuto, G. Gaudiosi, L. Nardone, E. D'Alema, D. D'Ambrosio, R. Manzo, S. Avino // *Applied Optics*. — 2024. — Vol 63. — № 16. — P. 4226–4233.
- [6] **Kawanishi, T.** *Electro-Optic Modulation for Photonic Networks* / T. Kawanishi // Yola: Springer International Publishing. — 2022.
- [7] **Патент №2762530 РФ.** Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп / И. Л. Кубланова, А. В. Куликов. — Оpubл. 21.12.2021.
- [8] **Kublanova, I. L.** Study of an interferometric fiber-optic gyroscope with a birefringence modulator. / I. L. Kublanova, V. A. Shulepov, A. V. Kulikov // *Gyroscopy and Navigation*. — 2021 — Vol 12. — № 4. — P. 363–369.

Interferometric fiber-optic gyroscope with birefringence modulator

I. L. Kublanova, A. V. Kulikov

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

This paper proposes a new optical design for a fiber optic gyroscope. Modulation in it is carried out using a birefringence modulator, which neutralizes the impact of surface parasitic effects in the lithium niobate electro-optical crystal on the resulting gyroscope signal. The results of thermal tests of the assembled device are presented. The fiber-optic gyroscope with a birefringence modulator is operational and shows improved results compared to the previous version of the device, which opens up prospects for studying its unique properties.

Keywords: *Fiber-optic gyroscope, Birefringence modulator, Lithium niobate*

Секция 6

Интерферометрия

и оптическая метрология

Метрологическое обеспечение средств измерений толщины оптических покрытий

Г. Н. Вишняков^{1,2}, В. Л. Минаев¹, А. А. Самойленко¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Оптические покрытия представляют собой тонкие слои диэлектриков, металлов или полупроводников, образующие тем или иным способом на поверхностях массивных деталей или специально подготовленных подложек. Тонкослойные покрытия широко применяют в оптике, микроэлектронике, оптоэлектронике, интегральной оптике и других областях науки и техники. Для высокоточных и бесконтактных измерений толщин покрытий и их комплексного показателя преломления в основном используются спектральные рефлектометры и эллипсометры. В докладе описана система государственного метрологического обеспечения таких средств измерений толщин покрытий в широком диапазоне от 1 нм до 50 мкм.

Ключевые слова: Эллипсометрия, Спектральная рефлектометрия, Оптическое покрытие, Метрологическое обеспечение

Введение

В настоящее время особенно актуально стоит задача измерения оптических постоянных (показателя преломления и коэффициента поглощения) и толщин тонкопленочных структур [1–3]. Возрастающая сложность современных интегральных микросхем предъявляет высокие требования к качеству отдельных полупроводниковых структур, представляющих собой различные комбинации тонких металлических, диэлектрических и полупроводниковых слоев (пленок) на поверхности полупроводникового кристалла или изолятора. Контроль толщины наносимых оптических покрытий играет важную роль при создании многослойных структур, например интерференционных зеркал или просветляющих покрытий на оптические элементы. Основными средствами измерений (СИ) комплексного показателя преломления и толщин покрытий являются спектральные и/или многоугловые эллипсометры, а также спектральные рефлектометры.

Для метрологического обеспечения данных СИ разработана государственная поверочная схема (ГПС), которую возглавляет Государственный первичный специальный эталон единицы комплексного показателя преломления и единицы длины в области измерений толщины оптических покрытий ГЭТ 203-2024.

1. Состав ГЭТ 203-2024

ГЭТ 203-2024 предназначен для воспроизведения, хранения и передачи единицы комплексного показателя преломления и единицы длины в области измерений толщины оптических покрытий.

Состав ГЭТ 203-2024:

- цифровой спектральный эллипсометр Alpha-SE (J.A. Woollam Co., Inc., США);
- цифровой спектральный многоугловой эллипсометр SENresearch 4.0, модель SER 850-FTIR (Sentech Instruments, GmbH, Германия);
- меры комплексного показателя преломления и толщины оптических покрытий в виде подложек плоской или цилиндрической формы из различных материалов с однослойными или двухслойными покрытиями, состоящими из разных материалов разной номинальной толщины, а также массивные заготовки из различных материалов — материальных носителей единицы комплексного показателя преломления и единицы длины в области измерений толщины оптических покрытий;
- термогигрометр ИВА-6 (ООО НПК «МИКРОФОР», Россия) для измерений температуры, атмосферного давления и влажности воздуха в зоне измерений;
- система сбора и обработки измерительной информации на базе персональной ЭВМ.

Метрологические характеристики ГЭТ 203-2024 при воспроизведении единицы длины в области измерений толщины оптических покрытий приведены в табл. 1, где u_A , u_B — стандартные неопределенности, оцененные соответственно по типам А, В, u_C — суммарная стандартная неопределенность.

Основу ГЭТ 203-2024 составляют два спектральных эллипсометра Alpha-SE и SENresearch 4.0, модель SER 850-FTIR. Спектральный диапазон эллипсометра Alpha-SE лежит в области видимого света 380–900 нм, содержит 180 длин волн из этого диапазона, поэтому с его помощью можно измерять толщины прозрачных покрытий только до единиц микрометров (1–2 мкм).

Таблица 1. Метрологические характеристики ГЭТ 203-2024 при воспроизведении единицы длины в области измерений толщины оптических покрытий

Диапазон, нм	u_A	u_B	u_C
1–1000	0,1 нм	0,004 нм	0,1 нм
1000–50000	0,24 %	0,005 %	0,24 %

Для более толстых покрытий необходимо применять эллипсометры с инфракрасным диапазоном длин волн и оснащенных Фурье-спектрометром FTIR. Такой спектрометр входит в состав спектрального эллипсометра SENresearch 4.0, модель SER 850-FTIR (спектральный диапазон 190–2500 нм). SENresearch 4.0 принадлежит к серии новейших спектральных эллипсометров с диапазоном длин волн DUV-VIS-NIR (глубокий ультрафиолет–видимый–инфракрасный). Такие спектральные эллипсометры специально разработаны как для исследований и измерений толщин одно- и многослойных пленок, пленочных структур под различными углами, так и для измерений оптических характеристик пленочных структур (коэффициента преломления, показателя поглощения) на различных типах поверхностей в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Работа эллипсометра SENresearch 4.0 основана на методе быстрой эллипсометрии с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра для инфракрасного излучения с длиной волны 850–2500 нм. Он обеспечивает широкий спектральный диапазон с лучшим соотношением сигнал-шум и высоким спектральным разрешением. Можно измерять характеристики кремниевых пленок толщиной от 2 нм до 200 мкм. Исходной измерительной информацией, которую выдает эллипсометр, служат так называемые эллипсометрические углы ψ , Δ . Угол Δ — разность фаз между двумя ортогональными составляющими вектора напряженности электрического поля световой волны (p - и s -компонентами), отраженной или прошедшей через исследуемый объект. Отношение амплитуд p - и s -компонент вектора напряженности электрического поля световой волны позволяет определить второй эллипсометрический угол ψ .

Программное обеспечение современных эллипсометров позволяет по измеренным зависимостям эллипсометрических углов вычислить косвенным методом толщины d оптических покрытий и комплексные показатели преломления в оптических покрытиях.

2. Экспериментальные результаты

Для подтверждения правильности измерений толщины покрытий косвенным эллипсометрическим методом были созданы две эталонные меры толщины оптических покрытий ступенчатой формы. За основу мер были выбраны стандартные кремниевые пластины (ваферы) с покрытием из двуокиси кремния номинальной толщиной 200 и 1000 нм. Методом фотолитографии на этих пластинах в слое SiO_2 были вытравлены до подложки из кремния две «канавки» шириной 10 мм, длиной 100 мм и расстоянием между ступеньками 20 мм (рис. 1). Таким образом, толщина покрытия совпадает с глубиной «канавок». На одной половине пластины было нанесено покрытие из слоя хрома толщиной 50 нм. Полученные меры были названы «Мера 200» и «Мера 1000».

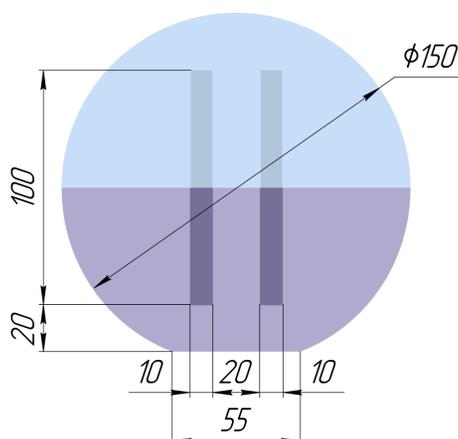


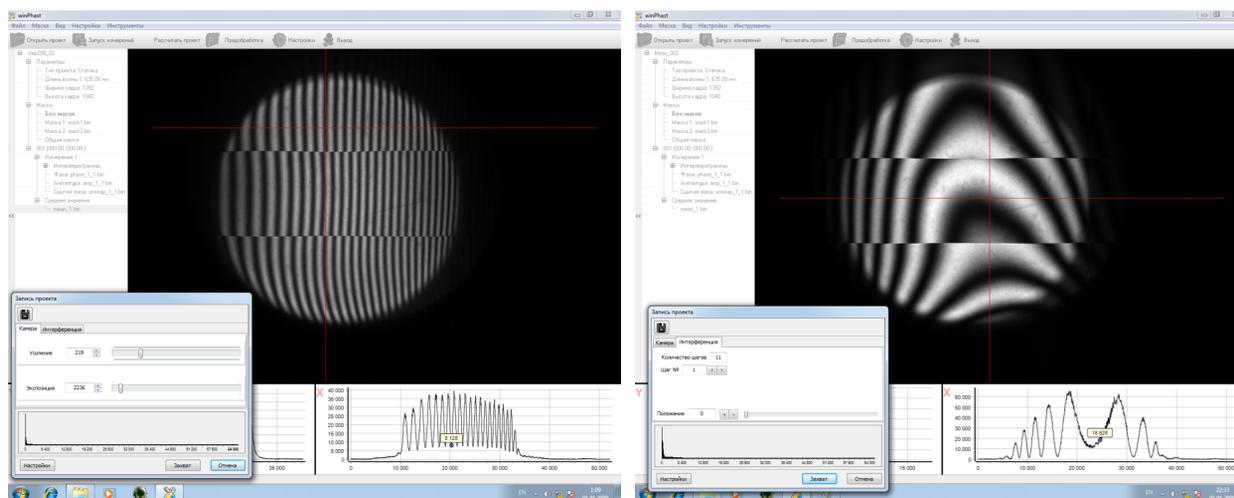
Рис. 1. Чертеж «ступенчатой» меры

Участок меры между полосками без слоя хрома (нижняя часть пластины на рисунке 1) был использован для косвенных измерений толщины слоя SiO_2 на цифровом спектральном эллипсометре Alpha-SE фирмы J.A. Woollam Co., Inc., США, входящем в состав эталона ГЭТ 203-2024. Результаты этих измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений толщины покрытий на эллипсометре Alpha-SE

Наименование меры	Мера 200	Мера 1000
Результаты измерения толщины покрытия, нм	199,8	1001,0
	199,7	1001,7
	199,5	1001,2
	200,7	1001,9
	200,5	1001,6
Среднее арифметическое значение толщины покрытия, нм	200,0	1001,5
Неопределенность по типу А, нм	0,2	0,2
Неопределенность по типу В, нм	0,01	0,01
Расширенная неопределенность ($k=2, P=0,95$), нм	0,4	0,4

Участок меры с покрытием из хрома (верхняя часть пластины на рисунке 1) был использован для прямых измерений высоты ступенек на цифровом интерферометре ПИК-30М, рег.№ 48169-11. На рисунке 2 приведены интерферограммы Меры 200. Искривленные интерференционные полосы на рисунке 2б указывают на то, что поверхность кремниевой пластины деформирована и имеет большие отклонения от плоскостности. Поэтому при настройке интерферометра ПИК-30М использовать в качестве «базовой» плоскую поверхность, например стеклянной пластины ПИ-80, нельзя.



а

б

Рис. 2. Интерферограммы Меры 200:

(а) при настройке на полосы конечной ширины; (б) при настройке на бесконечно широкую полосу

Предложена другая методика измерений, которую можно отнести к сдвиговой дифференциальной интерферометрии. Во время первой экспозиции в качестве «базовой» записывается поверхность кремниевой пластины Меры 200 и Меры 1000. Перед второй экспозицией пластина сдвигается на несколько миллиметров в направлении, перпендикулярном длинной стороне полоски (в горизонтальном направлении на рисунке 1). Программное обеспечение интерферометра ПИК-30М предусматривает возможность вычитания полученных во время первой и второй экспозиций поверхностей. В этом случае деформированная поверхность кремниевой пластины вычитается сама из себя с небольшим сдвигом в одном направлении. Так как деформация поверхности плавная, то полученная поверхность становится более плоской, а границы ступенек превращаются в плоские выступы или впадины, высоту которых надо измерить. На рисунке 3 приведена восстановленная из интерферограмм поверхность Меры 200, полученная предложенным методом. Видно, что на восстановленной поверхности волнистость поверхности подложки почти устранена.

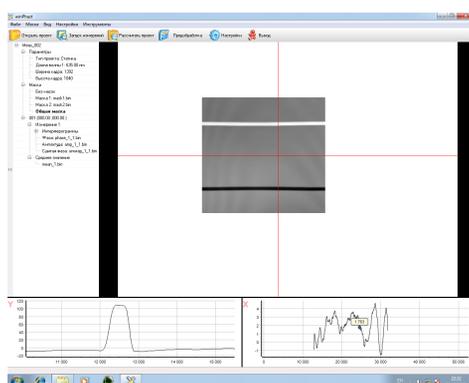


Рис. 3. Поверхность Меры 200, полученная предложенным методом сдвиговой дифференциальной интерферометрии

По одномерному профилю полученной поверхности (см. левый профиль на рисунке 3) измерялась высота выступа. Известно, что в интерферометрии объектов с резкими краями, например ступенек, возникает неопределенность в получении абсолютных значений высоты таких объектов. Эта неопределенность равна $\lambda/4$, где λ — длина волны используемого излучения. Неопределенность вызвана тем, что по интерферограмме (рис. 2а) нельзя определить направление отклонения полос. Оптическая разность хода между опорным и предметным каналом, равная $\lambda/2$, вызывает сдвиг интерференционной полосы ровно на ее ширину. Поэтому часто говорят, что расстояние между интерференционными полосами равно $\lambda/2$. В интерферометре ПИК-30М используется источник света, длина волны которого равна $\lambda = 632,8$ нм, поэтому расстояние между полосами равно $\lambda/2 = 316,4$ нм. Для ступеньки высотой около $h = 200$ нм смещение полос, например вверх, составит величину больше $\lambda/4 = 158,2$ нм. Но на интерферограмме это будет выглядеть как смещение полосы вниз на величину $d = (\lambda/2 - h) = (316,4 - 200) = 116,4$ нм. Поэтому абсолютные измерения высоты ступеньки h Меры 200 получаются по формуле $h = (\lambda/2 - d)$.

Для Меры 1000 высота ступеньки $h = 1000$ нм, поэтому реально интерференционные полосы должны сместиться больше, чем на три полосы $3 \times \lambda/2 = 949,2$ нм. Но на интерферограмме это будет выглядеть как смещение полосы вверх на величину $d = (h - 3 \times \lambda/2) = (1000 - 949,2) = 50,8$ нм. Поэтому абсолютные измерения высоты ступеньки h Меры 1000 получаются по формуле $h = (3 \times \lambda/2 + d)$.

Результаты измерений высоты полученных выступов и впадин приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерений высоты выступов и впадин на интерферометре ПИК-30М

Наименование меры	Мера 200		Мера 1000	
	d	h	d	h
Результаты измерения параметров d, h , нм	115,5	200,9	50,3	999,5
	116,0	200,4	54,0	1003,2
	115,1	201,3	51,5	1000,7
	117,2	199,2	52,5	1001,7
Среднее арифметическое значение высоты ступеньки h , нм	200,5		1001,3	
Неопределенность по типу А измерений высоты ступеньки h , нм	0,5		0,8	
Неопределенность по типу В измерений высоты ступеньки h , нм	46,2		46,2	
Расширенная неопределенность ($k = 2, P = 0,95$), нм	92,4		92,5	

Из таблицы 3 следует, что средние значения толщины покрытия, полученные на эллипсомере и интерферометре, совпадают с точностью до первого знака после запятой. Однако предел допускаемой абсолютной погрешности измерений высот профиля поверхности на интерферометре ПИК-30М, приведенный в его описании типа, достаточно большой, равный ± 80 нм. Это ведет к большой неопределенности по типу В, которая в $\sqrt{3}$ раз меньше приведенной погрешности, и, в конечном счете, к большой расширенной неопределенности.

Участки меры без покрытия из хрома были использованы также для прямых измерений высоты (глубины) «канавок» с помощью контактного профилометра FORM TALYSURF (Рег. №. 20668-12). Измерения проводились во ФГБУ «ВНИИМС». Измерения на указанном профилометре имеют,

в конечном счете, прослеживаемость к первичному эталону единицы длины — метра (ГЭТ 2-2021). На рисунке 4 приведены примеры профилограмм Меры 200 и Меры 1000. Волнистость и наклон измеряемой поверхности мер устранялись программным способом. Измерения проводились в нескольких сечениях (строках), результаты измерений приведены в таблице 4.

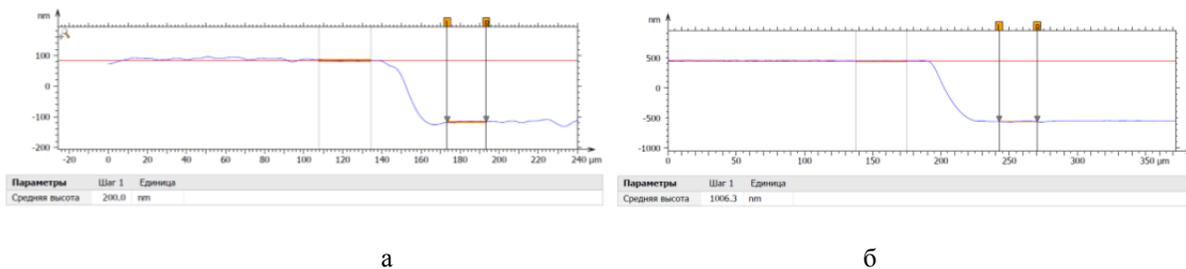


Рис. 4. Профилограммы: (а) Меры 200; (б) Меры 1000

Таблица 4. Результаты измерений высоты ступеньки на профилометре

Наименование меры	Мера 200	Мера 1000
Результаты измерения толщины покрытия, нм	198,7	
	201,6	
	214,9	1021,9
	197,8	1004,4
	200,0	1018,7
	208,8	1013,8
	184,1	1006,3
	199,6	1014,9
	200,1	1014,5
	209,8	
Среднее арифметическое значение толщины покрытия, нм	201,5	1013,5
Неопределенность по типу А, нм	2,7	2,4
Неопределенность по типу В, нм	2,3	11,6
Расширенная неопределенность ($k = 2, P = 0,95$), нм	7,0	23,6

Из таблицы видно, что средние значения толщины покрытия для Мер 200 и 1000, полученные профилометром, отличаются от эллипсометрических измерений на 1,5 нм для Меры 200, и на 12 нм для Меры 1000. Это отличие можно объяснить сильным «короблением» (деформацией) поверхности кремниевой пластины. Однако эти отклонения также находятся в пределах расширенной неопределенности измерений на профилометре.

Заключение

Государственный первичный специальный эталон единицы комплексного показателя преломления и единицы длины в области измерений толщины оптических покрытий ГЭТ 203-2024 воспроизводит, хранит и передает единицу измерения рабочим эталонам 1-го и 2-го разрядов (мерам комплексного показателя преломления и толщины покрытий) и далее средствам измерений и обеспечивает единство измерений толщины оптических покрытий в диапазоне от 1 нм до 50 мкм. Это достигнуто введением в его состав эллипсометра с инфракрасным диапазоном длин волн, оснащенного Фурье-спектрометром FTIR. Расширенный диапазон измерений важен для таких отраслей, как оптика, микроэлектроника, оптоэлектроника, интегральная оптика и других областей науки и техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Комраков, Б. М. Измерение параметров оптических покрытий / Б. М. Комраков, Б. А. Шапочкин — М.: Машиностроение, 1986.
- [2] Lee, S. W. Co-axial spectroscopic snap-shot ellipsometry for real-time thickness measurements with a small spot size / S. W. Lee, S. Y. Lee, G. Choi, H. J. Park // Optics Express. — 2020. — Vol. 28. — № 18. — P. 25879–25893.
- [3] Азам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Азам, Н. Башара — М.: Мир, 1981.

Metrological support of optical coatings thickness measuring instruments

G. N. Vishnyakov^{1,2}, V. L. Minaev¹, A. A. Samoylenko¹

1 — All-Russian Research Institute of Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

2 — Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Optical coatings are thin layers of dielectrics, metals or semiconductors formed by one or another method on the surfaces of massive parts or specially prepared substrates. Thin-layer coatings are widely used in optics, microelectronics, optoelectronics, integrated optics and other fields of science and technology. Spectral reflectometers and ellipsometers are mainly used for high-precision and non-contact measurements of coating thicknesses and their complex refractive index. The paper describes the system of state metrological support of such means of measurement of coating thicknesses in a wide range from 1 nm to 50 μm .

Keywords: *Ellipsometry, Spectral reflectometry, Optical coating, Metrological support*

К вопросу применения средств электронной спекл-интерферометрии для исследования вибрационных характеристик конструкций ГТД

А. И. Жужукин

ПАО «ОДК-Кузнецов», Самара, Россия

Приведены результаты применения спекл-интерферометрии при проведении экспериментальных исследований вибрационных характеристик деталей и узлов турбомашин. Для решения задач по обеспечению вибропрочности изделий разработано несколько спекл-интерферометрических установок с различными оптическими схемами. Показана возможность проведения исследований в автоматизированном режиме.

Ключевые слова: Спекл-интерферометрия, Формы колебаний, Виброметрия

Высокие требования к надежности газотурбинных двигателей при необходимости повышения их удельных параметров, а также рост их мощностных характеристик при одновременном снижении расхода топлива и веса приводят к необходимости постоянного совершенствования как методов расчета и проектирования, так и экспериментальных средств обработки вибропрочности их деталей и узлов [1].

В настоящее время к наиболее эффективным экспериментальным средствам исследования колебаний деталей и узлов ГТД относятся методы электронной спекл-интерферометрии. Важным преимуществом спекл-интерферометрических методов является возможность оперативного получения информации о вибрационном состоянии всей поверхности исследуемой детали.

В газотурбинных двигателях к наиболее напряженным и ответственным деталям относятся лопатки компрессора и турбины. При доводке конструкций ГТД по вибропрочности и надежности в первую очередь исследуются их собственные частоты и формы колебаний [2]. Знание этих характеристик позволяет предсказать поведение деталей и узлов в реальных условиях. В частности, собственные частоты и формы колебаний лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя определяются в частотном диапазоне возбуждающих сил газового потока. При совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой колебаний детали возникает явление резонанса, которое может привести к резкому увеличению амплитуды колебаний, а также переменных напряжений в детали, и как следствие, к последующему ее разрушению [3]. В этих случаях необходимо проводить мероприятия по отстройке колебаний лопатки от резонансного режима работы. После доработки конструкции лопатки необходимо снова проводить работы по определению их частот и форм колебаний.

На ПАО «ОДК-Кузнецов» на основе метода спекл-интерферометрии разработаны две установки, которые эффективно используются для вибрационного контроля лопаток и шестерен ГТД. Одна из этих установок создана на базе оптической схемы с разделенными пучками и гладкой опорной волной. Вторая установка разработана на основе оптической схемы с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной. Приводятся результаты применения обеих установок для исследования частот и форм колебаний лопаток компрессора и турбины ГТД. Показано, что установка с разделенными пучками и гладкой опорной волной позволяет получать интерференционные картины более высокого контраста, что дает возможность проводить измерения амплитуд колебаний поверхности исследуемой детали с более высокой точностью. Однако с ее помощью можно проводить исследования вибрационных характеристик деталей только в условиях специализированной лаборатории. В то же время установка с совмещенными пучками и спекл-модулированной волной обладает повышенной помехоустойчивостью, содержит малое число оптических элементов и не требует наличия интерферометрического стола. Кроме того, она обладает значительно меньшей стоимостью и может быть использована во внестендовых условиях. Ввиду компактности, простоты юстировки и высокой устойчивости к внешним вибрациям установка с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной позволяет проводить исследования колебаний конструкции или любой части ее поверхности во внестендовых условиях без использования интерферометрического стола. Приводятся результаты применения этой установки при исследовании колебаний лопаток вентилятора, а также секторов лопаточного венца колеса компрессора.

Для исследования колебаний крупногабаритных конструкций ГТД на ПАО «ОДК-Кузнецов» разработаны спекл-интерферометрические установки как на основе схемы с разделенными пучками и гладкой опорной волной, так и с использованием схемы с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной. Оптическая схема первой установки размещена на голографической плите площадью $3 \times 6 \text{ м}^2$ и массой 18 т. Использование интерферометра с достаточно больши-

ми оптическими путями предъявляет более жесткие требования по виброзащищенности оптической схемы, так как в этом случае небольшие колебания отражающих зеркал интерферометра приводят к значительным изменениям разности хода между опорным и предметным пучками. Полученная с помощью этой установки одна из форм колебаний колеса компрессора диаметром 0,9 м представлена на рисунке 1.

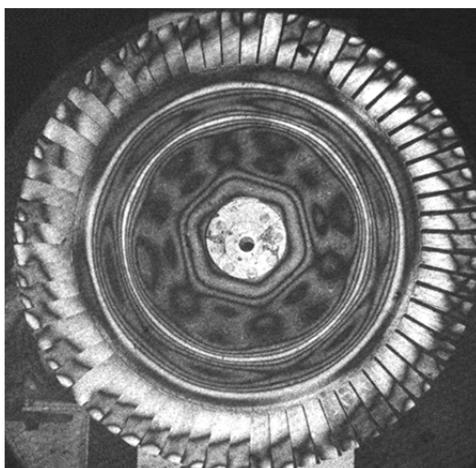


Рис. 1. Колебания колеса компрессора на частоте 2394 Гц

Установка на базе оптической схемы с совмещенными пучками и спекл-модулированной опорной волной используется для исследования колебаний лопастей вентилятора.

При проведении длительных рутинных испытаний, когда возникает необходимость в определении вибрационных характеристик всего комплекта лопаток рабочего колеса в широком диапазоне частот, для снижения трудоемкости работ требуется автоматизация процесса регистрации спекл-интерферограмм. На ПАО «ОДК-Кузнецов» разработана спекл-интерферометрическая установка, позволяющая в автоматизированном режиме проводить вибрационные исследования деталей турбомашин в широком диапазоне частот, а также наблюдать процесс развития колебаний в динамике при росте или падении частоты возбуждения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Еленевский, Д.С.** Поузловая отработка вибропрочности лопаток турбины ГТД/ Д.С. Еленевский// В сб. Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. — КуАИ. — 1981. — С. 29–41.
- [2] **Коскин, А.О.** Исследование форм и частот колебаний бандажированного колеса вентилятора на голографической установке и в составе двигателя на испытательном стенде / О.А. Коскин, В.Г. Селезнев // Вестник СГАУ. — 2014. — № 5(47). — Ч. 2. — С. 109–114.
- [3] **Макаева, Р.Х.** Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии/ Р.Х. Макаева, А.Х. Каримов, А.М. Царева; монография. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. — 2011.— 242 с.

On the issue of electronic speckle interferometry application to study the vibration characteristics of gas turbine engine design

A.I. Zhuzhukin

PJSC "UEC-Kuznetsov", Samara, Russia

The results of the speckle interferometry utilization in experimental studies of the vibration characteristics for parts and units of turbomachines are presented. To solve the problems on granting the vibration resistance of engines, several speckle interferometers with different optical schemes have been developed. The possibility of the research implementation in an automated mode is shown.

Keywords: Speckle interferometry, Vibration modes, Vibrometry

Дифракционный рефрактометр для характеристики образцов жидкостей

Д. А. Белоусов

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты разработки дифракционного рефрактометра, позволяющего осуществлять измерения в широком диапазоне изменения показателя преломления исследуемых жидкостей. В разработанном устройстве используется секторальный дифракционный сенсорный элемент (СДСЭ), состоящий из четырех решеток с различным периодом и угловой ориентацией. В процессе измерения пространственное положение дифракционных порядков регистрируется статично установленной видеокамерой непосредственно с поверхности резервуара, в который наливается образец жидкости, а стенки резервуара выполнены в форме сферического сегмента. Показано, что использование СДСЭ позволяет расширить диапазон измеряемых значений показателя преломления исследуемых жидкостей без потери точности. Это достигается за счет анализа дифракционных порядков, диффразированных в максимально чувствительном к изменению показателя преломления диапазоне углов дифракции.

Ключевые слова: Дифракционная оптика, Показатель преломления, Жидкости, Дифракционный сенсор, Измерительная система, Обработка изображений

Введение

Задача характеристики жидкостей и жидкостных растворов на основе измерения их показателя преломления (ПП) является актуальной в таких областях, как химическая, биологическая, пищевая, фармацевтическая и нефтегазовая промышленности, машиностроение и изготовление высокотехнологического оборудования, в медицинских учреждениях, в научно-технических исследованиях и во многих других [1–6]. Данные измерения осуществляются с целью исследования характеристик жидкостей, их идентификации, определения чистоты и/или количественной оценки содержания примесей в жидкостных растворах. Можно выделить следующие основные методы, активно используемые для измерения показателя преломления жидкостных образцов: гониометрические [7], интерференционные [8] и рефрактометрические [1, 4, 9], а также оптоволоконная сенсорика [10, 11]. Также в настоящее время разрабатываются устройства, основанные на применении дифрактометрического метода [12–17]. Недостатком известных технических решений, реализующих дифрактометрический метод измерения ПП по анализу углового положения дифракционных порядков, является наличие в измерительном блоке подвижных элементов, которые используются либо для поворота дифракционной решетки, либо для сканирования блоком регистрации дифракционной картины в широком угловом диапазоне. Это приводит к увеличению стоимости, дополнительным погрешностям, увеличению времени выполняемых измерений, а также к усложнению конструкции таких устройств. В работе представлены результаты разработки дифракционного рефрактометра на основе статично установленного секторального дифракционного сенсорного элемента и блока регистрации, который позволяет осуществлять измерения в широком диапазоне изменения показателя преломления исследуемых жидкостей с высокой точностью.

1. Секторальный дифракционный сенсорный элемент

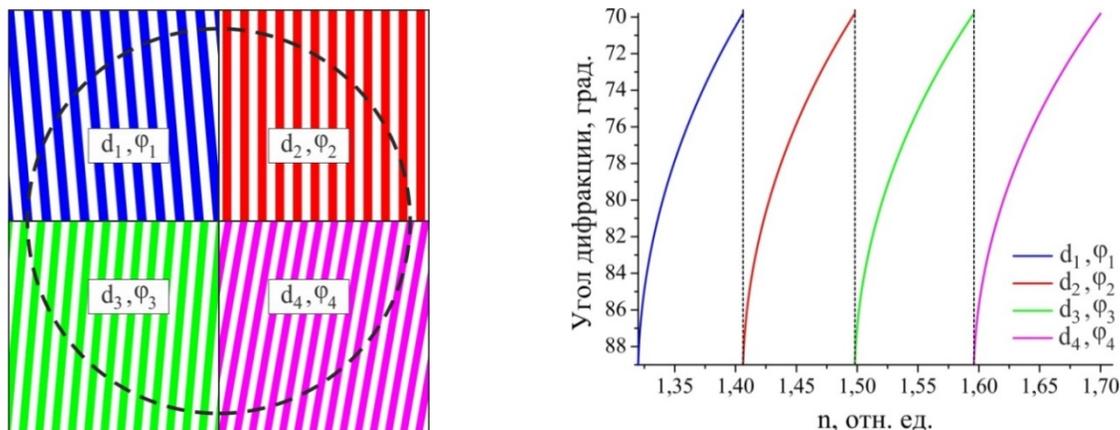
При нормальном падении когерентного лазерного излучения на периодическую структуру угловое положение дифракционных максимумов (дифракционных порядков) в пространстве определяется из следующего соотношения:

$$\alpha_m = \arcsin((m \times \lambda) / (d \times n)), \quad (1)$$

где m — номер дифракционного порядка (ДП); λ — длина волны когерентного лазерного источника; d — период стрихов дифракционной решетки (ДР); n — показатель преломления среды, в которой формируется дифракционная картина. Таким образом зная длину волны лазерного источника и период ДР, погруженной в исследуемую жидкость, измерение углового положения ДП (с номером $m \neq 0$) позволяет определить коэффициент преломления среды, в которой формируется дифракционная картина (ДК). Из выражения 1 можно отметить что, угловое положение ДП пропорционально синусоидальной функции, и чем выше угол дифракции регистрируемого дифракционного максимума, тем выше чувствительность дифрактометрического метода измерения показателя преломления.

При использовании одиночной ДР для измерения показателя преломления жидкостных образцов в диапазоне 1,3200–1,7000 необходимо регистрировать ДК в диапазоне углов дифракции 89° –

50.9°. При регистрации углового положения ДП статично установленной видеокамерой, для достижения точности определения ПП, например 1×10^{-4} светочувствительная матрица видеокамеры должна обеспечивать дискретность не менее ~ 10000 пикселей на вышеуказанный угловой диапазон регистрируемой дифракционной картины.



а) схема расположения ДР, составляющих структуру СДСЭ (пунктирной линией отмечена граница пробного лазерного пучка, освещающего СДСЭ в процессе измерения ПП) б) угловое положение регистрируемых дифракционных порядков при использовании СДСЭ, состоящего из 4-х ДР, для измерения ПП в диапазоне 1,3200 – 1,7000 ($\alpha_{max} = 89^\circ$, $\alpha_{min} = 69,8^\circ$)

Рис. 1. Секторальный дифракционный сенсорный элемент

В рамках данной работы для дифракционного рефрактометра предлагается использовать секторальный дифракционный сенсорный элемент (СДСЭ), который представляет собой набор из четырех ДР (рис. 1а), имеющих различный период и угловую ориентацию (φ). Каждая « i -я» дифракционная решетка СДСЭ (где $i = 1, 2, 3, 4$) используется для контроля определенного диапазона показателя преломления от n_{i_min} до n_{i_max} (рис. 1б). Первая дифракционная решетка сенсора ($i = 1$) имеет период:

$$d_1 = (m \times \lambda) / (n_{1_min} \times \sin(\alpha_{max})) = (m \times \lambda) / (n_{1_max} \times \sin(\alpha_{min})).$$

Для каждой последующей « i -ой» дифракционной решетки: $n_{i_min} = n_{(i-1)_max}$. Таким образом, для показателя преломления жидкости, при котором дифракционный порядок « i -ой» ДР, достигает минимального значения регистрируемого углового диапазона (α_{min}), ДР « $i+1$ » формирует ДП с максимально регистрируемым углом дифракции (α_{max}), но с другой угловой ориентацией φ относительно ориентации « i -ой» ДР ($\varphi_i \neq \varphi_{i+1} \neq \varphi_{i+2} \neq \varphi_{i+3}$). При использовании такого СДСЭ определение показателя преломления жидкостных образцов осуществляется по измерению двух параметров: угла дифракции α и угловой ориентации φ регистрируемого ДП. Предложенное техническое решение дает возможность существенно уменьшить диапазон регистрируемых углов дифракции (от α_{max} до α_{min}), что позволяет осуществлять регистрацию и анализ ДП, дифрагированных в максимально чувствительном к изменению ПП угловом диапазоне углов дифракции, а также использовать не дорогие видеокамеры с разрешением до 2048 пикселей. Это позволяет осуществлять измерение ПП с помощью одной статично установленной видеокамеры (и статичным СДСЭ) в широком диапазоне изменения показателя преломления исследуемых жидкостных образцов с высокой точностью.

2. Дифракционный рефрактометр

В рамках данной работы был разработан и создан экспериментальный образец (ЭО) дифракционного рефрактометра на основе СДСЭ, схема которого представлена на рис. 2. В качестве источника излучения в данном устройстве используется полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 639$ нм. Подложка, на которой закреплен резервуар для исследуемого жидкостного образца, является съемной. Это сделано для удобства очистки резервуара после выполнения измерений. Боковые стенки резервуара, в который заливается исследуемый жидкостный образец, выступают в качестве экрана, с поверхности которого видеокамерой осуществляется регистрация ДК. Форма стенки резервуара выполнена в форме сферического сегмента. СДСЭ в процессе измерения помещается в центр этого сферического сегмента. Данное техническое решение способствует тому, что не зависимо от углового положения

дифракционных порядков угол их падения на стенку резервуара всегда составляет 90° . Благодаря этому при анализе углового положения ДП, зарегистрированных видеокамерой с поверхности резервуара, нет необходимости учитывать преломление излучения на границах раздела сред жидкость/резервуар и резервуар/воздух. В противном случае наличие преломления на данных границах раздела различных сред будет вносить дополнительную погрешность в результат измерения.

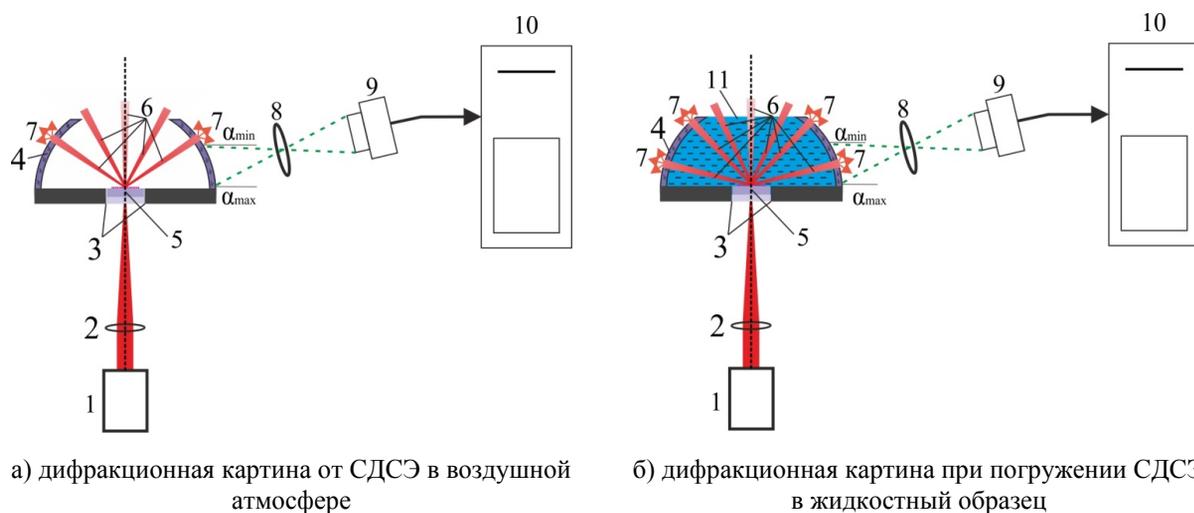


Рис. 2. Схема экспериментального образца дифракционного рефрактометра:

1 — лазер; 2 — фокусирующая линза; 3 — пропускающее окно; 4 — резервуар для исследуемой жидкости; 5 — СДСЭ; 6 — дифрагированное излучение; 7 — излучение, рассеянное на стенках резервуара; 8 — объектив; 9 — видеокамера; 10 — компьютер; 11 — исследуемая жидкость

Если измерение ПП осуществлять по контролю углового положения ДП с номером $m = 1$, то периоды дифракционных решеток, формирующих структуру СДСЭ, должны быть $\sim 0,4\text{--}0,5$ мкм. Однако с технологической (и экономически эффективной) точки зрения желательным является изготовление СДСЭ с минимальным периодом структур ≥ 1 мкм. В связи с этим в ЭО дифрактометрического рефрактометра измерение ПП осуществляется по регистрации и анализу углового положения ДП с номером $m = 3$. Использование для измерений третьего порядка дифракции обладает еще одним преимуществом. При освещении такого сенсора лазерным пучком в воздушной атмосфере (рис. 2а) каждая дифракционная решетка формирует дифракционные порядки с порядковыми номерами $|m| < 3$, наличие которых позволяет существенно упростить настройку оптической схемы устройства.

Для того чтобы сформировать дифракционную картину при погружении СДСЭ в жидкостный образец материал штрихов периодических структур должен иметь показатель преломления существенно отличающийся от показателя преломления измеряемой жидкости. В связи с этим СДСЭ для дифракционного рефрактометра был изготовлен с использованием фоторезистивной технологии лазерной записи на пленке хрома, напыленной на стеклянную подложку, с последующим частичным травлением металлической пленки и формированием на подложке амплитудного периодического рельефа из металлических штрихов. Периоды решеток, составляющих структуру изготовленного СДСЭ, составили: $d_1 = 1,46$ мкм, $d_2 = 1,37$ мкм, $d_3 = 1,28$ мкм, $d_4 = 1,20$ мкм. В свою очередь углы ориентации решеток составили: $\varphi_1 = -1,5^\circ$, $\varphi_2 = -0,5^\circ$, $\varphi_3 = 0,5^\circ$, $\varphi_4 = 1,5^\circ$ (рис. 3). Диапазон измеряемых значений показателя преломления на созданном ЭО дифракционного рефрактометра с использованием данного СДСЭ составил $1,3200\text{--}1,7200$.

С помощью созданного экспериментального образца дифракционного рефрактометра было проведено измерение показателя преломления образцов водного раствора глицерина, смешанных в различной пропорции вода/глицерин. Результаты измерений сравнивались с данными, полученными на рефрактометре ИРФ-22 [18]. Полученные значения приведены в таблице 1. Рефрактометр ИРФ-22, в отличие от созданного дифракционного рефрактометра, позволяет измерять значения показателя преломления на длине волны, соответствующей желтой D-линии натрия ($\lambda = 589,3$ нм). Для растворов глицерин/вода известно, что на длине волны 639 нм значение показателя преломления на $0,0014\text{--}0,0017$ меньше, по сравнению с длиной волны 589 нм [19, 20]. Учитывая это, можно отметить, что результаты, полученные на разработанном ЭО дифракционного рефрактометра и с помощью рефрактометра ИРФ-22, хорошо согласуются между собой.

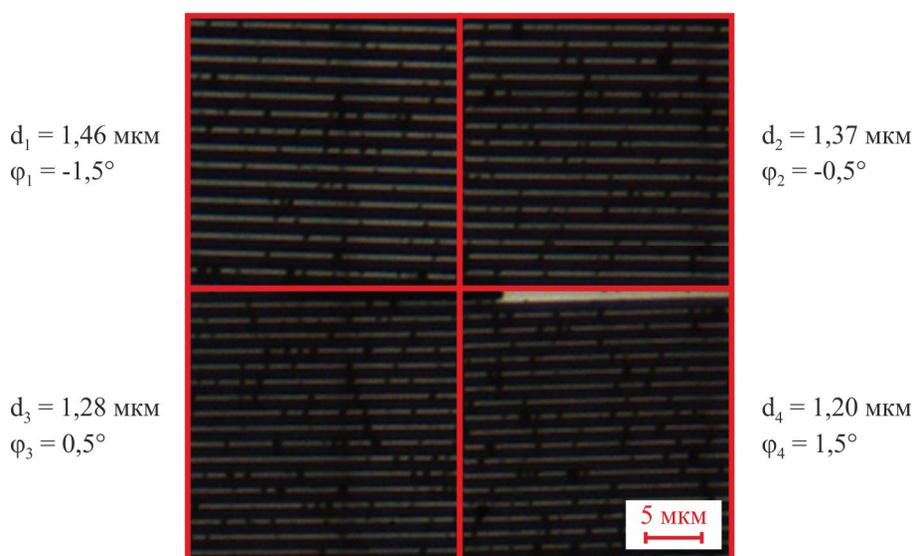


Рис. 3. Микрофотография в отраженном свете центрального фрагмента СДСЭ

Таблица 1. Измерение показателя преломления водного раствора глицерина

Образец	Массовая доля воды, %	Массовая доля глицерина, %	$n (\lambda= 589,3 \text{ нм})$	$n (\lambda= 639 \text{ нм})$
1	100	0	1,335	1,3336
2	90	10	1,345	1,3435
3	70	30	1,367	1,3656
4	50	50	1,392	1,3901
5	40	60	1,404	1,4025
6	30	70	1,417	1,4155
7	20	80	1,430	1,4284
8	10	90	1,443	1,4409
9	0	100	1,456	1,4544

Заключение

Разработан дифракционный рефрактометр для характеристики образцов жидкостей на основе измерения их показателя преломления. Особенностью предложенной концепции дифрактометрического устройства является использование специального секторального дифракционного сенсорного элемента, состоящего из нескольких (в частности, четырех) решеток с различным периодом и угловой ориентацией структур. Каждая отдельная решетка СДСЭ позволяет осуществлять контроль в определенном диапазоне показателя преломления. Это позволяет расширить диапазон измеряемых значений ПП без потери точности (за счет регистрации и анализа ДП, дифрагированных в максимально чувствительном к изменению ПП угловом диапазоне углов дифракции), и без необходимости использовать в процессе измерения подвижные элементы для поворота дифракционной решетки или для сканирования дифракционной картины блоком регистрации в широком диапазоне углов дифракции. Определение показателя преломления жидкостных образцов на разработанном устройстве осуществляется по измерению двух параметров: угла дифракции и угловой ориентации дифракционного порядка, сформированного одной из решеток СДСЭ и попадающего в поле обнаружения видеокамеры.

Для апробации разработанного устройства был создан экспериментальный образец дифракционного рефрактометра, который позволяет осуществлять измерение показателя преломления в диапазоне значений 1,3200–1,7200 на длине волны 639 нм. Результаты измерения ПП образцов водного раствора глицерина, выполненные на созданном устройстве показали хорошее согласование с данными, полученными на рефрактометре ИРФ-22.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям в рамках программы «УМ-НИК», а также за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания ИАиЭ СО РАН (гос. регистрационный № 124041700107-9) с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Khodier, S. A.** Refractive index of standard oils as a function of wavelength and temperature / S. A. Khodier // *Optics & Laser Technology*. — 2002. — Vol 34. — № 2. — P. 125–128.
- [2] **Belda, R.** A study of the refractive index and surface tension synergy of the binary water/ethanol: influence of concentration / R. Belda, J. Herraiez, O. Diez // *Physics and Chemistry of Liquids*. — 2005. — Vol 43. — № 1. — P. 91–101.
- [3] **Daimon, M.** Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region / M. Daimon, A. Masumura // *Applied optics*. — 2007. — Vol 46. — № 18. — P. 3811–3820.
- [4] **Kedenburg, S.** Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region / S. Kedenburg, M. Vieweg, T. Gissibl, H. Giessen // *Optical Materials Express*. — 2012. — Vol 2. — № 11. — P. 1588–1611.
- [5] **Seki, S.** Comprehensive refractive index property for room-temperature ionic liquids / S. Seki, S. Tsuzuki, K. Hayamizu, Y. Umebayashi, N. Serizawa, K. Takei, H. Miyashiro // *Journal of Chemical & Engineering Data*. — 2012. — Vol 57. — № 8. — P. 2211–2216.
- [6] **Liu, P. Y.** Cell refractive index for cell biology and disease diagnosis: past, present and future / P. Y. Liu, L. K. Chin, W. Ser, H. F. Chen, C.-M. Hsieh, C.-H. Lee, K.-B. Sung, T. C. Ayi, P. H. Yap, B. Liedberg, K. Wang, T. Bourouinaj, Y. Leprince-Wang // *Lab on a Chip*. — 2016. — Vol 16. — № 4. — P. 634–644.
- [7] **Вишняков, Г. Н.** Гониометрические методы измерений показателя преломления / Г. Н. Вишняков, А. И. Юрин // *НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. — 2023. — С. 250–253.
- [8] **Abbas, B.** An experimental method for determination of the refractive index of liquid samples using Michelson interferometer / B. Abbas, M. Alshikh Khalil // *Acta Physica Polonica A*. — 2016. — Vol 129. — № 1. — P. 59–63.
- [9] **Sobral, H.** Determination of the refractive index of glucose-ethanol-water mixtures using spectroscopic refractometry near the critical angle / H. Sobral, M. Peña-Gomar // *Applied optics*. — 2015. — Vol 54. — № 28. — P. 8453–8458.
- [10] **Chong, J. H.** Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer / J. H. Chong, P. Shum, H. Haryono, A. Yohana, M. K. Rao, C. Lu, Y. Zhu // *Optics Communications*. — 2004. — Vol 229. — № 1-6. — P. 65–69.
- [11] **Zhang, M.** Power-type liquid-level sensor for high refractive index liquid based on long-period fiber grating / M. Zhang, Z. Hu, X. Wang, L. Xue, J. Zou, Y. Du, L. Wang // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2021. — Vol 324. — P. 112652.
- [12] **Lu, S. H.** Liquid refractometer based on immersion diffractometry / S. H. Lu, S. P. Pan, T. S. Liu, C. F. Kao // *Optics Express*. — 2007. — Vol 15. — № 15. — P. 9470–9475.
- [13] **Hsu, C. C.** Refractive index measurement using laser diffractometer / C. C. Hsu, T. S. Liu // *2011 Fifth International Conference on Sensing Technology*. — IEEE. — 2011. — P. 370–375.
- [14] **Durán-Ramírez, V. M.** Measurement of the refractive index by using a rectangular cell with a fs-laser engraved diffraction grating inner wall / V. M. Durán-Ramírez, A. Martínez-Ríos, J. A. Guerrero-Viramontes, J. Muñoz-Maciel, F. G. Peña-Lecona, R. Selvas-Aguilar, G. Anzueto-Sánchez // *Optics Express*. — 2014. — Vol 22. — № 24. — P. 29899–29906.
- [15] **Liu, C. W.** The Measurement of the Refractive Index of Transparent Liquids by Using Holographic Grating / C. W. Liu, C. H. Lee, C. J. Ting, T. H. Lin, C. F. Lan, S. C. Lin // *Signal Recovery and Synthesis*. — Optica Publishing Group. — 2014. — P. JT4A. 20.
- [16] **Dib, L. F. G.** Immersed diffraction grating refractometers of liquids / L. F. G. Dib, E. A. Barbosa // *Applied Optics*. — 2016. — Vol 55. — № 30. — P. 8582–8588.
- [17] **Barbosa, E. A.** Diffractive refractometer for liquid characterization and transient processes monitoring / E. A. Barbosa, L. F. G. Dib // *Review of Scientific Instruments*. — 2017. — Vol 88. — № 7. — P. 073103.
- [18] Рефрактометр ИРФ-22. [Электронный ресурс] / URL: <https://tsput.ru/res/fizika/9/instruction/IRF-22-1.pdf>
- [19] Вода. Оптические константы. Refractiveindex.info. [Электронный ресурс] / URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=other&book=H2O-C3H5%28OH%293&page=Gupta-0>
- [20] Глицерин. Оптические константы. Refractiveindex.info. [Электронный ресурс] / URL: <https://refractiveindex.info/?shelf=other&book=H2O-C3H5%28OH%293&page=Gupta-100>

Diffraction refractometer for characterization of liquid samples

D. A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

The results of the diffraction refractometer development that allows measurements in a wide range of changes in the refractive index of the investigation liquids are presented. The developed device uses a sectoral diffraction sensor element (SDSE), consisting of four gratings with different periods and angular orientation. During the measurement process, the spatial position of diffraction orders is recorded by a statically installed camera directly from the surface of the fluid container with investigation liquid, the walls of which are made in the form of a spherical segment. It is shown that the use of SDSE allows one to expand the range of measured values of the refractive index of the investigation liquids without loss of accuracy. This is achieved through the analysis of diffraction orders diffracted in the angular range of diffraction angles that is most sensitive to changes in the refractive index.

Keywords: *Diffraction optics, Refractive index, Liquids, Diffraction sensor, Measuring system, Image processing*

Интерферометры фазового сдвига для контроля отклонений от плоскостности крупногабаритных оптических деталей

И. Ю. Фандиенко

ООО «Электростекло», Москва, Россия

Интерферометры фазового сдвига предназначены для бесконтактных измерений геометрических величин профиля оптических поверхностей и измерения по ним параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей для производственного оптического контроля по государственной поверочной схеме для средств измерений параметров отклонений от плоскостности и сферичности оптических поверхностей, утвержденной приказом Росстандарта № 3189 от 15.12.2022 г.

Ключевые слова: Схема Тваймана-Грина, Оптический контроль, Крупногабаритная оптика, Интерферометрия, Метод фазовых шагов

Введение

Принцип действия приборов «PhSh» основан на интерференции двух пучков света — одного, отраженного от опорного зеркала, и второго, отраженного от измеряемой поверхности. Приборы реализованы по схеме неравноплечного интерферометра Тваймана-Грина. Восстановление фазы из интерферограмм и получение информации об отклонениях от плоскостности оптических поверхностей проводится методом фазового сдвига. Для этого изменяется оптическая разность хода между опорным и предметным пучками [1].

Конструктивно приборы представляют собой модульную систему, состоящую из лазера, коллиматора, светоделительного элемента, опорного зеркала, согласующего объектива и видеокамеры.

Оптическая схема интерферометров — схема интерферометра Тваймана-Грина, представленная на рисунке 1.

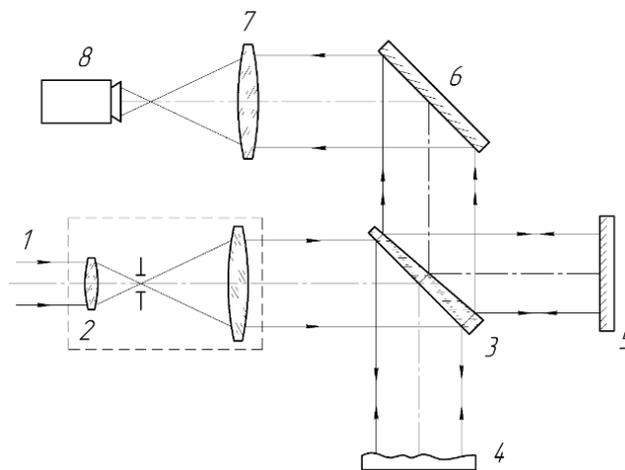


Рис. 1. Оптическая схема приборов

Лазерное излучение 1 с помощью коллиматора 2 расширяется 30 мм, образованный параллельный пучок направляется на светоделительную пластину 3. В предметном канале интерферометра располагается измеряемая оптическая поверхность 4, в другом — опорное эталонное зеркало 5. Интерференционное изображение поверхности 4 с помощью поворотного зеркала 6 и согласующего объектива 7 строится в плоскости регистратора 8 в виде ПЗС- или КМОП-камеры.

Автоматизированная расшифровка интерферограмм производится по методу дискретного фазового сдвига, вносимого между опорным и предметным пучками. Основное отличие между двумя модификациями интерферометров «PhSh» «PhSh-Пьезо» и «PhSh-Лямбда» состоит в способе реализации этого фазового сдвига.

В приборе «PhSh-Пьезо» фазовый сдвиг достигается изменением оптической разности хода между опорным и предметным пучками при помощи механического смещения опорного зеркала 5 по средствам пьезопривода. В качестве источника излучения используется излучение He-Ne лазера с длиной волны 632 нм.

В приборе «PhSh-Лямбда» фазовый сдвиг достигается изменением оптической разности хода между опорным и предметным пучками при помощи изменения длины волны лазерного излучения λ , изменение длины волны происходит путем изменения угла поворота дифракционной решетки внешнего резонатора полупроводникового лазера. Центральная длина волны рабочего диапазона лазера равна 654 нм, ширина диапазона — 4 нм.

Интерферограммы при различных значениях оптической разности хода между опорным и предметным пучками регистрируются с помощью регистратора 8 и передаются в персональный компьютер, где производится их автоматическая обработка.

Результаты измерений в виде двумерного распределения высоты профиля измеряемой поверхности и графиков сечений отображаются на экране компьютера. По полученной информации о высоте профиля поверхности находится методом наименьшего отклонения средняя плоскость, рассчитываются максимальное отклонение от этой плоскости PV, среднее квадратическое отклонение от плоскости RMS, а также параметры волнистости и шероховатости в различных диапазонах пространственных частот измеренной поверхности. Для управления вводом изображений, сдвигом пьезоэлемента и изменением длины волны полупроводникового лазера, расшифровки интерферограмм и вычисления параметров поверхности используется специальное программное обеспечение «PiezoScan», работающее в операционной среде Microsoft Windows.

Заключение

Модификация интерферометра на основе схемы Тваймана Грина с применением метода фазовых шагов позволила существенно повысить точность, а также воспроизводимость измерений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Гужов, В.И.** Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии / В.И.Гужов, С.П. Ильиных, Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С. // Автоматика и программная инженерия. — 2013. — № 1. — С. 10–15.
- [2] **Ильиных, С.П.** Траекторный анализ интерферограмм в методе фазовых шагов. Новые возможности / С.П. Ильиных // Автоматика и программная инженерия. — 2012. — № 2. — С. 9–22.
- [3] **Вишняков, Г.Н.** Сдвиговая спекл-интерферометрия с использованием метода фазовых шагов / Г. Н. Вишняков, А. Д. Иванов, Г. Г. Левин, В. Л. Минаев // Квантовая электроника. — 2020. — С. 636–642.

Phase shift interferometers for monitoring flatness deviations of large optical components

I. Yu. Fandienko

Elektrosteklo, Moscow, Russia

Phase shift interferometers are intended for contactless measurements of geometric values of the profile of optical surfaces and measurements of parameters of deviations from flatness of optical surfaces for industrial optical control according to the state verification scheme for measuring instruments of parameters of deviations from flatness and sphericity of optical surfaces, approved by order of Federal Agency on Technical Regulating and Metrology Rosstandart No. 3189 dated 12/15/2022.

Keywords: *Twyman-Green scheme, Optical control, Large-size optics, Interferometry, Phase stepping method*

Мобильный цифровой спекл-интерферометр для исследования связанных колебаний элементов конструкции роторных систем

А. В. Ивченко, А.И. Жужукин, Р. Н. Сергеев

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Разработан мобильный цифровой спекл-интерферометр с непрерывным лазерным излучателем и диффузно-рассеивающим элементом, устанавливаемый перед объектом исследования. Спекл-интерферометр апробирован при регистрации полей вибросмещений собственных форм колебаний рабочих колес газотурбинных двигателей. Подтверждена возможность эксплуатации созданного измерительного комплекса без виброизоляции оптической схемы спекл-интерферометра. Обсуждается применение мобильного цифрового спекл-интерферометра в составе испытательного оборудования по доводке изделий авиационной техники.

Ключевые слова: Роторная Система, Колесо Турбины, Связанные Колебания, Спекл-Интерферометрия, Регистрация, Вибросмещение

Задачи повышения надежности турбомашин неразрывно связаны с исследованием сложных динамических процессов, возникающих в роторных системах, и обеспечением вибропрочности составляющих ротор конструктивных элементов [1–2]. Практическое решение данной проблемы связано с экспериментальным исследованием собственных форм колебаний и частот ответственных деталей с целью разработки мероприятий по отстройке их от резонанса [1]. Согласно [2–3] подобное исследование может быть выполнено средствами цифровой спекл-интерферометрии, обеспечивающей получение количественной информации о вибросмещении объекта с большим пространственным разрешением при высоком темпе проведения измерений. В работе представлен мобильный цифровой спекл-интерферометр, предназначенный для регистрации связанных колебаний рабочих колес газотурбинных двигателей (рис. 1). Спекл-интерферометр состоит из приемно-передающего блока (поз. 1–6), смонтированного на подвижном шасси геодезического штатива и узла крепления рабочих колес, установленного на отдельно расположенной платформе (поз. 8–17, 20). Особенностью оптической схемы интерферометра является использование диффузно-рассеивающего элемента с полимерным пленочным покрытием, установленным на магнитной подвеске перед объектом исследования [4]. Диффузно-рассеивающий элемент обеспечивает формирование спекл-модулированного опорного пучка и его интерференцию со светом, диффузно отраженным от поверхности объекта. Обработка видеопотока производилась при помощи модифицированного алгоритма, исходная версия которого изложена в работе [3].

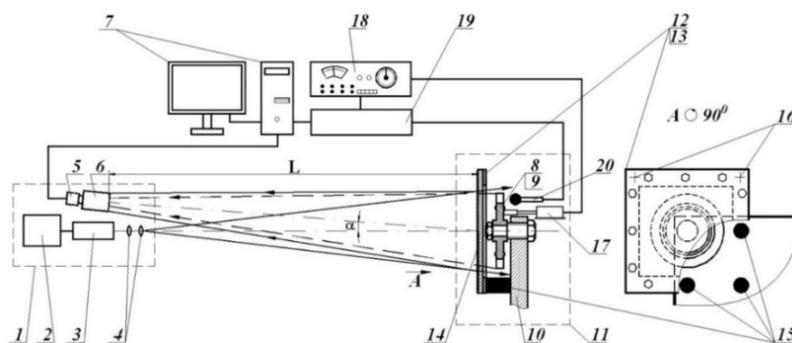


Рис. 1. Схема мобильного цифрового спекл-интерферометра для исследования режима вибрации рабочих колес газотурбинных двигателей:

1 — подвижный геодезический штатив; 2 — источник питания твердотельного лазера с диодной накачкой (DPSS-лазер); 3 — непрерывный DPSS-лазер; 4 — формирователь пучка; 5 — видеокамера; 6 — объектив видеокамеры; 7 — компьютер; 8 — рабочее колесо (объект); 9 — болтовое соединение; 10 — голографический стенд; 11 — основание; 12, 13 — диффузно-рассеивающий элемент; 14 — полимерное пленочное покрытие; 15 — точки магнитной подвески; 16 — дополнительные точки крепления; 17 — пьезоэлектрический механический привод; 18 — генератор звуковых частот; 19 — осциллограф; 20 — микрофон. $L = 2000$ мм $\alpha = 10\text{--}15^\circ$

При экспериментальной эксплуатации созданного спекл-интерферометра была показана возможность регистрации интерферограмм без виброизоляции оптической схемы прибора (рис. 2). Произведена оптимизация наносимого на поверхность диффузно-рассеивающего элемента полимерного покрытия (рис. 1) по параметру светопропускания τ .

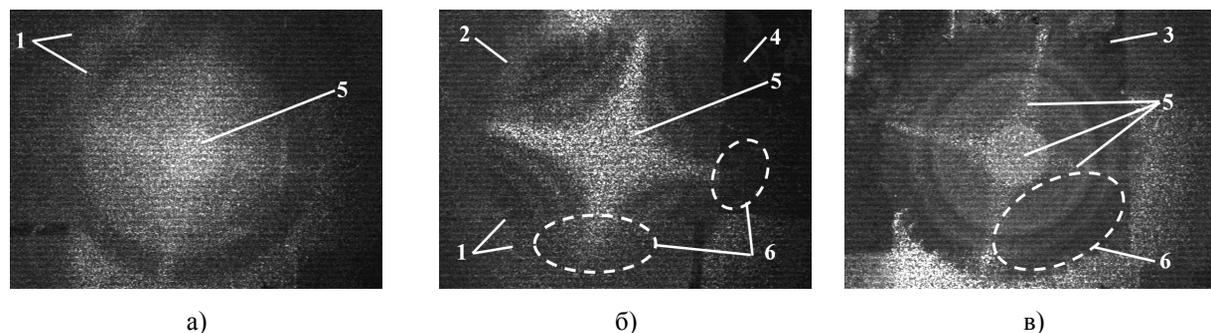


Рис. 2. Результаты регистрации интерферограмм колеблющегося колеса турбины ($\varnothing 280$ мм) при помощи мобильного спекл-интерферометра без виброизоляции оптической схемы при наличии полимерного пленочного покрытия на поверхности диффузно-рассеивающего элемента:

1 — участок пленки с прозрачностью τ_a ; 2 — участок пленки с прозрачностью τ_6 ; 3 — участок пленки с прозрачностью τ_b ; 4 — участок поверхности диффузно-рассеивающего элемента без покрытия; 5 — светлая полоса нулевого порядка (зона узла колебаний рабочего колеса турбины); 6 — область потери информации о колебании турбины. $\tau_a < \tau_6, < \tau_b$

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования разработанного прибора в составе стендового комплекса поузловой доводки конструкций газотурбинных двигателей.

Научная работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-10066.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Иванов, В.П.** Колебания рабочих колес турбомашин / В. П. Иванов — М.: Машиностроение, 1983. — 224 с.
- [2] **Федорченко, Д.Г.** Прочностная доводка и устранение основных дефектов ГТД / Д. Г. Федорченко, Е. П. Кочеров — Самара: Издатель Исакова Т.С. (БИЮР), 2022, 431 с.
- [3] **Журавлев, О.А.** Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций / О. А. Журавлев, Ю. Н. Шапошников, Ю. Д. Щеглов, С. Ю. Комаров — Самара: Изд-во СГАУ, 2005. — 193 с.
- [4] **Ivchenko, A.V.** The system development for digital recording of speckle-interferograms of an oscillating object without vibration isolation / A. V. Ivchenko, A. I. Zhuzhukin // International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM 2020). — 2020. — P. 1–8. ID: 978-1-7281-7526-3/20/\$31.00 IEEE.

Mobile digital speckle pattern interferometer for studying the coupled vibration of structural components in the rotor systems

A.V. Ivchenko, A.I. Zhuzhukin, R.N. Sergeev

¹ Samara National Research University, Samara, Russia

A mobile digital speckle pattern interferometer with a continuous laser and a diffuse-scattering element vibration displacement fields placed in front of the research object has been developed. The speckle interferometer has been tested at detection of natural vibration modes of the bladed wheels of gas turbine engines. The operation possibility for the created measuring system without isolation the optical circuit of the speckle interferometer from vibration has been confirmed. The application possibility of a mobile digital speckle interferometer as part of the testing equipment for debugging the aerospace products is discussed.

Keywords: Rotor system, Turbine wheel, The coupled vibration, Speckle pattern interferometry, detection, Vibration displacement

Особенности метрологического обеспечения в области измерений параметров отклонений формы оптических асферических поверхностей

Д. А. Новиков

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы», Москва, Россия

Рассмотрены проблемы метрологического обеспечения измерений параметров отклонений формы асферических поверхностей. Представлены результаты совершенствования государственного первичного эталона ГЭТ 183 в части измерений параметров отклонения формы сферических поверхностей. Детали со сферическими и асферическими поверхностями, такие как линзы и зеркала, находят широкое применение в оборонной, космической, оптико-механической промышленности, микроэлектронике и научных исследованиях.

Ключевые слова: Отклонение формы оптических поверхностей, Асферическая поверхность

Использование асферических поверхностей позволяет уменьшить габариты оптических систем приборов, улучшить качество изображения, а также существенно уменьшить абберации системы. Для контроля и измерений отклонений формы таких поверхностей существует множество рабочих средств измерений как отечественного, так и зарубежного производства, например интерферометры, работающие по схеме Физо (предприятий АО «ЛОМО», ЗАО «Дифракция», ООО «Опто-ТЛ», фирмы Zygo и др.), датчики волнового фронта, контактные универсальные приборы для измерений профиля поверхности (фирмы Taylor Hobson, Mahr и др.) и т. д.

Задачу метрологического обеспечения измерений параметров отклонений формы оптических поверхностей выполняет государственный первичный специальный эталон ГЭТ 183, который еще недавно обеспечивал воспроизведение, хранение и передачу единицы длины только для плоских оптических поверхностей. Однако на данный момент в стране отсутствует метрологическое обеспечение в области измерений параметров отклонений формы выпуклых асферических поверхностей: отсутствуют эталонные средства измерений, методики поверки и калибровки, государственные поверочные схемы и т. д.

Разработка универсального эталонного средства измерений осложняется тем, что известные методы измерений параметров отклонений формы асферических поверхностей либо, ввиду своей специфики, привязаны к определенному типу поверхности, либо не позволяют измерять с точностью, соответствующей современным требованиям промышленности.

Все сказанное указывало на проблему метрологического обеспечения измерений параметров отклонений формы выпуклых оптических сферических и асферических поверхностей и важность ее решения.

Для решения задачи метрологического обеспечения измерений параметров отклонений формы выпуклых крупногабаритных сферических и асферических поверхностей ранее была проведена опытно-конструкторская работа «Асферика». В результате выполнения данной работы был разработан метод и на его основе изготовлен макет уникальной эталонной установки для измерений выпуклых оптических поверхностей (рис. 1) [2, 3], которые были запатентованы в системе Роспатента [3].

Полученные результаты использовались при совершенствовании существующего государственного первичного специального эталона ГЭТ 183-2019 (ГПСЭ), который обеспечивает воспроизведение, хранение и передачу единицы длины отклонений формы плоских оптических поверхностей. При этом была проведена доработка разработанного в рамках ОКР «Асферика» макета интерференционной установки для измерений параметров отклонений формы выпуклых сферических поверхностей и разработка эталонной интерференционной установки для измерений параметров отклонений формы вогнутых сферических поверхностях. Также для осуществления передачи единицы длины в области измерений параметров отклонений формы сферических поверхностей был разработан комплект мер отклонений от сферичности для выпуклых и вогнутых поверхностей.

Разработанная установка, работающая на базе интерференционной установки с ортогональным ходом лучей, вошло в состав государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений параметров отклонений от плоскостности и сферичности оптических поверхностей (ГЭТ 183) и успешно прошло государственные испытания. Усовершенствованный эталон утвержден Приказом Росстандарта № 378 от 16.02.2022.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **ГОСТ 2786-82.** Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. Технические условия. — Введен 01.01.1984.
- [2] **Batshev, V. I.** Testing method of large-sized convex optical surfaces / V. I. Batshev, A. E. Gavlina, D. A. Novikov // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. — 2018. Vol. 153. — DOI: 10.1117/12.2504364.
- [3] **Патент № 2019103813 РФ.** Научное изобретение / Д. А. Новиков, Н. В. Иванникова, В. И. Батшев, А. С. Мачихин, А. Е. Гавлина. — Оpubл. 18.11.2019.

Features of metrological support in the field of measuring the parameters of shape deviations of optical aspherical surfaces

D. A. Novikov

All-Russian Research Institute of Metrological Service, Moscow, Russia

This paper considers the problems of metrological support for measurements of parameters of deviations of the shape of aspherical surfaces. It also presents the results of improvements to the state primary standard “GET 183” in terms of measurements of parameters of deviations of the shape of spherical surfaces. Parts with spherical and aspherical surfaces, such as lenses and mirrors, are widely used in a number of industries, including defence, space, optical-mechanical, microelectronics and scientific research.

Keywords: *Shape deviation of optical surfaces, Aspherical surface*

О возможности применения неравноплечего лазерно-голографического интерферометра для имитационного моделирования процесса космологического «старения» света

А. В. Лукин

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

Предложено выполнить физическое моделирование процесса «старения» света при помощи неравноплечего лазерно-голографического интерферометра. Рассмотрены два варианта его реализации: многоходовой и с волоконным световодом в объектном плече.

Ключевые слова: «Старение» света, Неравноплечий лазерно-голографический интерферометр, Волоконный световод, Голограмма, Интерференционная картина, Метагалактика

Многочисленные данные современной наблюдательной астрономии убедительно свидетельствуют о наличии космологического красного смещения в спектрах удаленных космических объектов. Существует версия «Большого взрыва», в результате которого космические объекты метагалактики ускоренно отдаляются друг от друга 14 млрд земных лет, что вызывает Доплеровский эффект и соответствующее спектральное красное смещение [1, 2]. Имеется и альтернативное толкование, основанное на идее «старения» света [1–3].

В докладе представлены основные параметры двух вариантов принципиальных схемных решений модифицированных интерферометров типа Майкельсона и Физо для имитационного моделирования процесса возможного «старения» света (фотонов). Их основными компонентами являются:

- одночастотный стабилизированный лазер с высокой временной когерентностью [4];
- объектное плечо неравноплечего интерферометра, которое должно иметь максимально возможную оптическую длину;
- физическая голограмма, исключая влияние дефектов оптических элементов и погрешностей их взаиморасположения в интерферометре;
- позиционно чувствительный фотоприемник (ПЗС-матрица) с выходом на ПК.

В варианте с многоходовым объектным плечом предполагается использовать в нем дополнительный оптический блок из двух высокоотражающих зеркал, что позволяет многократно увеличить его эффективную оптическую длину, как это успешно реализовано в интерферометрической части гравитационно-волновых детекторов LIGO (США) и VIRGO (Франция-Италия). В проекте VIRGO, например, оба плеча интерферометра типа Майкельсона при их фактическом размере три километра имеют эффективную длину 120 км [5].

Вариант с волоконным световодом в объектном плече обладает очевидным преимуществом в реализации в силу своей исключительной компактности [6].

В обоих вариантах применение фотоэлектрического дифференцирования распределения интенсивности в интерференционной картине [7] (при настройке на полосы конечной ширины) позволяет существенно повысить чувствительность измерений.

Особый интерес представило бы размещение неравноплечего интерферометра в космосе: на строящейся Российской обсерватории «Миллиметрон» [8] или на одном из геостационарных спутников [9], а ретроотражатель его объектного плеча, например, на Луне.

Список источников

- [1] Зельдович, Я. В. Строение и эволюция Вселенной / Я. В. Зельдович, Новиков И. Д. М.: Наука. — 1975. — 736 с.
- [2] Мельников, О. А. Недоплеровские объяснения красного смещения / О. А. Мельников, В. С. Попов // Некоторые вопросы физики космоса. — М.: ВАГО АН СССР, 1974. — С. 9–32.
- [3] Ивлев, Л. С. Этюды натуралиста / Л. С. Ивлев. — М.: ВВМ, 2011. — 422 с.
- [4] Лукин, А. В. К вопросу о когерентных свойствах лазерных источников в интерферометрии и голографии / А. В. Лукин // Оптический журнал. — 2012. — Т. 79. — № 3. — С. 91–96.
- [5] Интерферометр VIRGO / URL: <http://www.virgo-gw.eu>
- [6] Буйнов, Г. Н. Голографический интерферометр с волоконным световодом / Г. Н. Буйнов, А. В. Лукин, К. С. Мустафин // ОМП. — 1970. — № 10. — С. 70.
- [7] Буйнов, Г. Н. Простой метод измерения функции рассеяния оптической системы / Г. Н. Буйнов, А. В. Лукин, К. С. Мустафин // Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии. — 1971. — Том 16. — № 1. — С. 46–48.
- [8] Астрокосмический центр ФИАН. Космическая обсерватория «Миллиметрон» / URL: <http://millimetron.ru>

[9] ТехноФорум Телекоммуникации / URL: <https://forumtech.ru/novosti-v-sfere-telekommunikacij/geostacionarnye-sputniki#menu>

On the possibility of using the unequal-arm laser-holographic interferometer for simulation modeling of the process of cosmological “ageing” of light

A.V. Lukin

JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

It is proposed to perform a physical modeling of the process of light “ageing” by means of a unequal-arm laser-holographic interferometer. We consider two options of its implementation: multi-pass, and with a fiber counter in the object arm.

Keywords: *“Ageing” of light, Unequal-arm laser-holographic interferometer, Fiber light guide, Hologram, interference pattern, Metagalaxy*

О необходимости учета влияния интерференции в тонких пленках на эффективность голограмм, регистрируемых на тонких светочувствительных слоях

Н. М. Ганжерли¹, Р. Х. Макаева², А. М. Царева²

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия

Продемонстрировано влияние интерференции в тонких пленках светочувствительного материала, приводящее к колебаниям оптических характеристик, а также дифракционной эффективности голограмм при изменении толщины слоя.

Ключевые слова: Голография, Интерференция в тонких пленках, Дифракционная эффективность

Введение

Для исследования влияния интерференции в тонких пленках (ВИВТП) на оптические характеристики материала, а также на дифракционную эффективность (ДЭ) голограмм были выбраны пленки халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) AsSe толщиной 0,5–3,5 мкм. Коэффициент поглощения и показатель преломления пленок на длине волны 0,63 мкм, измеренные после напыления, равны 0,5 мкм⁻¹ и 2,8 соответственно.

Запись и считывание голограмм на пленках AsSe

При неравномерности в результате напыления пленки по толщине d в отраженном или прошедшем свете можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Толщина d в месте падения луча, соответствующая максимуму или минимуму отражения, вычисляется по известной формуле:

$$d = \lambda k / 2 n \cos \alpha,$$

где λ — длина волны в вакууме; n — показатель преломления пленки; α — угол падения света на пленку; k — целое число, причем четные числа k соответствуют максимумам, а нечетные — минимумам [1]. В случае падения света перпендикулярно поверхности образца при $n = 2,8$ и $\lambda = 0,63$ мкм величины пропускания и отражения колеблются с периодом 0,113 мкм из-за интерференционных эффектов, которые велики из-за высокого показателя преломления ХСП. Аналогичные колебания имеют место и в величине поглощения света в пленке. В местах с максимальным пропусканием наблюдается минимальное поглощение и наоборот.

Для исследования ВИВТП на величину ДЭ η использовались образцы с клинообразным изменением толщины напыленного слоя ХСП от 0,2 до 3,2 мкм. Голограммы с пространственной частотой около 600 л/мм регистрировались по симметричной схеме He-Ne лазером I мощностью порядка 40 мВт (рис. 1). Соотношение интенсивности света в интерферирующих пучках было 1:1. Плотность мощности излучения при записи была 1 Вт/см².

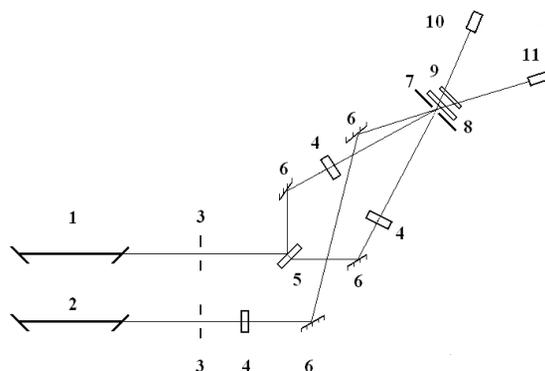


Рис. 1. Схема установки для измерения дифракционной эффективности

Для непрерывной регистрации с помощью фотоприемника 11 интенсивности первого порядка дифракции голограмм использовался маломощный He-Ne лазер 2. Направления поляризации обоих лазеров были ортогональны.

На рисунке 2а приведена часть экспериментальной зависимости максимально достижимой ДЭ η от толщины пленки d . Минимумы кривой разнесены на расстояние порядка 0,110 мкм, близкое к приведенной выше величине. На практике больший интерес представляет усредненная кривая (рис. 2б) с максимумом в районе 5 % в области 1,2–1,4 мкм. С учетом полученных в эксперименте значений φ_1 (1,57–1,88 рад на $d = 1,2$ –1,4 мкм) и τ_0 произведена оценка ДЭ по известной формуле:

$$\eta = \tau_0^2 J_1^2(\varphi_1),$$

где τ_0 — среднее пропускание голограммы; φ_1 — амплитуда изменения фазы; J_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка [2], которая достигает в этой области d своего максимума при $\varphi_1 = 1,86$ рад. Являясь произведением экспоненциально убывающей от d функции τ_0^2 и функции $J_1(\varphi_1)$ с максимумом, ДЭ также имеет максимум в области указанных выше толщин, что согласуется с экспериментально полученной зависимостью η от d (рис. 2б).

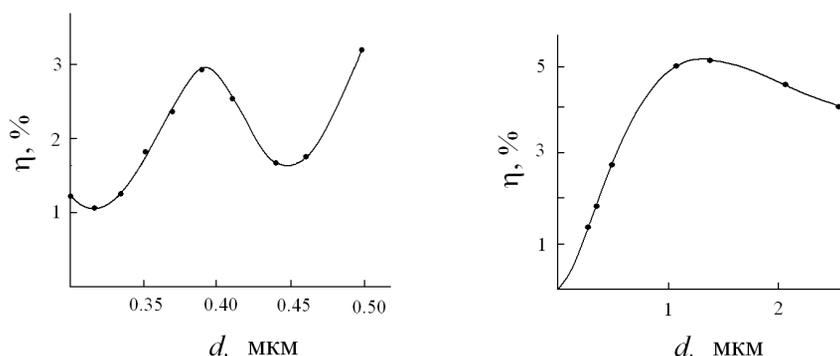


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности голограмм η от толщины пленки d : а) часть экспериментальной зависимости ДЭ; б) усредненная ДЭ

Заключение

Исследования показали ВИВТП на оптические характеристики материала ХСП системы As-Se и на величину ДЭ. Подобное влияние существенно для любых светочувствительных слоев, особенно для материалов с высоким показателем преломления.

Список источников

- [1] Михельсон, А.В. Волновая оптика: учебное пособие / А. В. Михельсон, Т. И. Папушина, А. А. Повзнер. — М.: Изд-во Урал. ун-та, 2013. — С. 11–12.
- [2] Кольер, Р. Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин; пер. под ред. Ю. И. Островского — М.: Мир, 1973. — 686 с.

On the necessity to consider the effect of interference in thin films on the effectiveness of holograms recorded on thin photosensitive layers

N. M. Ganzherli¹, R. Kh. Makaeva², A.M. Tsareva²

¹ Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

² Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan, Russia

The effect of interference in thin films of a photosensitive material leading to fluctuations in optical characteristics, as well as the diffraction efficiency of holograms with a change in layer thickness was demonstrated.

Keywords: Holography, Interference in thin films, Diffraction efficiency

Система поиска отраженного луча макета эталонного дальномера в диапазоне до 600 м

Д. А. Соколов¹, С. А. Козаченков¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Солнечногорск, Россия

В работе представлены принципы функционирования эталонного дальномера в диапазоне до 600 м, его основные узлы и составные части. Уделено особое внимание системе поиска, отраженного от уголкового отражателя луча, т. к. она играет важнейшую роль при проведении измерений на расстоянии в несколько сотен метров в полевых условиях, в дневное время. Применение данной системы позволяет существенно сократить время настройки на отражатель. Проведены испытания макета системы в наиболее неблагоприятный период для полевых измерений: жаркий летний солнечный день. Данная система произвела настройку на отражатель, установленный на максимальной дистанции, равной 600 м, при многократном повторении с вероятностью не менее 70%.

Ключевые слова: Фемтосекундный лазер, Дальномер 600 м, Поиск отраженного луча

Введение

Системы автоматического распознавания цели (Automatic Target Recognition) или автоматического захвата визирной цели применяются во многих средствах измерительной техники таких как тахеометры [1] и трекеры [2]. Они позволяют в автоматическом режиме осуществить поиск измерительного отражателя или нескольких отражателей прибора, удерживать настройку в процессе движения или в результате воздействия внешних условий (кратковременное перекрытие), а также при изменяющихся погодных условиях (изменение показателя преломления среды распространения излучения). Данные системы существенно ускоряют и упрощают процесс измерения расстояния до объекта или его координат.

В основном данные системы функционируют следующим образом. Излучающая часть состоит из лазерного источника, например инфракрасный лазер, излучение которого распространяется коаксиально через основной телескоп прибора, расходимость подбирается в соответствии требуемой областью захвата системы и алгоритмом ее работы, например для тахеометра оптимальным может быть $1,5^\circ$. При попадании лазерного луча в измерительную призму, он отражается обратно в телескоп. Светоделитель, расположенный на оптической оси телескопа, направляет его через ИК-фильтр, например, на КМОП-датчик [3]. Далее используя различные алгоритмы, осуществляется настройка горизонтального и вертикального угла прибора.

Система поиска отраженного луча

В данной работе представлена система поиска отраженного луча (СПОЛ) для макета эталонного дальномера на основе фемтосекундного лазера (ЭДФЛ) [4] в диапазоне 2,5–600 м. ЭДФЛ планируется к использованию в целях обеспечения единства измерений больших длин. С возможностью независимого воспроизведения единицы длины в соответствии с определением метра в международной системе единиц (СИ), а также ее хранение и передачу в соответствующем диапазоне.

СПОЛ интегрирована в оптическую и электрическую систему ЭДФЛ [5], схема которой представлена на рисунке 1. СПОЛ функционирует следующим образом. Оптический блок ЭДФЛ направляется в сторону измерительного отражателя при помощи серводвигателей 13 и 14, контролируя процесс настройки при помощи узла 21. После первичной установки направления прибора включается СПОЛ, и система начинает сканировать область предполагаемого расположения отражателя 1 при помощи серводвигателей 13, 14, управляемых контроллером 12. Отразившись от измерительного отражателя излучение ЭДФЛ попадает в оптическую часть узла предварительной настройки 20, который вырабатывает логический сигнал включения системы точной настройки СПОЛ. При этом блокируется опорное излучение ЭДФЛ при помощи шторки 4, а для дальнейшей работы СПОЛ используется сигнал фотодетектора 10. По окончании процесса настройки эталонный дальномер переводится в режим воспроизведения единицы длины.

Для оценки работоспособности и оптимальности выбранных параметров оптических и электрических схем проведены имитационные исследования работы приемной части СПОЛ на различных расстояниях от ЭДФЛ [6] до измерительного отражателя 1. Между дополнительным расширителем пучка 2 и отражателем 1 устанавливалась система светофильтров с целью снижения мощности поступающего на приемные части СПОЛ излучения. Состав светофильтров подбирался в соответ-

ствии с моделью эксперимента для разных дистанций от 300 до 1700 м. Максимальная дальность была выбрана с существенным запасом на случай возможной разъюстировки ЭДФЛ при транспортировке. Результаты представлены в таблице.

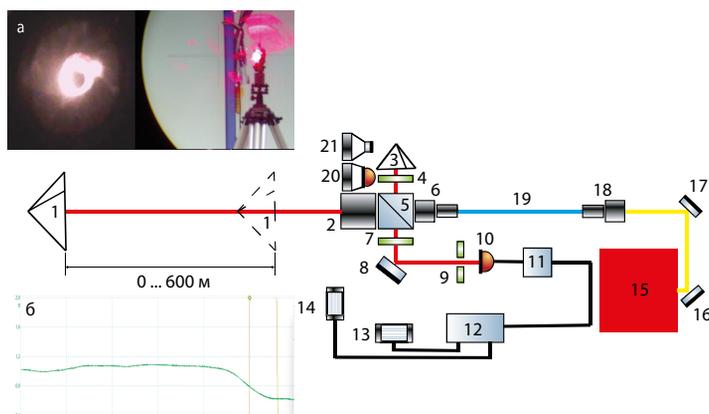


Рис. 1. Принципиальная схема ЭДФЛ:

1 — уголкового отражатель измерительный; 2 — дополнительный расширитель пучка; 3 — уголкового отражатель опорный; 4 — шторка; 5 — светоделительный кубик; 6 — коллиматор оптического волокна; 7 — линза; 8, 16, 17 — плоские зеркала; 9 — диафрагма; 10 — фотодетектор (фотодиод); 11 — блок обработки фототока; 12 — контроллер двигателей; 13, 14 — серводвигатели; 15 — фемтосекундный волоконный лазер; 18 — волоконный порт; 19 — оптическое волокно; 20 — узел предварительной настройки; 21 — узел визуального контроля; а — отраженный луч на диафрагме 9 и вид на отражатель 1 через 21; б — логический сигнал на выходе 11, поступающий в 12.

Таблица. Экспериментальная проверка работоспособности приемной части СПОЛ в зависимости от изменения мощности лазерного излучения, поступающей на фотодетектор 10

Номер измерения, приблизительное расстояние до отражателя	Мощность лазерного излучения на входе в оптическую систему, мВт	Мощность электрического сигнала фотодетектора 10 (рис. 1), дБм
1 ≈ 300 м	1,3	0,5
2 ≈ 400 м	0,413	-17
3 ≈ 700 м	0,087	-30
4 ≈ 1000 м	0,047	-34
5 ≈ 1200 м	0,018	-43
6 ≈ 1700 м	0,0041	-59

Данные исследования подтвердили возможность применения разрабатываемой оптической системы в рассматриваемом диапазоне дистанций до отражателя.

После имитационных испытаний в лабораторных условиях была проведена серия измерений по оценке работоспособности СПОЛ на дистанции 65 м в тех же условиях — система произвела настройку на отражатель при многократном повторении с вероятностью 97 %. Далее система испытывалась в неблагоприятных погодных условиях для подобных измерений, а именно в полевых условиях в солнечный летний день, на дистанции от 50 до 600 м система произвела настройку на отражатель при многократном повторении с вероятностью 70 %.

Заключение

Реализованная СПОЛ показала работоспособность на малой дистанции 60 м в лабораторных условиях и в полевых до 600 м. Применение данной системы позволяет существенно сократить время настройки на отражатель. Данная система произвела настройку на отражатель, установленный на максимальной дистанции, равной 600 м, при многократном повторении с вероятностью не менее 70 %. Система имеет перспективы к дальнейшему совершенствованию как алгоритмов сканирования, так и оптической части при использовании КМОП матриц в качестве фотодетекторов с целью улучшения качества процесса «захвата» и «удержания» отражателя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Grimm, D.** ATRplus White paper Geosystems / D. Grimm, G. Kleemaier, H-M. Zogg. — 2015.
- [2] Leica absolute tracker AT 960. Leica URL: [http:// www.hexagon.com](http://www.hexagon.com).
- [3] **Патент № KR101498149B1.** Geodatic surveying device having automatic high-precision target point sighting functionality / Norbert Kochur, Bernkhard Metsler — Оpubл. 03.04.2015.
- [4] **Соколов, Д. А.** Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины в диапазоне 24–4000 км (ГПСЭД) / Д. А. Соколов, О. М. Олейник-Дзядик, И. С. Сильвестров // Труды института прикладной астрономии РАН. — 2020. — № 52. — С. 63–67.
- [5] **Мазуркевич, А. В.** 19-й международный конгресс метрологии СИМ2019 / А. В. Мазуркевич, Д. А. Соколов, Е. Ю. Тимофеев // Вестник метролога. — 2019. — № 4. — С. 28–30.
- [6] **Козаченков, С. А.** Перспективы метрологического обеспечения геодезических средств измерений в части поверки линейных характеристик в лабораторных условиях в диапазоне до 300 метров / С.А. Козаченков, Д.А. Соколов // Сборник: Актуальные проблемы метрологического обеспечения научно-практической деятельности. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. — 2019. — С. 214–217.

Reflected Beam Search System for a Model of a Reference Rangefinder up to 600 meters

D. A. Sokolov, S. A. Kozachenkov

All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical, and Radio Engineering Measurements (VNIIFTRI), Solnechnogorsk, Moscow Region, Russia

The paper presents the principles of operation of the rangefinder, which operates within a range up to 600 meters, as well as its main components. Special attention is given to the search system for the beam reflected from a corner reflector, as it plays an important role in conducting measurements at distances of several hundred meters in the field during the day. The use of this system significantly reduces the setup time for the reflector. The system was tested during a hot, sunny summer day, which is the most challenging period for field measurements. The system successfully adjusted the reflector at a maximum distance of 600 meters with a repeatability of at least 70%.

Keywords: Femtosecond laser, 600-meter rangefinder, Reflected beam search

Инновационные технологии при исследовании динамических напряжений в оптических материалах

Н. А. Акбарова¹, З. Т. Азаматов¹, С. А. Махмудов²

¹Ташкентский государственный технический университет им. И. А. Каримова

²Белорусско-Узбекский межотраслевой институт прикладно-технических квалификаций

В современных волоконно-оптических линиях передачи данных и, в частности, в линиях локальной сети имеется большое количество колен, переходников между кабелями разных сечений и соединителей в имеющемся оборудовании. Все это оборудование выдерживает различные постоянные механические воздействия и погодные воздействия, которые могут вносить искажения и дополнительные шумы в поток передаваемой информации. Для качественной работы крайне необходим точный мониторинг волоконно-оптических линий передачи данных. К настоящему времени современные методы диагностики ВОЛС сводятся в основном к измерению потерь и не чувствительны к малым внешним возмущениям.

Ключевые слова: Передача информации, Оптические волокна, Цифровая голографическая интерферометрия

Методологическая база

В работе описана диагностика оптических линий связи, разработанная на основе достижений современных информационных технологий регистрации и обработки цифровой информации. Предлагаемая методика основана на сверхчувствительном методе цифровой двуэкспонированной голографической интерферометрии [1]. В отличие от традиционной голографии [2, 3], где запись и восстановление волнового фронта электромагнитного поля происходят в аналоговом виде (с использованием фотопластины, термопласта, фоторефрактивных материалов), цифровая голография представляет собой способ записи волнового фронта в цифровом виде с использованием последующим его сохранением, измерением, преобразованием и реконструкцией математическими методами на компьютерах [4, 5]. В цифровой голографической интерферометрии сравниваются (численно интерферируют) два волновых фронта, восстановленные по двум цифровым голограммам Г1 и Г2. В этом случае Г1 — голограмма невозмущенного объекта, а Г2 — голограмма объекта с наведенной оптической неоднородностью. В результате суммирования двух волновых фронтов получается интерферограмма. Определить фазовые изменения, возникшие на временном интервале между записями голограмм Г1 и Г2 в исследуемых объектах, можно на основе анализа кривизны и расположения полос на полученной интерферограмме. Каждая цифровая голограмма записывается в поле импульсного или непрерывного лазерного излучения с помощью ПЗС-матрицы цифровой камеры. В этом случае время выстрела задается цифровым элементом управления камерой или длительностью лазерного импульса.

Идея применения компьютерной обработки для реконструкции волнового фронта по голографическим записанным изображениям была впервые предложена Дж. В. Гудманом и Р. В. Лоуренсом [6], а также Р. В. Кронродом с сотрудниками [7]. Развитие информационных технологий и твердотельных детекторов излучения позволило записывать голограммы с помощью фоточувствительных матриц на основе устройств переноса заряда (ПЗС-камер) в цифровом виде. В этих случаях процессы сохранения и обработки голограмм являются полностью цифровыми и получили название цифровой голографии. Применение цифровой голографии открывает большие возможности для качественного и более того точного количественного анализа свойств объектов, таких как прецизионное перемещение точек поверхности при анализе деформаций и дефектов, определение формы объекта, измерение показателя преломления в прозрачных средах, исследование траекторий микрочастиц и т. д.

Численное восстановление голограммы, записанной по цифровому изображению, осуществляется согласно скалярной теории дифракции в подходе Френеля для дифракционного интеграла Рэлея–Зоммерфельда [8, 9]. Этот метод служит отправной точкой для численной реконструкции изображений цифровой голографии в парааксиальном приближении. Результирующее поле определяется двойным преобразованием Фурье произведения распределения интенсивности в полученной голограмме. На счетах квантование вводится с учетом размеров пикселей ПЗС-матрицы.

Описание алгоритма

В наших измерениях наведенных фазовых неоднородностей в оптических волокнах алгоритм восстановления цифровой интерферограммы по записанным голограммам был аналогичен алгоритму,

представленному в работе [4]. Распределение интенсивности в плоскости записи голограммы $I(x, y)$ определяется суммированием квадратов модулей комплексных амплитуд объектной $O(x, y)$ и фоновой $R(x, y)$ волн:

$$I(x, y) = |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + R(x, y) O(x, y) + R(x, y) O(x, y)$$

Последние два члена уравнения содержат информацию, соответствующую амплитуде и фазе объектной волны. Эту информацию можно распознать методом преобразования Фурье. Если голограмма записывается источником света с ограниченной выходной апертурой (в нашем случае — ограниченным световым пучком), то после преобразования мы получаем Фурье-спектр голограммы с четырьмя расположенными областями пространственных частот, которые соответствуют различным членам уравнения. Первые два члена уравнения образуют нулевой порядок спектра, который расположен в центре двумерной плоскости Фурье. Третий и четвертый члены уравнения образуют две связанные спектральные области, расположенные симметрично относительно центра и соответствующие комплексной амплитуде объектной волны. Если выделить одну из этих расположенных областей спектра и затем применить обратное преобразование Фурье, то фазовый фронт объектной волны (действительный или мнимый, в зависимости от выбранной области разделения) можно восстановить в плоскости изображения объекта.

При этом использовался следующий алгоритм записи и реконструкции. Вначале записывается голограмма Г1 (ненагруженное оптоволокно), затем в следующем световом импульсе записывают голограмму Г2 (нагруженное оптоволокно). Затем по полученным голограммам строится двумерный спектр Фурье. В этом спектре выбирается территория для реконструкции. По выбранной области путем обратного преобразования Фурье восстанавливаются цифровые фазовые фронты Г1 и Г2 и рассчитывается их интерферограмма. Далее используется алгоритм фазовой развертки, аналогичный [4]. Восстановлена реальная поверхность возмущенной фазы излучения, передаваемого по деформируемому оптическому волокну.

Экспериментальная часть

Для регистрации и анализа наведенных оптических неоднородностей в световодах использовались традиционные схемы интерферометров Юнга и Майкельсона. Интерферометр был собран из двух отрезков одномодового волокна оптической телефонии. Диаметр сердцевинки волокна составлял 125 мкм. Длина каждого куска оптоволокна составляла 2 м. Оболочка кабеля была снята с оптоволоконного входа и эти кабельные входы соединены параллельно для ввода лазерного излучения в интерферометр. На вход интерферометра без фокусирующей оптики подается луч He-Ne-лазера с длиной волны 0,63 мкм и мощностью излучения 3 мВт.

Оболочку кабеля также удалили с конца волокна, и эти концы кабеля соединили вместе параллельно на определенном пространственном интервале. Оптические волокна интерферометра были свернуты кольцами диаметром около 30 см и располагались в свободном (незакрепленном) состоянии на оптическом столе. В такой схеме два оптических волокна формировали предметный и фоновый световые пучки. На рисунках 1 и 2 показаны схемы измерителей, собранных интерферометрами Юнга и Майкельсона.

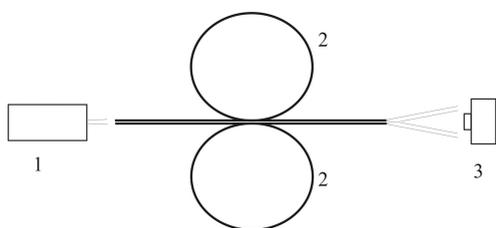


Рис. 1. Схема измерителя на основе интерферометра Юнга:

1 — лазер; 2 — оптоволокно; 3 — фотоаппарат

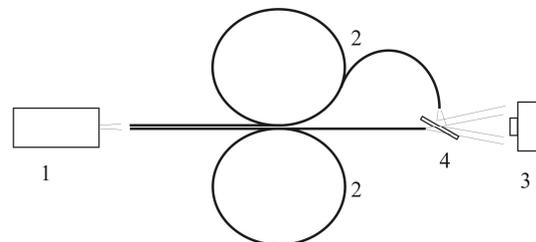


Рис. 2. Схема измерителя на основе интерферометра Майкельсона:

1 — лазер; 2 — оптоволокно; 3 — фотокамера; 4 — разветвитель

Анализ реакции интерферометра на внешние воздействия проводился путем нагружения первого фонового волокна бумажной лентой массой 3 мг или размещением на расстоянии 10 см интерферометра источника тепла с температурой 35 °С (при температуре окружающей среды). На выходе

интерферометра для цифровой регистрации голограмм, сформированных интерференцией фонового и объектного пучков, использовалась монохромная цифровая фотокамера с размером пикселя 9×9 мкм. Запись осуществлялась на площади матрицы 1000×1000 пикселей. Время экспозиции составляло $1/10000$ с.

Результаты и их обсуждение

Голограммы записывались с использованием описанных выше экспериментальных установок. На рисунке 3 представлены цифровые голограммы, записанные в состоянии интерферометра, нагруженного изогнутой бумагой (а) и без нагрузки (б). Объектив камеры удален. Большая неоднородность интенсивности связана с некачественной обшивкой входных и выходных концов оптоволокон.

На рисунке 4 представлена цифровая голограмма, записанная камерой с объективом. Запись осуществлялась по схеме, представленной на рисунке 2. Объектив формирует изображение интерференционной картины на расстоянии 5 мм от светоделителя.

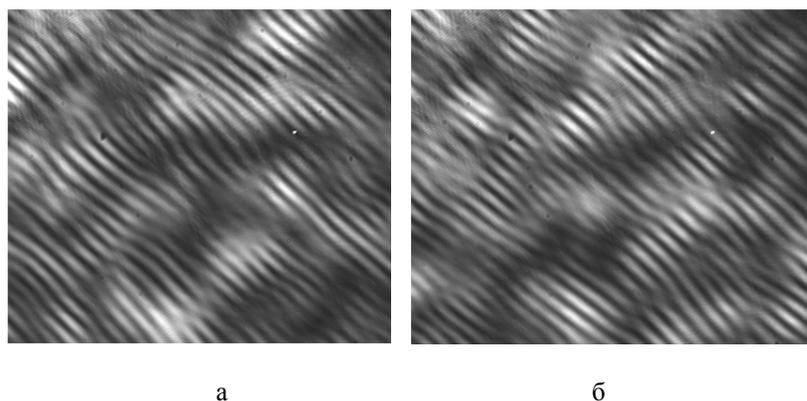


Рис. 3. Изображения цифровых голограмм, записанных в состоянии нагруженного (а) и незагруженного (б) интерферометра

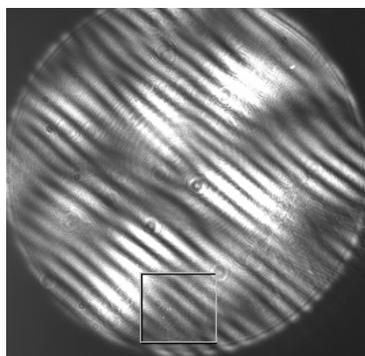


Рис. 4. Цифровая голограмма, записанная камерой с объективом

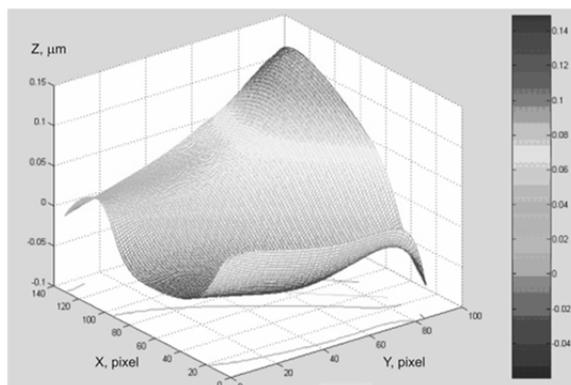


Рис. 5. Интерактивное представление фазовых изменений в выбранном фрагменте тестируемого участка оптоволокон

На следующем этапе дифференцированная интерферограмма восстанавливалась по записанным голограммам с помощью описанного выше алгоритма. Эта интерферограмма содержит количественную информацию о фазовых изменениях лазерного излучения, проходящего через нагруженное оптическое волокно. Затем на этой интерферограмме была выделена область, показанная на рисунке 4 прямоугольником. В границах выделенной области была восстановлена поверхность фазовых искажений, показанная на рисунке 5.

Из этого рисунка видно, что набег фазы лазерного излучения, прошедшего через выбранный участок сечения волокна, в пересчете на длину оптического пути составляет 0,22 мкм при внешней точечной нагрузке на кабель 3 мг. Точность измерений по оси z составляла 5 нм.

Заключение

Таким образом, показаны возможности цифрового метода двуэкспонированной голографической интерферометрии и разработанной вычислительной методики для количественного анализа фазовых изменений, возникающих в излучении, распространяющемся по оптическому волокну, при сверхмалых механических воздействиях. В проведенных экспериментах точность измерений по оси z при пересчете фазы на оптическом пути составляла 5 нм. Описанный выше метод может быть применен для диагностики оптических разветвителей, соединителей, фокусирующей оптики, сварных сборок оптических волокон. На основе разработанных схем могут быть созданы чувствительные датчики внешних воздействий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Шнарс, У. Цифровая голография / У. Шнарс, В. Юптнер. // Шпрингер-Верлаг, Берлин. — 2005.
- [2] Габор, Д. Новый микроскопический принцип / Д. Габор. // Природа. — 1948. — Том 161. — С. 777–778.
- [3] Лейт, Э. Н. Реконструкция волнового фронта с рассеянным освещением и трехмерными объектами / Э. Н. Лейт, Й. Упатниекс. // Опт. Соц. Ам. — 1964. — Том 54. — С. 1295–1301.
- [4] Шнарс, У. Прямое определение фазы в голограммной интерферометрии с использованием голограмм, записанных в цифровом виде / У. Шнарс. // Опт. Соц. Ам. — 1994. — Том 11. — С. 2011–2015.
- [5] Schnars, U. Digitale Aufzeichnung und MathematischeRekonstruktion von Hologrammen in der Interferometrie / U. Schnars. // VDI-Фортшритт-Берихте. — 1994. — Серия 8. — № 378.
- [6] Гудман, Дж. В. Формирование цифрового изображения из голограмм, обнаруженных электронным способом / Дж. В. Гудман, Р. В. Лоуренс // Прил. Физ. Летт. — 1967. — Том 11. — С. 77–79.
- [7] Кронрод, Р. В. Реконструкция голограммы с помощью компьютера / Кронрод Р. В., Мерзляков Н. С., Ярославский Л. П. // Сов. Дж. Тех. Физ. — 1972. — Том 17. — С. 333–334.
- [8] Шнарс, У. Прямая запись голограмм ПЗС-мишенью и численная реконструкция / У. Шнарс, В. Юптнер // Прил. Опт. — 1994. — Том 33. — С. 179–181.
- [9] Гудман, Дж. В. Введение в оптику Фурье. 2-е изд. / Дж. В. Гудман // МакГроу-Хилл, Нью-Йорк. — 1996.

Innovative technologies at research of dynamic tension in optical materials

N.A. Akbarova¹, Z. T. Azamatov¹, S. A. Makhmudov²

¹Institute of Applied Physics, National University of Uzbekistan,

²Talabalar shaharchasi, 3A, Tashkent, 100174, Uzbekistan

There are a lot of elbows, adapters between the cables of different sections, and connectors with available equipment in the modern fiber-optic data transfer lines and in the local network lines particularly. All this equipment endures by various continuous mechanical traffics and weather exposures, which can bring in distortions and additional noise to a flow of the transmitted information. For qualitative work securing the exact monitoring of fiber-optic data transfer lines is extremely necessary. To the present time the advanced methods of fiber-optic line diagnostics are reduced basically to measurement of losses and are not sensitive to small external perturbation.

Keywords: Optics, Holography, Diffraction optical elements

Инновационные подходы в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей

А. К. Миралиева, Н. М. Рахимова, М. Р. Юнусова

Совместный Белорусско-Узбекский межотраслевой институт, Ташкент, Узбекистан

Основная цель исследования заключается в разработке и апробации инновационных подходов в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей с целью улучшения точности, скорости и эффективности процессов контроля. Исследование базируется на следующих методах: применения адаптивной оптики для коррекции волнового фронта в реальном времени; разработки алгоритмов фазовой компенсации для улучшения интерпретации интерферометрических данных. Полученные результаты: улучшение точности измерений; снижение погрешностей измерения оптических поверхностей благодаря компенсации искажений волнового фронта. Результаты исследования представляют значительный вклад в область оптической инженерии, позволяя значительно повысить качество и надежность оптических изделий. Инновации в методах и устройствах открывают новые возможности для промышленности и научных исследований, предоставляя более точные и доступные решения для контроля качества.

Ключевые слова: Интерферометрия, Качество оптических поверхностей, Адаптивная оптика, Машинное обучение, Миниатюризация

Введение

Актуальность темы заключается в необходимости повышения точности и эффективности процессов производства и контроля оптических компонентов, которые играют ключевую роль в современных высокотехнологичных областях, таких как лазерные технологии, астрономия, медицинская визуализация и фотоника.

Интерферометрия, как метод, позволяет оценить качество оптических поверхностей с высокой степенью точности, выявляя даже минимальные отклонения и дефекты. Однако с ростом требований к качеству и сложности оптических систем, традиционные методы интерферометрического контроля сталкиваются с рядом ограничений. Это включает в себя ограничения на форму и размер измеряемых поверхностей, чувствительность к вибрациям и необходимость использования сложного и дорогого оборудования.

Внедрение инновационных подходов, таких как использование адаптивной оптики для коррекции волнового фронта в реальном времени, разработка новых алгоритмов для обработки данных и интеграция с компьютерным моделированием, может существенно расширить возможности интерферометрического контроля. Также перспективным является применение методов искусственного интеллекта для автоматизации процессов анализа и интерпретации данных интерферометрии. Улучшение этих методов приведет к сокращению времени на контроль качества, уменьшению производственных затрат и повышению надежности оптических изделий. Это особенно важно для высокоточных приложений, где даже микроскопические несоответствия могут привести к значительным сбоям в работе системы.

Цель исследования — разработка и апробация новых методов и технологий в области интерферометрического контроля качества оптических поверхностей, направленных на повышение точности, оперативности и экономичности процессов производства и анализа оптических элементов.

1. Материалы и методы исследования

Материалы исследования:

- оптические поверхности различных типов: включая плоские, сферические и асферические поверхности, изготовленные из различных материалов, таких как стекло, кристаллы и полимеры;
- интерферометры: использование различных типов интерферометров, в том числе лазерных и белого света, для проведения измерений;
- компьютерное оборудование и программное обеспечение: для сбора данных и их обработки и анализа, включая специализированное ПО для интерферометрии и разработки новых алгоритмов обработки данных;
- адаптивная оптика: компоненты, такие как деформируемые зеркала и волновые фронт-сенсоры, для коррекции волнового фронта в реальном времени.

Методы исследования:

- алгоритмическая обработка данных: разработка и использование алгоритмов для анализа данных интерферометрии, включая фильтрацию шумов, восстановление изображений и квантификацию ошибок поверхности;

- использование машинного обучения: разработка и обучение моделей машинного обучения для автоматизации процессов анализа и улучшения точности результатов;
- симуляции и моделирование: применение компьютерного моделирования для имитации процессов интерферометрии и анализа влияния различных параметров на качество измерений.

Изучением вопросов, посвященных инновационным подходам в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей, занимались такие ученые, как Н. В. Барышников, Я. В. Гладышева, Д. Г. Денисов, И. В. Животовский, В. Е. Патрикеев, И. Н. Судариков и др.

2. Результаты исследования

Инновационные подходы в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей включают в себя несколько ключевых технологий и методов, которые существенно улучшают точность и эффективность измерений, в частности:

- фазовая интерферометрия. Этот метод позволяет измерять оптические поверхности с очень высокой точностью благодаря анализу фазы света, отраженного от измеряемой поверхности. Фазовые интерферометры могут выявлять крошечные дефекты и неровности с нанометровой точностью;
- компьютерная обработка изображений. Современные технологии обработки изображений позволяют автоматизировать процесс интерпретации интерферометрических данных, существенно ускоряя процесс анализа и уменьшая вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором;
- адаптивная оптика. Использование адаптивной оптики в интерферометрии позволяет компенсировать оптические искажения, вызванные несовершенством измерительной системы или внешними факторами, такими как атмосферные помехи;
- многосветовая интерферометрия. Использование нескольких источников света или различных длин волн может улучшить разрешающую способность интерферометра и позволить одновременно измерять несколько параметров поверхности;
- машинное обучение и искусственный интеллект. Применение алгоритмов машинного обучения для анализа данных интерферометрии открывает новые возможности для определения сложных шаблонов и аномалий на измеряемых поверхностях, что ранее было недостижимо.

Существует также несколько других инновационных подходов, которые продолжают развивать возможности интерферометрического контроля качества оптических поверхностей. Например, использование дифференциальной интерферометрии позволяет повысить чувствительность измерений за счет сравнения изменений, происходящих между двумя или более состояниями измеряемой системы. Этот подход особенно полезен для изучения динамических процессов на оптических поверхностях или для измерения очень мелких перемещений и деформаций [1].

Также важным направлением является развитие компактных и мобильных интерферометров, которые могут использоваться в условиях, не подходящих для традиционных лабораторных установок. Например, портативные интерферометрические устройства могут применяться непосредственно на производственных линиях для оперативного контроля качества или в космической отрасли для проведения тонких настроек оптических систем в полете.

Кроме того, большое внимание уделяется разработке интерферометрических методов, способных работать в условиях сильных вибраций или других внешних помех. Это достигается за счет использования специальных алгоритмов синхронизации и устойчивых к помехам схем измерения.

Эти инновации значительно расширяют возможности интерферометрии и делают ее более доступной и эффективной для широкого спектра применений в научных исследованиях и в промышленности. Они позволяют не только улучшить качество и точность измерений, но и делают процесс контроля более быстрым и удобным, что в конечном итоге способствует повышению качества оптических изделий.

Стоит отметить важность интеграции интерферометрических систем с общими производственными процессами. Современные системы управления производством часто требуют встроенных решений для непрерывного мониторинга и контроля качества. Интерферометрические технологии, способные работать в реальном времени, могут обеспечить мгновенную обратную связь о состоянии производимых изделий, что позволяет оперативно корректировать технологические процессы и улучшать итоговое качество продукции.

Другой важный аспект – развитие алгоритмов для обработки и анализа больших объемов данных, получаемых от интерферометрических измерений. Современные методы анализа данных, такие как глубокое обучение и большие данные, позволяют выявлять сложные закономерности и аномалии, которые могут быть неочевидны при традиционных подходах. Это в значительной мере способствует повышению точности и надежности интерферометрических методов.

Важно также упомянуть об усовершенствовании компонентной базы интерферометров. Разработка и внедрение новых оптических элементов, таких как лазеры с изменяемой длиной волны, высокопроизводительные детекторы и улучшенные оптические покрытия, позволяют значительно расширить функциональные возможности интерферометрических устройств. Такие улучшения делают возможным проведение более сложных и точных измерений, что особенно актуально для развития новых технологий и материалов [2].

Можно представить следующие примеры нескольких передовых технологий и устройств, каждое из которых предлагает уникальные характеристики и преимущества:

- лазерный интерферометр Zygo Verifire. Этот интерферометр использует методы фазового сдвига для высокоточного измерения оптических поверхностей. Он оснащен высокостабильным гелий-неоновым лазером, который обеспечивает стабильность длины волны на уровне субнанометров. Особенностью является способность к быстрому сбору данных и их анализу, что позволяет использовать устройство в производственных условиях для контроля качества в реальном времени.

- Сканирующий белый свет интерферометр (SWLI). SWLI использует широкополосный источник света (обычно светодиод или галогеновую лампу), что позволяет проводить измерения с высокой вертикальной разрешающей способностью до нескольких ангстрем. Подходит для измерения гладких и шероховатых поверхностей, а также способен измерять сложные топологии с высокой точностью.

- Многосветовой интерферометр. Этот тип интерферометра использует несколько источников света различных длин волн одновременно, что позволяет одновременно получать информацию о разных параметрах поверхности. Улучшенная разрешающая способность и возможность измерения большего диапазона оптических характеристик без необходимости перенастройки или замены оптических компонент.

- Адаптивный интерферометр с адаптивной оптикой включает в себя системы адаптивной оптики для коррекции aberrаций в реальном времени, что позволяет получать очень точные измерения даже в условиях искажений, вызванных внешними факторами. Преимущество — использование в сложных условиях, например в астрономии или на производственных линиях с высоким уровнем вибраций [3].

Кроме того, можно представить следующее описание основных инновационных подходов в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей, с акцентом на методы, применяемые технологии, преимущества каждого подхода, а также возможные ограничения в таблице.

Таблица. Описание основных инновационных подходов в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей

Метод	Технология	Преимущества	Ограничения
Фазовый сдвиг интерферометрии	Использование нескольких длин волн	Высокая точность измерений; Способность разрешать 2π -неоднозначности	Требуются сложные алгоритмы для обработки данных
Когерентная интерферометрия	Когерентные источники света	Высокая чувствительность к дефектам	Чувствительность к вибрациям
Дифференциальная интерферометрия	Использование нескольких пучков	Позволяет измерять различия в оптических путях	Сложно настроить и калибровать систему
Спекл-интерферометрия	Использование спекл-структур	Подходит для шероховатых поверхностей	Ограниченное разрешение

В последние годы в области интерферометрии наблюдается значительный прогресс благодаря разработке приборов, которые воплощают алгоритмы одновременного фазового сдвига (ОФЗ). Эти инновации охватывают как интерферометры типа Тваймана-Грина, так и Физо. Благодаря новым технологиям, данные приборы могут эффективно функционировать даже в условиях повышенных вибраций, хотя и требуют особо тщательной калибровки из-за нарушения принципа общего хода лучей [4].

В современных измерительных комплексах интерферометры часто устанавливаются вертикально вместе с измеряемыми деталями. Высокие технологические стандарты демонстрируют системы от таких компаний, как Zygo и QED, которые способны контролировать качество как сферических, так и асферических поверхностей. Стоимость таких комплексов может достигать нескольких миллионов долларов.

В России, помимо прежде серийно выпускавшегося интерферометра ИКД-110, на рынке представлены новые модели. Среди них ОРТОТЛ-ICO-60, предлагающий диаметр измерительного поля в 60 мм и точность до $1/20$ длины волны при $\lambda = 0,532$ мкм, РИФ с полем 95 мм и точностью $1/20$ длины волны при $\lambda = 0,65$ мкм, ИФА-300, обладающий возможностью измерения полей до 300 мм с точностью до $1/100$ длины волны, и ФТИ-100PS [5].

В этом исследовании анализируется процесс контроля оптической системы, предназначенной для авиационного наשלемного широкоугольного дисплейного коллиматора. Основное внимание уделяется трехлинзовому блоку, включающему в себя две сферические линзы (обозначенные как 1 и 2) и одну асферическую линзу, которая установлена эксцентрично (обозначена как 3). Эта конструкция состоит из девяти компонентов и представляет собой нецентрированную систему, что добавляет сложности в процесс контроля качества каждого элемента, представлена на рисунке 1.

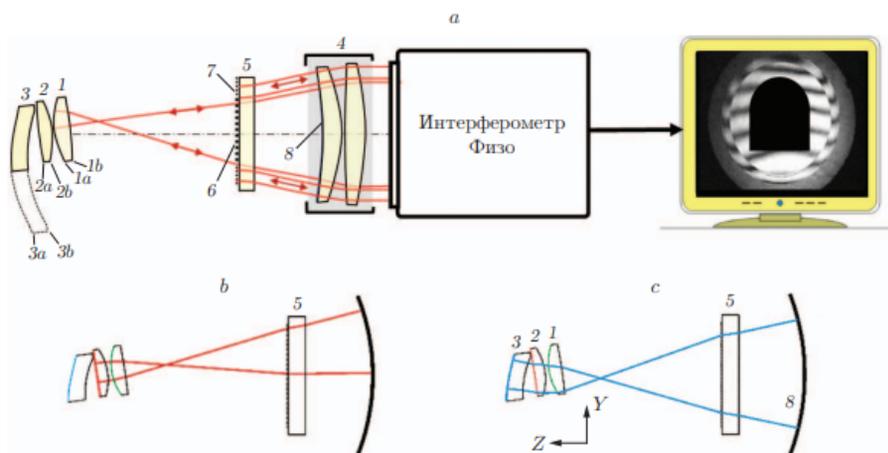


Рис. 1. Схемы хода световых лучей при контроле юстировки трехлинзовой оптической системы: для линзы 1 (а), линзы 2 (b) и линзы 3 (с)

Заключение

Интерферометрический контроль качества оптических поверхностей — это критически важная область в оптической инженерии, позволяющая достигать высочайшей точности и качества в производстве оптических элементов. Использование инновационных подходов в этой области открывает новые возможности для улучшения и оптимизации процессов контроля. Интеграция адаптивной оптики в интерферометрические системы позволяет компенсировать искажения волнового фронта в реальном времени, что значительно улучшает точность измерений сложных и асимметричных оптических поверхностей.

Применение алгоритмов фазового восстановления и компьютерного моделирования волнового фронта обеспечивают более точную интерпретацию данных интерферометрии, что улучшает точность и надежность результатов. Автоматизация процессов обработки данных с помощью машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет анализировать большие объемы данных быстрее и с меньшими затратами, увеличивая производительность и снижая вероятность человеческих ошибок. Разработка миниатюризированных и портативных интерферометров расширяет возможности их использования вне лабораторных условий, что особенно актуально для полевых условий и в ситуациях, требующих мобильности.

Список источников

- [1] **Дорошина, Ю. П.** Перспективы применения голограммных элементов для юстировки внеосевых оптических систем / Ю. П. Дорошина, Р. К. Насыров, С. Б. Одинокоев // *Контенант*. — 2016. — № 3. — С. 28–33.
- [2] **Кирилловский, В. К.** Методы исследования и контроля качества оптических систем: Учебное пособие / В. К. Кирилловский, М. Е. Зацепина // — СПб НИУ ИТМО. — 2020. — 98 с.
- [3] **Абдулкадыров, М. А.** Неравноплечий ИК-интерферометр Тваймана–Грина для контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей на стадии шлифования / М. А. Абдулкадыров и др. // *Оптический журнал*. — 2020. — № 1. — С. 12–25.
- [4] **Полещук, А. Г.** Совмещение дифракционных и рефракционных компонентов в оптических системах / А. Г. Полещук // *Автометрия*. — 2019. — № 6. — С. 27–31.

- [5] **Шиманский, Р. В.** Динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных элементов для контроля асферических зеркал / Р. В. Шиманский, А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. В. Черкашин // Автометрия. — 2021. — № 3. — С. 64–73.

Innovative approaches in interferometric quality control of optical surfaces

A. K. Miraliev, N. M. Rakhimova, M. R. Yunusova

Joint Belarusian-Uzbek Interdisciplinary Institute applied technical qualifications, Tashkent, Uzbekistan

The main goal of this research is to develop and test innovative approaches in interferometric quality control of optical surfaces in order to improve the accuracy, speed and efficiency of inspection processes. The research is based on the following methods: the use of adaptive optics for real-time wavefront correction; development of phase recovery algorithms to improve the interpretation of interferometric data. The results obtained: improved measurement accuracy; reduction of measurement errors of optical surfaces due to compensation of wavefront distortions. The research results represent a significant contribution to the field of optical engineering, allowing significant improvements in the quality and reliability of optical products. Innovations in methods and devices are opening up new opportunities for industry and research, providing more accurate and affordable quality control solutions.

Keywords: *Interferometry, Quality of optical surfaces, Adaptive optics, Machine learning, Miniaturization*

Оценка метрологических характеристик системы лазерной измерительной ВЗ-ИЛТ

Е. А. Лавров, С. С. Донченко, Д. А. Соколов, П. М. Гунин, Б. Р. Алекперова

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ»), Менделеево, Россия

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработана система лазерная измерительная ВЗ-ИЛТ на основе интерферометра Майкельсона, предназначенная для измерения приращений длин в диапазоне до 80 м. В работе описана методика исследования метрологических характеристик системы ВЗ-ИЛТ на базе Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199–2024. Приведены результаты экспериментальных исследований устройства.

Ключевые слова: Лазерный интерферометр, Прецизионные измерения длины, Метрология

Введение

В настоящее время нашли широкое применение приборы, основанные на лазерных интерференционных методах измерений. Наиболее точные серийно выпускающиеся системы измерения перемещений: XL-80 («RENISHAW plc», Великобритания), Lasertex HPI-3D («Lasertex Co. Ltd.», Польша), SJ6000 («Chotest Technology Inc.», Китай), SP 15000 NG («SIOS Meßtechnik GmbH», Германия). Погрешность измерений таких приборов (в мкм): от $\pm 0,15L$ до $\pm (0,02 + 0,5L)$, где L — измеряемое перемещение, м. Отечественные интерферометрические измерители линейных перемещений серийно не выпускаются. Поэтому разработка отечественного прибора — прецизионного измерителя линейных перемещений с погрешностью измерений не хуже зарубежных образцов крайне актуальна.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» был разработан прототип системы лазерной измерительной для измерения линейных и угловых приращений. В данной работе описана методика оценки его метрологических характеристик и результаты экспериментальных исследований.

1. Оценка метрологических характеристик системы лазерной измерительной ВЗ-ИЛТ

Влияние показателя преломления

Для учета влияния окружающей среды на показатель преломления измеряемой трассы в лазерной системе ВЗ-ИЛТ используются датчики ТН-485, предназначенные для непрерывных измерений и регистрации температуры воздуха, атмосферного давления и относительной влажности воздуха (табл. 1).

Таблица 1. Основные метрологические характеристики датчика ТН-485

Наименование параметра, единицы измерения	Значение
Диапазон измеряемых температур, °С	от –40 до +60
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений температуры, °С	$\pm 0,1$
Диапазон измерений относительной влажности, %	от 10 до 98
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений относительной влажности, %: от 10 до 90 % включ. св. 90 до 98 %	± 3 ± 4
Диапазон измерения атмосферного давления, кПа	от 60 до 110
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений атмосферного давления, кПа	$\pm 0,2$

Чувствительность показателя преломления воздуха (на длине волны 633 нм) к изменению параметров окружающей среды в стандартных лабораторных условиях представлена в таблице 2 [1]. Видно, что температура и влажность воздуха являются наиболее критичными (наиболее значимыми) параметрами.

Таблица 2. Критические параметры, влияющие на показатель преломления воздуха, их нормативные значения и коэффициенты чувствительности

Влияющий параметр	Значение в стандартных условиях	Коэффициент чувствительности показателя преломления
Температура	20 °C	$-9,2 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$
Давление	101,325 Па	$+2,7 \times 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$
Содержание CO ₂	400 ppm	$+1,4 \times 10^{-10} (\text{ppm})^{-1}$
Влажность:		
Относительная влажность	50 %	$-8,7 \times 10^{-9} \%^{-1}$
Точка росы	9,27 °C	$-1,5 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$
Давление водяного пара	1168 Па	$-1,8 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$

Влияние нестабильности лазера

В качестве источника лазерного излучения в составе системы ВЗ-ИЛТ используется стабилизированный газовый He-Ne лазер собственной разработки с длиной волны излучения 633 нм. Флуктуации частоты $\delta\nu$ (длины волны $\delta\lambda$) лазера непосредственно влияют на погрешность измеряемых приращений длины δL :

$$\delta L = \frac{\varphi \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot \delta\nu \cdot n} = \frac{\varphi \cdot \delta\lambda}{4 \cdot \pi \cdot n}, \quad (1)$$

где φ — измеренная фаза; c — скорость света; n — показатель преломления.

Для контроля частоты стабилизируемого лазера из состава ВЗ-ИЛТ был разработан стенд, схема которого представлена на рисунке 1.

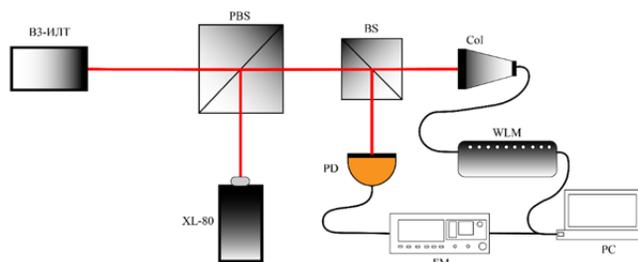


Рис. 1. Принципиальная схема контроля характеристик стабилизируемого лазера:
 PBS — поляризационный светоделительный кубик; BS — светоделительный кубик; COL — коллиматор;
 PD — фотодетектор; WLM — измеритель длин волн; FM — частотомер; PC — компьютер

Влияние фазометра

Цифровой накапливающий фазометр непосредственно влияет на погрешность измерения приращений расстояний. Для оценки его работы была разработана следующая измерительная схема (рис. 2).

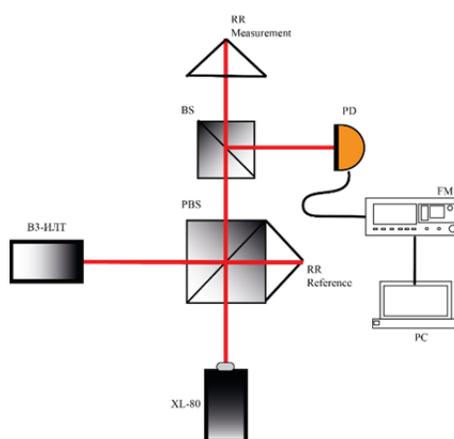


Рис. 2. Принципиальная схема сравнения фазометров ВЗ-ИЛТ и Renishaw XL-80:
 RR Reference — опорный ретроорефлектор; RR measurement — измерительный ретроорефлектор

2. Экспериментальные результаты

Исследование стабилизированных лазерных источников

Используя схему на рисунке 1, было проведено исследование стабилизированных лазеров ЛГН-303 и лазеров из состава ВЗ-ИЛТ и Renishaw XL-80 в части оценки ошибки воспроизведения частоты (длины волны) и нестабильности (табл. 3).

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований стабилизированных лазеров различных производителей

Лазер	СКДО (1 час)	Ошибка воспроизведения, МГц
ЛГН-303	$1,5 \cdot 10^{-8}$	80
ВЗ-ИЛТ	10^{-9}	20
Renishaw XL-80	$8 \cdot 10^{-10}$	20

Видно, что разработанная система стабилизации частоты лазерного излучения лишь незначительно уступает импортным аналогам в области долговременной стабильности и значительно превосходит отечественные, демонстрируя нестабильность на времени усреднения 1 час порядка $1 \cdot 10^{-9}$.

Исследование фазометров

Результаты одновременного измерения перемещения ретрорефлектора с помощью интерферометров ВЗ-ИЛТ и Renishaw XL-80 с помощью схемы на рисунке 2 показаны на рисунке 3.

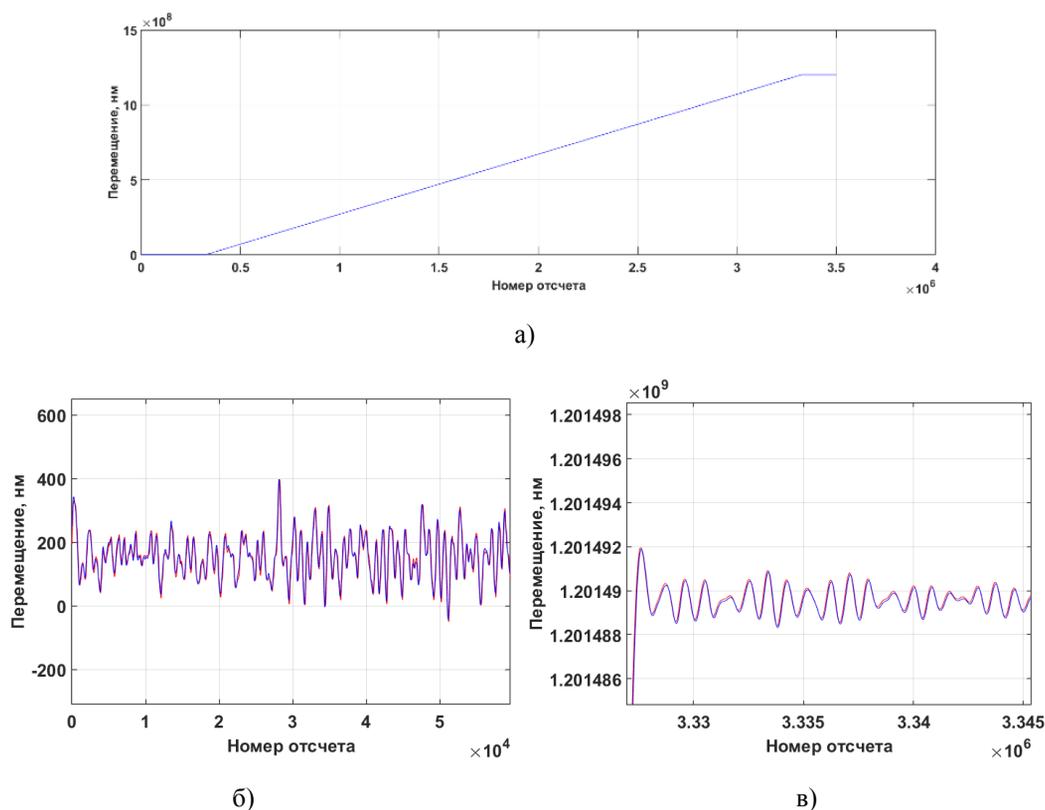


Рис. 3. Результат сличений фазометров ВЗ-ИЛТ (красный цвет) и Renishaw XL-80 (синий цвет): а) полное перемещение; б) начальная точка; в) конечная точка

Интерферометры ВЗ-ИЛТ и Renishaw XL-80 располагались на одном основании, оптическое излучение распространялось по одному и тому же пути, кроме того, оценивалась взаимная нестабильность частоты лазеров из состава интерферометров. Таким образом, были минимизированы источники ошибок, не относящиеся непосредственно к работе фазометра. На рисунке 3а показан характер исследуемого перемещения, на рисунках 3б и 3в показаны измерения в начальной и конечной точках движения соответственно. Колебательные процессы на графиках 3б и 3в представ-

ляют из себя общие для обоих интерферометров вибрации основания и акустический шум на измеряемой трассе. Максимальная разность показаний 2-х интерферометров не превысила 15 нм.

Результаты сличений V3-ИЛТ и Renishaw с помощью ГЭТ 199-2024

Для оценки метрологических характеристик V3-ИЛТ было произведено исследование системы измерительной на базе Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199–2024 [2]. Экспериментальные результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты одновременных сличений XL-80 и V3-ИЛТ на эталоне ГЭТ 199-2024

Номинальное перемещение, м	Разница показаний между ГЭТ199 и XL-80, мкм	Разница показаний между ГЭТ199 и V3-ИЛТ, мкм
2,4	0,824	0,723
12,1	5,396	4,077
21,7	10,169	8,135
31,4	15,093	12,454
41,1	20,205	15,964
50,8	25,266	20,013
60,5	29,290	23,832

Заключение

Разработана отечественная система лазерная измерительная V3-ИЛТ для измерения приращений длин в диапазоне до 80 м. На основе оценки ее метрологических характеристик, сличений с ГЭТ199 и испытаний в климатической камере пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений линейных перемещений составили $\pm 0,4L$, мкм, что находится на уровне лучших зарубежных аналогов.

Список источников

- [1] Mise en pratique for the definition of the metre in the SI // SI Brochure – 9th edition. Appendix 2. 2019. — С. 1–22.
 [2] Новикова, И. В. Экспериментальное исследование соосной и ортогональной методик сравнения лазерных измерительных интерферометрических систем / И. В. Новикова, Д. А. Соколов // Альманах современной метрологии. 2021. — Том 4 (28). — С. 243–245.

Evaluation of the metrological characteristics of the V3-ILT laser measuring system

E. A. Lavrov¹, S. S. Donchenko¹, D. A. Sokolov¹, P. M. Gunin¹, B. R. Alekperova¹

¹ FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Russia

In the VNIIFTRI has developed a V3-ILT laser measuring system based on a Michelson interferometer, designed to measure length increments in the range of up to 80 m. The paper describes a method for studying the metrological characteristics of the V3-ILT system based on the State primary special standard of the unit of length GET 199–2024. The results of experimental studies of the device are presented.

Keywords: Laser interferometer, Precision length measurements, Metrology

Анализ точностных возможностей реализации метода дифференциального рассеяния

Д. А. Машошин¹, Д. Г. Денисов¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлен точностной анализ оригинальной схемы контроля параметров качества сверхточных оптических поверхностей, основанной на методе дифференциального рассеяния— учет как основных источников погрешности используемого метода, так и инструментальной погрешности, обусловленной использованием роботизированного комплекса как средства автоматизации измерений, а также влияние качества лазерного излучения на процесс его регистрации.

Ключевые слова: Метод дифференциального рассеяния, Индикатриса рассеяния, Поверхностные неоднородности

В современном отечественном производстве оптических изделий существует проблема контроля параметров качества профиля поверхностей, уровень высотных неоднородностей которых находится на уровне единиц и долей нанометра. В первую очередь такие жесткие требования к качеству оптических поверхностей касаются областей крупногабаритной астрономической оптики и активных элементов сверхмощных лазерных сред. Одним из перспективных методов контроля является метод дифференциального рассеяния — косвенный метод получения статистических параметров поверхности (функции спектральной плотности и среднеквадратичной шероховатости) из индикатрисы рассеянного на поверхности излучения.

В представленной работе демонстрируется оригинальная техническая реализация данного метода, функциональная схема которого представлена на рисунке. Главной особенностью, которая отличает данную схему от других реализаций метода дифференциального рассеяния, является роботизированный комплекс, который позволяет автоматизировать процесс измерений, а также регистрировать рассеянное излучение практически во всей полусфере над контролируемой поверхностью.

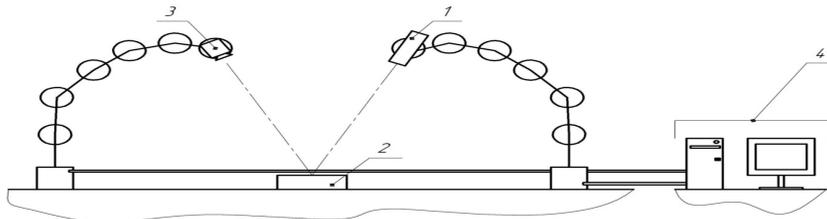


Рис. 1. Функциональная схема технической реализации:

1 — канал подсвета; 2 — контролируемое изделие; 3 — приемный канал, 4 — блок управления и обработки

В ходе анализа ряда источников [1, 2], были выявлены основные источники погрешности метода: ограниченный диапазон углов сканирования, шумы фотоприемного тракта, Релеевское рассеяние на поверхностных молекулах, а также калибровка самого прибора. Первые три фактора являются по своей природе технически неустраняемы, и важно проверить насколько сильно их наличие влияет на результат восстановления статистических параметров поверхности.

Путем решения дифракционного интеграла Кирхгофа в приближении малых возмущений (также известном как теория Релея-Райса в зарубежных источниках) была получена следующая математическая связь между индикатрисой рассеянного излучения и функцией спектральной плотности отклонений поверхности:

$$\left\{ \begin{aligned} ARS(\theta_s) &= \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot (\varepsilon - 1)^2 \cdot \cos\theta_s \cdot |p(\theta_s)|^2 \cdot PSD(f)}{\cos\theta_i}; \\ p(\theta_s) &= \frac{2 \cdot \cos\theta_i}{q_1(\theta_s) + \varepsilon \cdot q_2(\theta_s)} \times \left[\frac{q \cdot q_1(\theta_s) \cdot \cos\varphi - \varepsilon \cdot k(\theta_s) \cdot k_i \cdot \cos\gamma}{q + \varepsilon \cdot q_i} \cos\gamma + \frac{2\pi \cdot q_1(\theta_s) \cdot \sin\varphi}{q + q_i} \sin\gamma \right]; \\ k_i &= \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_i \quad q = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \varepsilon - k_i^2} \cdot k(\theta_s) = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_s \quad q_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cos\theta_i \\ q_1(\theta_s) &= \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot \varepsilon - k^2(\theta_s)} \quad q_2(\theta_s) = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - k^2(\theta_s)} \quad f = \frac{|\sin\theta_i - \sin\theta_s|}{\lambda} \end{aligned} \right.$$

где $ARS(\theta_s)$ — индикатриса рассеяния, ср^{-1} ;

$PSD(f)$ — функция спектральной плотности отклонений поверхности, мм^4 ;

f — пространственная частота, мм^{-1} ;

λ — длина волны излучения, мм ;

ε — диэлектрическая проницаемость поверхности;

θ_i — угол падения луча, рад;

θ_s — угол рассеяния (сканирования), рад;

φ — азимутальный угол (отвечает за выбор плоскости анализа), рад;

γ — угол поляризации, рад.

Для анализа влияния описанных выше факторов на вход модели подавались различные наборы данных, в которых изменялись условия проведения эксперимента (λ , θ_i) и параметры поверхности (σ , $l_{кор}$). Для моделирования индикатрисы рассеяния также задан экспоненциальный вид статистики для функции спектральной плотности, описываемый выражением:

$$PSD(\theta_s) = \frac{2\pi \cdot \sigma^2 \cdot l_{кор}^2}{\left[1 + \left[k_i^2 + k^2(\theta_s) - 2k_i \cdot k(\theta_s) \cdot \cos \varphi\right] \cdot l_{кор}^2\right]^{3/2}},$$

где $l_{кор}$ — длина корреляции, нм .

После синтеза индикатрисы в модель вводились следующие аппаратные ограничения:

- 1) диапазон углов сканирования рассеянного излучения 5–85°;
- 2) шум фотоприемного тракта, заданный как 10^{-8} ср^{-1} , соответствует среднему уровню шума в фотоэлектронных умножителях;
- 3) Рэлеевское рассеяние на поверхностных молекулах.

Исследование показало, что для более грубых поверхностей наиболее лимитирующим фактором оказался ограниченный диапазон углов сканирования, при уменьшении значения шероховатости возрастало влияние шумов фотоприемного тракта и рассеяния на молекулах. Также иногда при изменении угла падения и длины волны падающего излучения восстановленная шероховатости имела совершенно неадекватное значение (ошибка порой достигала более 50 %), что мы объясняем как неоптимальные условия проведения измерений, при которых происходит выделение слишком узкого диапазона пространственных частот.

В работе продемонстрировано влияние аппаратных ограничений на точность восстановления среднеквадратичной шероховатости поверхности методом дифференциального рассеяния. Для поверхностей с СКО неоднородностей около единиц-десятков нанометров наиболее преваляющим ограничением является ограниченный диапазон углов сканирования рассеянного излучения, для более же оптически гладких поверхностей точность ограничивается такими факторами как Рэлеевское рассеяние на молекулах и шумы фотоприемного тракта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] A. von Finck International round-robin experiment for angle-resolved light scattering measurement / A. von Finck, T. Herfurth, A. Duparre // Applied Optics. — 2019. — Vol 58. — P. 6638–6654 — DOI: 10.1364/58.006638.
- [2] Денисов, Д. Г. Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния при контроле поверхностных неоднородностей субнанометрового уровня профилей оптических деталей / Д. Г. Денисов // Прикладная физика. — 2022. — Том 1. — № 1. — С. 89–96.

Analysis of the accuracy capabilities of the implementation of the differential scattering method

D. A. Mashoshin¹, D. G. Denisov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The paper presents an accurate analysis of the original scheme for monitoring the quality parameters of ultra-precise optical surfaces based on the differential scattering method — taking into account both the main sources of error of the method used and the instrumental error caused by the use of a robotic complex as a means of automating measurements, as well as the influence of the quality of laser radiation on the process of its registration.

Keywords: Differential scattering method, Scattering indicatrix, Surface inhomogeneities

Секция 7

Квантовые оптические технологии

Инженерия квантовых состояний света в схемах с измерениями

Т. Ю. Голубева^{1,2}, Е. Н. Башмакова¹, Э. Р. Зинатуллин¹, С. Б. Королев^{1,2}, Е. А. Вашукевич¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Рассмотрены требования к построению негауссовых квантовых состояний, необходимых для квантово-информационных приложений. Описаны принципы генерации негауссовых квантовых состояний и возникающие при этом экспериментальные трудности. Рассмотрен подход, основанный на негауссовых измерениях гауссовых состояний.

Ключевые слова: Квантовые вычисления, Негауссовы состояния, Коррекция ошибок, Сжатые состояния Фока

Говоря о генерации негауссовых квантовых состояний в оптических схемах, прежде всего необходимо отталкиваться от того, для каких целей требуется построить то или иное состояние. Сегодня негауссовы квантовые состояния рассматривают как неотъемлемый элемент квантовых вычислений. С одной стороны, без негауссовых ресурсов невозможно построить универсальную вычислительную модель в непрерывных переменных [1, 2]. С другой стороны, наличие негауссовых состояний является критически важным для исправления ошибок квантовых вычислений [3].

В настоящее время отсутствие надежных методов генерации требуемых негауссовых квантовых состояний является основным «узким местом» для реализации вычислительных протоколов на осцилляторах.

Информационные приложения (в частности, протокол коррекции ошибок) базируются на идеализированных состояниях, генерация которых на уровне современного эксперимента недоступна [4–7]. В то же время, совмещение линейно-оптических элементов, ресурса сжатых входных состояний и техники измерения чисел фотонов позволяет генерировать большое разнообразие квантовых негауссовых состояний [8–12]. Исследованию данных возможностей посвящена представленная работа.

Рассмотрим схему генерации сжатых фоковских состояний, где на вход подаются два несимметричных сжатых вакуумных состояния, а состояние на одном из выходов измеряется с помощью детектора числа фотонов (PNRD). Мы покажем, как правильный выбор параметров двухмодового гауссового состояния приводит к генерации точного сжатого состояния Фока.

Для экспериментальной реализации рассматриваемой схемы мы обсудим два класса перепутывающих операций: светоделитель и преобразование Controlled-Z (CZ). Мы обсудим чувствительность предложенной процедуры к оптическим потерям в схеме. Мы покажем, какие требования на уровень сжатия входных состояний накладываются для каждого класса преобразования. Будет получена возможность найти баланс между экспериментальными трудностями генерации входных состояний и значением вероятности генерации сжатых фоковских состояний, а, следовательно, возможность понизить требования на ресурс входных состояний.

Наконец, покажем, насколько эффективны состояния, генерируемые в предложенной схеме, для процедуры коррекции ошибок.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранты № 24-22-00004 и № 24-22-00318) и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-1-4-39-1). Т. Ю. Голубева и С. Б. Королев благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования Российской Федерации и Южно-Уральский государственный университет (соглашение № 075-15-2022-1116). Т.Ю. Голубева благодарит за поддержку Санкт-Петербургский государственный университет (ID 120841686).

Список источников

- [1] Braunstein, S. L. Quantum information with continuous variables / S. L. Braunstein, P. van Loock // *Reviews of Modern Physics*. — 2005. — Vol. 77. — 513. — DOI: 10.1103/RevModPhys.77.513.
- [2] Lloyd, S. Quantum computation over continuous variables / S. Lloyd, S. L. Braunstein // *Physical Review Letters*. — 1999. — Vol. 82. — 1784. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.1784.
- [3] Niset, J. No-go theorem for gaussian quantum error correction / J. Niset, J. Fiurášek, N. J. Cerf // *Physical Review Letters*. — 2009. — Vol. 102. — 120501. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.120501.

- [4] **Ralph, T. C.** Quantum computation with optical coherent states / T. C. Ralph, A. Gilchrist, G. J. Milburn, W. J. Munro, S. Glancy // *Physical Review A*. — 2003. — Vol. 68. — 042319. — DOI: 10.1103/PhysRevA.68.042319.
- [5] **Hastrup, J.** All-optical cat-code quantum error correction / J. Hastrup, U. L. Andersen // *Physical Review Research*. — 2022. — Vol. 4. — 043065. — DOI:10.1103/PhysRevResearch.4.043065.
- [6] **Ourjountsev, A.** Generation of optical ‘Schrödinger cats’ from photon number states / H. Jeong, R. Tualle-Brouri, P. Grangier // *Nature*. — 2007. — Vol. 448. — 784. — DOI: 10.1038/nature06054.
- [7] **Sychev, D. V.** Enlargement of optical Schrödinger's cat states / D. V. Sychev, A. E. Ulanov, A. A. Pushkina, M. W. Richards, I. A. Fedorov, A. I. Lvovsky // *Nature*. — 2017. — Vol. 11. — 379. — DOI: 10.1038/nphoton.2017.57.
- [8] **Takase, K.** Gottesman-Kitaev-Preskill qubit synthesizer for propagating light / K. Takase, K. Fukui, A. Kawasaki, W. Asavanant, M. Endo, J.-i. Yoshikawa, P. van Loock, A. Furusawa // *npj Quantum Information*. — 2023. — Vol. 9 — 98. — DOI: 10.1038/s41534-023-00772-y.
- [9] **Takase, K.** Generation of optical Schrödinger cat states by generalized photon subtraction / K. Takase, J.-i. Yoshikawa, W. Asavanant, M. Endo, A. Furusawa // *Physical Review A*. — 2021. — Vol. 103 — 013710. — DOI: 10.1103/PhysRevA.103.013710.
- [10] **Podoshvedov, M. S.** Algorithm of quantum engineering of large-amplitude high-fidelity Schrödinger cat states / M. S. Podoshvedov, S. A. Podoshvedov, S. P. Kulik // *Scientific Reports*. — 2023. — Vol. 13 — 3965. — DOI: 10.1038/s41598-023-30218-6.
- [11] **Olivares, S.** Squeezed Fock state by inconclusive photon subtraction / S. Olivares, M. G. A. Paris // *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*. — 2005. — Vol. 7 — S616. — DOI: 10.1088/1464-4266/7/12/025.
- [12] **Korolev, S. B.** Generation of squeezed Fock states by measurement / S. B. Korolev, E. N. Bashmakova, A.K. Tagantsev, T. Yu. Golubeva // *arXiv preprint*. — 2023. — arXiv:2312.14643. —DOI: 10.48550/arXiv.2312.14643.

Engineering quantum states of light in the schemes with measurements

T. Yu. Golubeva^{1,2}, E. N. Bashmakova¹, E. R. Zinatullin¹, S. B. Korolev^{1,2}, E. A. Vashukevich¹

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

² Southern Ural State University, Chelyabinsk, Russia

The report considers requirements for the construction of non-Gaussian quantum states necessary for quantum information applications. We discuss the principles for generating non-Gaussian quantum states and the experimental difficulties encountered in this process. A method based on non-Gaussian measurements of Gaussian states has been thoroughly investigated.

Keywords: *Quantum computing, Non-Gaussian states, Error correction, Squeezed Fock states*

Теоретические аспекты волнового смещения в каскадной системе кубитов

А. А. Елистратов¹, С. В. Ремизов^{1,2,3}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики, Росатом, Москва, Россия

²Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, Москва, Россия

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

Представлены результаты теоретического анализа серии экспериментов по волновому смещению излучения, как на одиночном кубите, так и на системах кубитов. Расчеты произведены с использованием аппарата матрицы рассеяния в пределе малых чисел фотонов и с использованием управляющего уравнения на матрицу плотности в пределе больших накачек. Показано, как спектр излучения системы кубитов можно использовать для изучения фотонной статистики неклассических состояний света.

Ключевые слова: Волновое смещение, Кубит, Фотонная статистика

Трех- и четырехволновое смещение — хорошо известные явления, имеющие место в нелинейных средах и описываемые в рамках классической электродинамики. Прогресс экспериментальных возможностей сделал возможным изучение смещения излучения на одиночной квантовой системе, в частности, микроволнового излучения на искусственном атоме, созданном на основе кубита-трансмона. Такой процесс традиционно рассматривается на основе полуклассического подхода, в рамках которого двухуровневая система (ДУС) рассматривается как квантовый объект, а излучение — как классическое поле. С другой стороны, стремительное развитие эксперимента, в частности, создание однофотонного источника и детектора, поставило на повестку дня необходимость создания последовательной квантовой теории волнового смещения на квантовой системе, представляющей собой одиночный атом или ансамбль атомов.

Был применен формализм матрицы рассеяния к задаче волнового смещения на одиночной квантовой двухуровневой системе, погруженной в равновесный тепловой резервуар. С целью использовать аппарат континуального интеграла, проведена фермионизация спиновых степеней свободы ДУС с помощью семионов Попова-Федотова, чьи гриновские функции изначально записываются в мацубаровском представлении. Далее, отынтегрировав семионные степени свободы, получено эффективное действие задачи и с помощью него показано, как от температурных гриновских функций, используемых в теории конденсированного состояния, перейти к нультемпературным пропагаторам, используемым в квантовой теории рассеяния. Выделены диаграммы, ведущие в каждом порядке по взаимодействию, и проанализирована структура соответствующих им аналитических выражений.

Развитый аппарат был применен к анализу эксперимента по смещению непрерывного бихроматического микроволнового излучения на кубите-трансмоне. Показано, что частоты и амплитуды боковых пиков, возникающих помимо двух исходных, можно описать как результат бозонно-стимулированного рассеяния одной из мод падающего бихроматического излучения в другую и наоборот. Показано, что в пределе большой амплитуды накачки выражения для амплитуд боковых пиков переходят в выражения, полученные ранее в рамках полуклассического подхода.

С целью получить пространственную информацию о процессе рассеяния мы включили в рассмотрение пакетные фотоны, каждый из которых является суперпозицией фотонов с импульсами, распределенными вокруг некоего среднего значения. Показано, что наиболее интересными являются эффекты в области средней константы связи между фотонами и ДУС. При рассеянии фотонов, приходящих не одновременно, после взаимодействия с первым фотоном ДУС попадает в медленно спадающее осциллирующее состояние, с которым взаимодействует второй пришедший фотон. Важно, что даже если фотоны приходят одновременно, в сформированном связанном состоянии фотонов всегда наблюдается пространственный провал, являющийся проявлением антигруппировки фотонов, возникающей вследствие взаимодействия с ДУС.

Также рассмотрено рассеяние сжатого излучения на ДУС, одновременно находящейся под действием когерентной накачки. Получено простое аналитическое соотношение между амплитудами боковых пиков и мощностями сжатой и когерентной накачек, зависящее от параметра сжатия. Данное соотношение доступно для экспериментальной проверки. В дальнейшем оно позволит использовать методику волнового смещения на ДУС для измерения степени сжатости квантовых состояний света.

Развитые выше подходы применены к рассмотрению каскадной системы двух кубитов, состоящей из кубита-источника, подвергающегося резонансной когерентной накачке, и кубита-приемника, принимающего излучение с кубита-источника и находящегося также под действием когерентной накачки. С помощью управляющего уравнения матрицы плотности получен спектр излучения кубита-приемника, совпадающий с наблюдаемым на эксперименте.

Theoretical Aspects of Wave Mixing in a Cascaded Qubit System

A. A. Elistratov¹, S. V. Remizov^{1,2,3}

¹All-Russian Research Institute of Automation, Rosatom, Moscow, Russia

²Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

The results of theoretical analysis of a series of experiments on wave mixing of radiation, both on a single qubit and on qubit systems, are presented. The calculations are performed using the scattering matrix apparatus in the limit of small photon numbers and using the master equation for the density matrix in the limit of large pumping. It is shown how the emission spectrum of a qubit system can be used to study the photon statistics of non-classical states of light.

Keywords: *Wave mixing, Qubit, Photon statistics*

Параметрический усилитель бегущей волны как источник неклассических состояний фотонов

С. В. Ремизов^{1,2,3}, А. А. Елистратов¹, А. В. Лебедев¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия*

² *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия*

³ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

Распространение классического излучения в параметрическом усилителе бегущей волны, представляющем собой набор джозефсоновских переходов, обладает неустойчивостью, изучение которой представляет сложную задачу. Мы показали, что квантовые эффекты приводят к генерации излучения в широком диапазоне частот. Это излучение возникает при распаде моды накачки на сигнальную и холостую моды из-за нелинейности, обусловленной джозефсоновскими переходами. Используя теоретико-полевой подход, основанный на технике Швингера-Келдыша в представлении Намбу, нам удалось вывести кинетические уравнения для нормальных и аномальных чисел заполнения фотонами мод генерируемого излучения, которые задают спектральную плотность и квантовые корреляции между сигнальной и холостой модами соответственно. При определенных условиях возникает нетривиальный режим генерации, характеризующийся экспоненциальным ростом мощности излучения.

Ключевые слова: *Параметрический усилитель бегущей волны, Генерация излучения, Нелинейная среда, Параметрическая неустойчивость*

Возбуждения в классической нелинейной среде могут обладать интересными нетривиальными свойствами. В частности, распространяющиеся волны могут иметь различные виды неустойчивостей. Изучение таких эффектов в квантовом случае представляет собой сложную задачу. Одной из возможных систем, в которой может иметь место такой сценарий, является параметрический усилитель бегущей волны (ПУБВ), состоящий из набора джозефсоновских переходов. Это устройство можно рассматривать как метаматериал. Классическое описание этой системы дано в работе [1]. Квантовое же описание предлагается в представленной работе. Показано, что если к ПУБВ приложить когерентную накачку, то квантовые эффекты могут привести к генерации излучения в широком диапазоне частот. Это излучение возникает при распаде моды накачки на сигнальную и холостую моды из-за нелинейности ПУБВ, которая в рассматриваемой системе обусловлена джозефсоновскими переходами. Дать полноценное описание такого процесса генерации в рамках классического подхода невозможно. Показано, как можно провести формальную процедуру вывода квантового гамильтониана для ПУБВ произвольной структуры, не содержащей активных элементов и с учетом начальных условий. Для описания кинетики ПУБВ мы использовали теоретико-полевой подход, основанный на технике Швингера-Келдыша в представлении Намбу, аналогично работе [2]. В результате удалось создать описание ПУБВ, учитывающее квантовые эффекты и вывести кинетические уравнения для чисел заполнения фотонами мод генерируемого излучения. Важной особенностью развитаемого подхода является возможность описания кинетики как средних величин операторов рождения и уничтожения фотонов в сигнальной и холостой модах, так и их парных кумулянтов, описывающих число фотонов в соответствующих модах и квантовые корреляции между ними. Также показано, что спектральные свойства излучения, генерируемого в результате когерентной накачки ПУБВ, сильно зависят как от спектра ПУБВ, так и от частоты и мощности самой накачки. Более того, при определенных условиях возникает нетривиальный режим генерации. Этот режим напоминает параметрическую неустойчивость в нелинейных средах, и характеризуется экспоненциальным ростом мощности генерируемого излучения. При этом переход от «обычного» режима генерации, характеризуемого степенным ростом мощности, к этому режиму напоминает спектральный фазовый переход, при котором довольно резко меняется спектр генерируемого излучения. В качестве управляющего параметра может выступать как мощность накачки, так и ее частота.

Список источников

- [1] **Yaakobi, O.** Parametric amplification in Josephson junction embedded transmission lines / O. Yaakobi, L. Friedland, C. Macklin, I. Siddiqi // *Physical Review B*. — 2013. — Vol 87. — № 14. — P. 144301.
- [2] **Buchhold, M.** Kinetic theory for interacting Luttinger liquids / M. Buchhold, S. Diehl // *The European Physical Journal D*. — 2015. — Vol 69. — № 10. — P. 224.

Traveling wave parametric amplifier as a source of non-classical photon states

S. V. Remizov^{1,2,3}, A. A. Elistratov¹, A. V. Lebedev¹

¹All-Russian Research Institute of Automation named after N. L. Dukhov, Moscow, Russia

²V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

The propagation of classical radiation in a parametric traveling-wave amplifier, which is a set of Josephson junctions, exhibits instability, the study of which is a complex problem. We have shown that quantum effects lead to the generation of radiation in a wide frequency range. This radiation arises from the decay of the pump mode into signal and idler modes due to the nonlinearity caused by the Josephson junctions. Using a field-theoretical approach based on the Schwinger-Keldysh technique in the Nambu representation, we were able to derive kinetic equations for the normal and anomalous photon occupation numbers of the generated radiation modes, which set the spectral density and quantum correlations between the signal and idler modes, respectively. Under certain conditions, a nontrivial generation regime arises, characterized by an exponential increase in the radiation power.

Keywords: *Quantum optics, Parametric amplifier, Quantum phase transition*

Учет влияния разной эффективности детекторов для установки с пассивным выбором базиса в случае квантового канала спутник-земля

Е. И. Ивченко^{1,2,3,4}, А. С. Трушечкин^{4,5,6,7}, А. В. Хмелев^{1,2,3}, В. Л. Курочкин^{1,2,3,4}

¹ Российский квантовый центр, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³ ООО «КуСпэйс Технологии», Москва, Россия

⁴ Университет науки и технологий МИСиС, Москва, Россия

⁵ ООО «КуРЭйт», Москва, Россия

⁶ Математический институт им. В. А. Стеклова РАН, Москва, Россия

⁷ Институт теоретической физики III, факультет математики и естественных наук, Университет имени Генриха Гейне, Дюссельдорф, Германия

В данной работе исследовано влияние разных эффективностей детекторов на длину секретной последовательности для случая пассивного выбора базиса в эксперименте по квантовому распределению ключей между спутником Мо-цзы и наземной приемной станцией в Звенигороде. Также в рамках работы проведены расчеты длины секретного ключа по экспериментальным данным полученных при пролете спутника с использованием метода позволяющего увеличить скорость генерации за счет обработки полного объема данных, а не с раздельной обработкой данных по базисам

Ключевые слова: Квантовые коммуникации, Неидеальность детекторов

Квантовое распределение ключей (КРК) позволяет пользователям распределять общую криптографическую последовательность, теоретическая секретность которой гарантируется законами квантовой физики. Однако данный подход имеет свои недостатки. Один из них — это низкая эффективность выработки секретного ключа такими системами на континентальных расстояниях, что может быть решено при помощи спутниковых узлов связи. На сегодня уже достигнуты первые значимые успехи в технической реализации технологии [1], однако остаются эффекты практических недостатков систем КРК, которым требуется уделить внимание при оценке секретности ключа. В работе рассматривается проблема разных квантовых эффективностей детекторов одиночных фотонов для различных типов посылаемых квантовых состояний фотонов. В определение разбаланса детекторов входит как разная оптическая эффективность каналов поляризации, так и невозможность создать одинаковые детекторы. Исследования по данной проблеме проводились в случае оптоволоконных систем с активным выбором базиса [2–4]. В данной работе представлено строгое доказательство для получения аналитического выражения скорости генерации секретного ключа для систем КРК «спутник–Земля» с пассивным выбором базиса и учетом разбаланса детекторов. Смоделирован пролет спутника с использованием полуэмпирической модели КРК «спутник–Земля» [5]. По полученным данным рассчитана предполагаемая длина ключа, полученного за один пролет.

Мы работаем в предположении четырех детекторов с различными квантовыми эффективностями $\eta_{z,0}, \eta_{z,1}, \eta_{x,0}, \eta_{x,1}$, которые соответствуют регистрации конкретных состояний в двух базисах Z ($|0\rangle, |1\rangle$) и X ($|+\rangle, |-\rangle$). В качестве протокола используется BB84 с вероятностями испускания квантового состояния p_x и p_z в X и Z базисах соответственно.

Для данного протокола наблюдаемые значения — это вероятность регистрации какого-либо типа импульса $p_{a,\alpha}$, $a \in \{z, x\}$, $\alpha \in \{0, 1\}$, и нормированная на квантовую эффективность вероятность ошибок в каком-либо базисе q_a , $a \in \{z, x\}$.

В силу того, что мы не знаем, как именно действует канал из-за возможных действий перехватчика, невозможно посчитать точный вид распределяемой матрицы плотности и необходимо минимизировать ключ по всем таким матрицам. Однако, используя предложенные выше значения наблюдаемых, а также некоторое симметрии распределяемой матрицы плотности ρ_{AB} можно определить вид матрицы плотности после действия канала, которая минимизирует ключ.

Для вычисления скорости генерации ключа будем использовать подход, при котором получаемые данные разделяются на базисы и для каждого набора данных отдельно оценивается секретный ключ, после чего полученные величины складываются. Данный анализ основан преимущественно на статье [5]. В результате, итоговая скорость генерации определяется следующим выражением:

$$K \geq p_{det}^x \left(h \left(\frac{1 - \delta_z^x}{2} \right) - h \left(\frac{1 - \sqrt{\delta_z^x{}^2 + \delta_x^x{}^2}}{2} \right) + fh(Q_x) \right) + p_{det}^z \left(h \left(\frac{1 - \delta_z^z}{2} \right) - h \left(\frac{1 - \sqrt{\delta_z^z{}^2 + \delta_x^z{}^2}}{2} \right) + fh(Q_z) \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta_z^z &= \frac{p_{z,0} - p_{z,1}}{P_{det}^z}, & \delta_x^z &= \frac{\sqrt{\eta_{z,0}\eta_{z,1}}(t_x - 2q_z)}{P_{det}^z}, \\ \delta_z^x &= \frac{p_{z,0} - p_{z,1}}{P_{det}^x}, & \delta_x^x &= \frac{\sqrt{\eta_{x,0}\eta_{x,1}}(t_z - 2q_x)}{P_{det}^x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где p_{det}^a — вероятность зарегистрировать импульс в базе a ; t_a — пропускание канала для базиса a ; Q_a — процент ошибок в базе a ; $h(x)$ — бинарная энтропия.

Для моделирования эксперимента используются параметры, соответствующие реальной наземной станции с апертурой телескопа 600 мм [5], что дает $p_x, p_z = 0,5$; $QBER = 0,047$; $\eta_{z,0} = 0,146$; $\eta_{z,1} = 0,086$; $\eta_{x,0} = 0,0111$; $\eta_{x,1} = 0,054$.

По итогам работы было получено аналитическое выражение для скорости генерации секретного ключа в системах спутникового КРК с использованием пассивного выбора базиса и учетом разной эффективности детекторов. Для представленных параметров размер полученной за один пролет спутника секретной последовательности составил около 300 кбит.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Стратегический проект «Квантовый Интернет»).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Lu, C. Y.** Micius quantum experiments in space / C. Y. Lu, Y. Cao, C. Z. Peng, J. W. Pan // *Rev. Mod. Phys.* — 2022. — Vol 94. — № 3. — P. 035001.
- [2] **Ma, X.** Practical decoy state for quantum key distribution / X. Ma, B. Qi, Y. Zhao, H. K. Lo // *Phys. Rev. A.* — 2005. — Vol 72. — № 1. — P. 012326.
- [3] **Bochkov, M.K.** Security of quantum key distribution with detection-efficiency mismatch in the single-photon case: Tight bounds. / M. K. Bochkov, A. S. Trushechkin // *Phys. Rev. A.* — 2019. — Vol 99. — № 3. — P. 032308.
- [4] **Trushechkin, A. S.** Security of quantum key distribution with detection-efficiency mismatch in the multiphoton case. / A. S. Trushechkin // *Quantum.* — 2022. — Vol 6. — P. 771.
- [5] **Khmelev, A.V.** Semi-empirical satellite-to-ground quantum key distribution model for realistic receivers. / A. V. Khmelev, E. I. Ivchenko, A. V. Miller, A. V. Duplinsky, V. L. Kurochkin, Y. V. Kurochkin // *Entropy.* — 2023. — Vol 25. — № 4. — P. 670.

Accounting for the influence of different detector efficiencies for the passive basis selection setup in the case of the satellite - to - ground quantum channel

E. I. Ivchenko^{1,2,3,4}, A. S. Trushechkin^{4,5,6,7}, A. V. Khmelev^{1,2,3}, V. L. Kurochkin^{1,2,3,4}

¹ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³ QSpace Technologies, Moscow, Russia

⁴ National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

⁵ QRate, Moscow, Russia

⁶ Steklov Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁷ Institute for Theoretical Physics III, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Heinrich-Heine-University Düsseldorf, Germany

In this paper, we investigate the influence of different detector efficiencies on the length of the secret sequence for the case of passive basis selection in the experiment on quantum key distribution between the Mo-tzu satellite and the ground receiving station in Zvenigorod. Also, within the framework of the work, calculations of the length of the secret key were carried out based on experimental data obtained during the satellite flyby using a method that allows increasing the generation rate by processing the full volume of data, rather than with separate processing of data by bases.

Keywords: Quantum communications, Not perfect detectors

Эффективное обучение модели фотонного процессора со сложной интерферометрической структурой

И. В. Кондратьев¹, К. Н. Урсова¹, А. С. Аргенчиев¹, Н. С. Ключников¹, С. С. Кузьмин^{1,2}, Н. Н. Скрябин¹, И. В. Дьяконов^{1,2}, С. С. Страупе^{1,2}, С. П. Кулик¹

¹ Центр Квантовых Технологий, Физический факультет, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», Москва, Россия

Исследование демонстрирует успешное программирование реконфигурируемого фотонного процессора размером 4×4 со сложной структурой для реализации желаемых унитарных преобразований на линейно-оптическом интерферометре. Программирование было выполнено методом машинного обучения. Метод продемонстрировал высокую точность: средние значения фиделити на тестовых данных составили порядка 0,98 для датасета на основе фаз и 0,97 для датасета на основе токов. Это исследование открывает возможности для дальнейшего эффективного программирования фотонных процессоров.

Ключевые слова: Линейная оптика, Линейно-оптические квантовые вычисления, Машинное обучение в линейной оптике

Введение

Линейно-оптические интерферометры быстро стали незаменимым инструментом в квантовой оптике [1] и оптической обработке информации [2]. Реконфигурируемые интерферометры являются основными компонентами современных экспериментов по линейным оптическим квантовым вычислениям [3] и рассматриваются как аппаратные ускорители для приложений глубокого обучения нейронных сетей [4].

Целью данной работы было применение разработанного нами алгоритма машинного обучения [5] к экспериментальным данным томографии линейно-оптического интерферометра.

1. Мотивация

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в настоящее время существует проблема программирования интерферометров различной архитектуры [6] и программирование таких устройств возможно только с использованием оптимизационных процедур. Процедура оптимизации настройки преобразования реального физического интерферометра требует экспериментального выполнения ресурсоемкой процедуры восстановления матрицы преобразования (томографии) [7] на каждой итерации выбранного алгоритма оптимизации, что может быть неприемлемо в связи с ограниченностью ресурсов.

2. Наш подход

В данной работе применили эффективный алгоритм программирования линейного оптического интерферометра на примере архитектуры [6] (рис. 1). Был использован один из основных методов машинного обучения — обучение численной модели с учителем, который широко применяется при обучении нейронных сетей [8]. Модель интерферометра обучается на датасете $(\vec{\varphi}, U)$ с использованием набора унитарных шаблонов преобразования U , соответствующим разным фазовым задержкам $\vec{\varphi}$ в плечах интерферометра, или на датасете (\vec{x}, U) с использованием набора токов \vec{x} . Обученная модель используется для быстрого нахождения требуемых фазовых сдвигов или токов для заданного унитарного преобразования с использованием процедуры оптимизации, применяемой к модели, а не к физическому устройству.

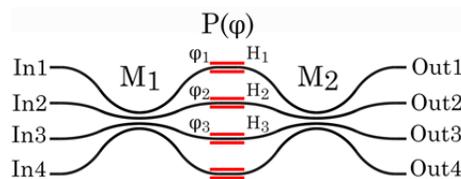


Рис. 1. Схема структуры экспериментального 4-модового интерферометра. Базисные матрицы M_1 и M_2 описывают светоделители (блоки смещения)

3. Основные результаты

Результаты обучения модели на тестовой выборке показали высокое среднее фиделити между матрицами U из тестового датасета и матрицами, которые выдает модель при тех же фазах или токах (рис. 2).

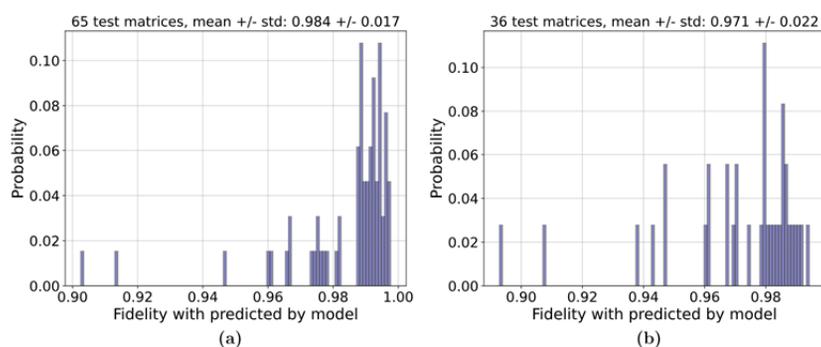


Рис. 2. Гистограммы распределения достоверности для тестирования модели, основанной на машинном обучении: а) тестирование обучения искусственной нейронной сети на наборе данных фазовых сдвигов-матриц $(\vec{\phi}, U)$; б) тестирование обучения искусственной нейронной сети на наборе данных токов-матриц (\vec{x}, U)

Заключение

В данной работе удалось успешно применить алгоритм машинного обучения из работы [5] к экспериментальным данным томографии реального физического устройства линейно-оптического интерферометра. Следует отметить, что полученные результаты могут открыть возможности для использования новых архитектур программируемых оптических интерферометров как для классических, так и для квантовых приложений.

Благодарность

Работа поддержана госкорпорацией «Росатом» в рамках Дорожной Карты Квантовые Вычисления (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 5.10.2021 и No. P2154 от 24.11.2021).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Carolan, J.** Universal linear optics / J. Carolan, C. Harrold, C. Sparrow, E. Martin-Lopez, N. J. Russell, J. W. Silverstone, P. J. Shadbolt, N. Matsuda, M. Oguma, M. Itoh, G. D. Marshall, M. G. Thompson, J. C. F. Matthews, T. Hashimoto, J. L. O'Brien, A. Laing // *Science*. — 2015. — Vol 349. — № 6249. — P. 711–716.
- [2] **Harris, N. C.** Linear programmable nanophotonic processors / N. Harris, J. Carolan, D. Bunandar, M. Prabhu, M. Hochberg, T. Baehr-Jones, M. L. Fanto, A. Matthew Smith, C. C. Tison, P. M. Alsing, D. Englund // *Optica*. — 2018. — Vol 5. — № 12. — P. 1623–1631.
- [3] **Wang, J.** Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics / J. Wang, S. Paesani, Y. Ding, R. Santagati, P. Skrzypczyk, A. Salavrakos, J. Tura, R. Augusiak, L. Mancinska, D. Bacco, D. Bonneau, J. W. Silverstone, Q. Gong, A. Acin, K. Rottwitz, L. K. Oxenlowe, J. L. O'Brien, A. Laing, M. G. Thomson // *Science*. — 2018. — Vol 360. — № 6386. — P. 285–291.
- [4] **Hamerly, R.** Large-scale optical neural networks based on photoelectric multiplication / R. Hamerly, L. Bernstein, A. Sludds, M. Soljacic, D. Englund // *Physical Review X*. — 2019. — Vol 9. — № 2. — P. 021032.
- [5] **Kuzmin, S.** Architecture agnostic algorithm for reconfigurable optical interferometer programming / S. Kuzmin, I. Dyakonov, S. Kulik // *Optics Express*. — 2021. — Vol 29. — № 23. — P. 38429–38440.
- [6] **Saygin, M. Y.** Robust architecture for programmable universal unitaries / M. Y. Saygin, I. V. Kondratyev, I. V. Dyakonov, S. A. Mironov, S. S. Straupe, S. P. Kulik // *Physical review letters*. — 2020. — Vol 124. — № 1. — P. 010501.
- [7] **Tillman, M.** On unitary reconstruction of linear optical networks / M. Tillman, C. Schmidt, P. Walther // *Journal of Optics*. — 2016. — Vol 18. — № 11. — P. 114002.
- [8] **Ferrari, S.** Smooth function approximation using neural networks / S. Ferrari, R. Stengel // *IEEE Transactions on Neural Networks*. — 2005. — Vol 16. — № 1. — P. 24–38.

Efficient training of a photonic processor model with a complex interferometric structure

I. V. Kondratyev¹, K. N. Urusova¹, A. S. Argenchiev¹, N. S. Klyushnikov¹, S. S. Kuzmin^{1,2}, N. N. Skryabin¹, I. V. Dyakonov^{1,2}, S. S. Straupe^{1,2}, S. P. Kulik¹

¹ Center for Quantum Technologies, Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² International Center for Quantum Optics & Quantum Technologies Limited Liability Company (RQC), Moscow, Russia

The study demonstrates the successful programming of a reconfigurable 4×4 photonic processor with a complex structure to realize the desired unitary transformations on a linear-optical interferometer. The programming was performed by a machine learning method. The method demonstrated high accuracy: the average fidelity values on the test data were of the order of 0.98 for the phase-based dataset and 0.97 for the current-based dataset. This study opens up possibilities for further efficient programming of photonic processors.

Keywords: *Linear optics, Linear optical quantum computing, Machine learning in linear optics*

Изучение термооптических свойств ниобата лития на изоляторе при криогенных температурах

И. О. Венедиктов^{1,2}, Д. М. Кобцев^{1,2}, С. С. Святодух^{1,3}, А. Д. Голиков³, П. П. Ан^{2,3}, В. В. Ковалюк^{1,2}, Г. Н. Гольцман^{1,4}

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

² Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

³ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁴ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Ниобат лития на изоляторе является перспективной платформой для создания программируемых фотонных интегральных схем, поскольку он обладает широким окном прозрачности и высоким значением электрооптического коэффициента, что позволяет создавать амплитудные и фазовые модуляторы с высоким быстродействием (> 10 ГГц). Модуляторы на основе ниобата лития потенциально могут работать при криогенных температурах, что необходимо для реализации оптического квантового компьютера с использованием сверхпроводниковых однофотонных детекторов. Однако из-за зависимости показателя преломления материалов модулятора, необходимо понимать, как будут меняться оптические свойства данного материала при охлаждении. В данной работе исследуется зависимость центральной длины волны резонатора и его добротности от температуры в диапазоне 6–290 К.

Ключевые слова: Ниобат лития, Интегральная оптика, Термооптический эффект, Кольцевые резонаторы, электрооптический эффект

Введение

Квантовый компьютер способен решать определенные классы задач значительно быстрее классического. К таким задачам можно отнести моделирование молекул, задачи связанные с кодированием информации и математическую обработку данных [1]. В качестве кубита может быть любой объект, который может находиться в суперпозиции ортогональных квантовых состояний достаточно долгое время для проведения квантовых операций над ним, например захваченные ионы и атомы, сверхпроводниковые цепи [2].

Одной из самых перспективных платформ для построения квантового компьютера также являются фотоны [3], которые обладают множеством степеней свободы для кодирования кубитов (поляризация, число фотонов, орбитальный угловой момент, тип моды). Также преимуществом фотонов является простота реализации однокубитовых гейтов, которые в интегрально оптической реализации представляют из себя оптические делители и фазовые модуляторы [4]. Подобные перестраиваемые светоделители и фазовые модуляторы могут быть реализованы на платформе ниобата лития на изоляторе (LNOI), обладающего высоким значением электрооптического коэффициента и позволяющего менять его показатель преломления прикладывая к волноводу электрическое поле [5].

Измерение полученных состояний кубитов производится при помощи однофотонных детекторов [6]. На данный момент самым подходящим типом детекторов для квантовых вычислений на фотонах является сверхпроводниковый однофотонный детектор (SSPD) [7], который обладает квантовой эффективностью близкой к 100 %, низким уровнем темновых отсчетов (< 1 Гц), высокой скоростью счета (> 100 МГц) и высоким временным разрешением (< 50 пс). Подобные детекторы могут быть интегрированы прямо на волновод фотонной интегральной схемы (ФИС), позволяя увеличить степень интеграции компонентов фотонного квантового компьютера, его температурную стабильность и масштабируемость.

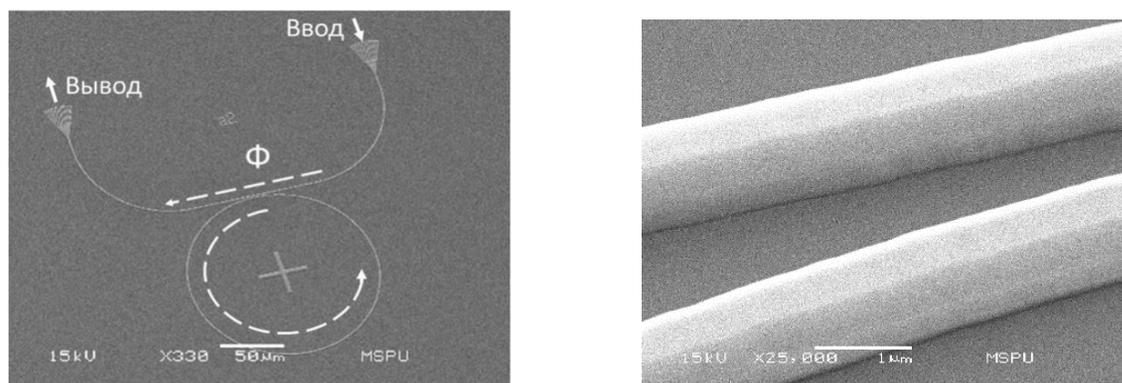
В связи с тем, что SSPD работает при криогенных температурах, при проектировании топологии ФИС необходимо учесть зависимость показателя преломления материала волновода и его окружения от температуры, что можно сделать, следя за спектральными характеристиками кольцевого микрорезонатора при охлаждении.

1. Технологический маршрут изготовления устройства

На первом этапе изготовления происходило напыление твердотельной маски из хрома и оксида кремния. На втором этапе на фотонный чип, методом центрифугирования, наносился электронный резист и происходила электронная литография волнопроводов. Затем происходил процесс травления твердотельной маски и плазмохимическое удаление электронного резиста. На последнем этапе выполнялось травление полученной структуры из ниобата лития в аргоновой плазме с последующей чисткой подложки методом RCA-1 [8].

2. Методика проведения измерений

Чип с готовым устройством располагался на столике, установленном на криогенных пьезопозиционерах Attocube, позволяющих линейно перемещать столик с чипом по осям x , y , z , а также совершать вращение столика вокруг оси z . Излучение заводилось в кольцевой резонатор (рис. 1) при помощи массива волокон, который совмещался с фокусирующими дифракционными решетками устройства. В качестве источника излучения выступал перестраиваемый лазер Santec TSL-570 (1480 – 1640 нм). В качестве измерителя оптической мощности выступал фотодетектор Hamamatsu G9801-32. Для измерения температуры использовался полупроводниковый датчик температуры, установленный на столик с чипом. Система с пьезопозиционерами располагалась в оригинальной установке на основе машины замкнутого цикла SRDK-101D. Измерения спектра кольцевых резонаторов проводились в диапазоне температур от 290 до 6 К с шагом 1 К.

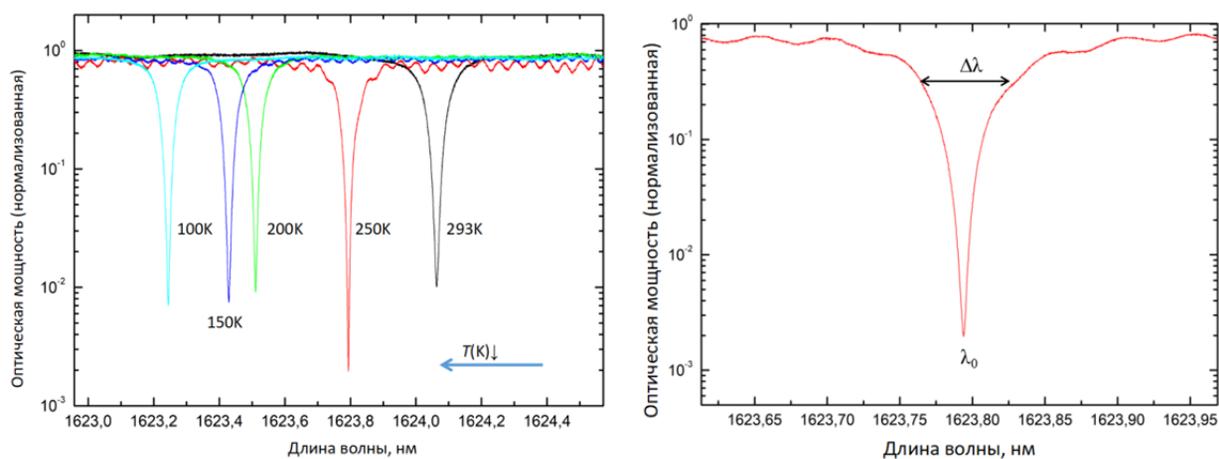


а) общее изображение волноводной структуры б) увеличенное изображение зазора между волноводами

Рис. 1. Изображение изготовленного резонатора в сканирующий электронный микроскоп

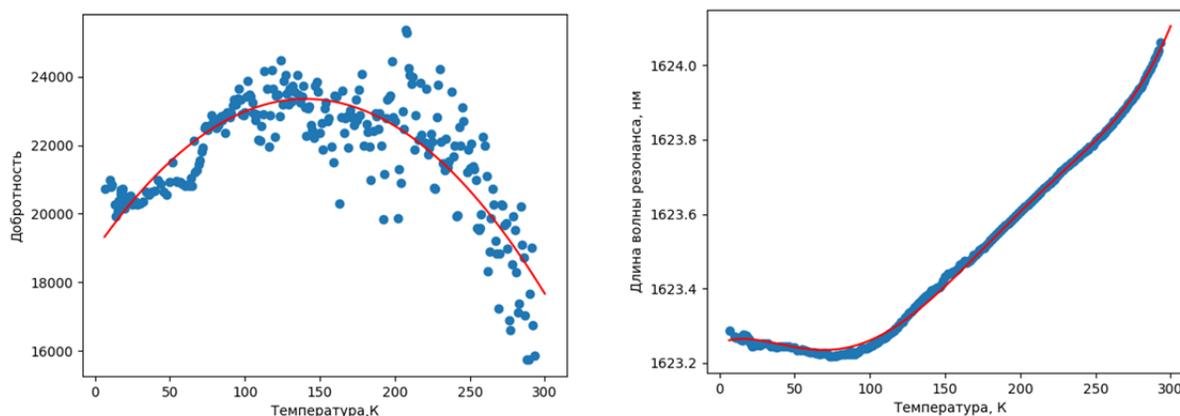
3. Результаты

В результате экспериментальных измерений были получены спектры пропускания кольцевого резонатора при разной температуре (рис. 2), из которых вычислены зависимости добротности и длины волны резонанса при охлаждении. Из графика на рис. 3а видно, что добротность резонансов ($Q = \lambda_0 / \Delta\lambda$) меняется от температуры и имеет максимальное значение при температуре около 150 К, что видно из параболической кривой аппроксимации. Из графика на рис. 3б видно, что длина волны смещается влево до температуры 75 К, что говорит об уменьшении группового показателя преломления волновода LNOI. Данная экспериментальная кривая также была аппроксимирована при помощи полинома пятой степени.



а) спектры резонатора при различных температурах б) увеличенное изображение резонанса с основными характеристиками

Рис. 2. Пример рисунка с черно-белой (а) призмы и в градациях серого (б)



а) зависимость добротности от температуры

б) зависимость длины волны резонанса от температуры

Рис. 3. Графики зависимости:

а) добротности; б) центральной длины волны кольцевого резонатора от температуры. Синие точки — экспериментальные данные, красные кривые — результат аппроксимации

Заключение

В работе были измерены спектры кольцевых резонаторов с волноводами из ниобата лития при температуре от 293 до 6,5 К. Было найдено, что при охлаждении зависимость резонансной длины волны от температуры имеет немонотонный характер: при слабом охлаждении (<100 К) сдвигается в сторону меньших длин волн, а начиная с 75 К возрастает. Добротность имеет максимум ($Q = 24000$) при температуре около 150 К. Полученные данные могут быть использованы при проектировании устройств интегральной оптики на платформе ниобата лития на изоляторе и реализации модуляторов для операций оптического квантового компьютера.

Благодарность

Работа поддержана ГК «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021 и Договоры № P2178, P2179).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ladd, T. D.** Quantum computers / T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, J. L. O'Brien // *nature*. — 2010. — Vol 464. — № 7285 — P. 45–53. DOI: 10.1038/nature08812
- [2] Gambetta, J. M. Building logical qubits in a superconducting quantum computing system / J. M. Gambetta, J. M. Chow, M. Steffen // *npj Quantum Information*. — 2017. — Vol 3. — № 1. — P. 2. DOI: 10.1038/s41534-016-0004-0
- [3] **Zhong, H.S.** Quantum computational advantage using photons / H. S. Zhong, H. Wang, Y. H. Deng, M. C. Chen, L. C. Peng, Y. H. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu, P. Hu, X. Y. Yang, W. J. Zhang, H. Li, Y. Li, X. Jiang, L. Gan, G. Yang, L. You, Z. Wang, L. Li, N. L. Liu, C. Y. Lu, J. W. Pan // *Science*. — 2020. — Vol 370. — № 6523. — P. 1460–1463. DOI: 10.1126/science.abe8770.
- [4] **Knill, E.** A scheme for efficient quantum computation with linear optics / E. Knill, R. Laflamme, G. J. Milburn. // *Nature*. — 2001. — Vol 409. — № 6816. — P. 46–52. DOI: 10.1038/35051009
- [5] **Ковалюк, В.В.** Волноводный сверхпроводниковый однофотонный детектор для фотонного и ионного квантовых процессоров и нейроморфных вычислений / В. В. Ковалюк, И. О. Венедиктов, К. О. Седых, С. С. Святодух, С. Хыдырова, К. М. Моисеев, И. Н. Флоря, А. И. Проходцов, В. С. Галанова, Д. М. Кобцев, А. Ю. Кузин, А. Д. Голиков, Г. Н. Гольцман // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2023. — Том 66. — № 11. — С. 927–985. DOI: 10.52452/00213462_2023_66_11_927
- [6] **O'Brien, J. L.** Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate / J. L. O'Brien, G.J. Pryde, A. G. White, T. C. Ralph, D. Branning // *Nature*. — 2003. — Vol 426. — № 6964. — P. 264–267. DOI: 10.1038/nature02054
- [7] **Gol'tsman, G. N.** Picosecond superconducting single-photon optical detector / G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov // *Applied physics letters*. — 2001. — Vol 79. — № 6. — P. 705–707. DOI: 10.1063/1.1388868
- [8] Celler, G. K. Etching of silicon by the RCA standard clean 1 / G. K. Celler, D. L. Barr, J. M. Rosamilia // *Electrochemical and Solid-State Letters*. — 1999. — Vol 3. — № 1. — P. 47. DOI: 10.1149/1.1390954

Study of the thermo-optical properties of lithium niobate on an insulator at cryogenic temperatures

O. Venediktov^{1,2}, D. M. Kobtsev^{1,2}, S. S. Svyatodukh^{1,3}, A. D. Golikov³, P. P. An^{2,3}, V. V. Kovalyuk^{1,2}, G. N. Goltzman^{1,4}

¹ National Research University Higher School of Economic, Moscow, Russia

² University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

³ Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia

⁴ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

Lithium niobate on an insulator is a promising platform for creating programmable photonic integrated circuits because it has a wide transparency window and a high electro-optical coefficient, which allows the creation of high-speed amplitude and phase modulators (> 10 GHz). Lithium niobate-based modulators have the potential to operate at cryogenic temperatures, which is necessary to implement an optical quantum computer using superconducting single-photon detectors. However, due to the dependence of the refractive index of modulator materials, it is necessary to understand how the optical properties of a given material will change when cooled. In this work, we study the dependence of the central wavelength of the resonator and its quality factor on temperature in the range 6–290 K.

Keywords: *Lithium niobate, Integrated optics, Thermo-optical effect, Ring resonators, Electro-optical effect*

Определение оптимального временного окна фильтрации квантовых сигналов

А. Н. Чернов^{1,2,3,4}, А. В. Хмелев^{1,2,3}, В. Л. Курочкин^{1,2,3,4}

¹ Российский квантовый центр, Москва, Россия

² Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³ ООО «КусПэйс Технологии», Москва, Россия

⁴ Университет науки и технологий МИСиС, Москва, Россия

В данной работе предлагается исследовать влияние размера временного окна фильтрации на минимальную длину получаемого секретного ключа. Анализ зависимости проводился для временного распределения квантовых сигналов с восстановленной частотой следования, смоделированного на основе данных полуэмпирической модели. В результате был найден оптимальный размер временного окна фильтрации, максимизирующий длину секретного ключа. Эта работа может быть полезна при проектировании систем обработки квантовых сигналов и повышении их эффективности с точки зрения увеличения скорости распределения квантового секретного ключа.

Ключевые слова: Квантовые коммуникации, Квантовое распределение ключей, Спутниковая квантовая связь, Временная фильтрация

Введение

Фильтрация зарегистрированных квантовых сигналов от шумовых сигналов является важным аспектом процесса получения секретного ключа. Слишком узкое временное окно фильтрации будет значительно обрезать информационные квантовые сигналы, что сокращает итоговую длину секретного ключа. В то время как в широкое окно попадет большее число шумов, что приводит к увеличению числа ошибок, которые также ведут к сокращению итоговой длины секретного ключа. В существующих работах, использующих временную фильтрацию периодического квантового сигнала от равномерно распределенных шумов, отсутствует анализ оптимальности выбираемого размера временного окна фильтрации [1, 2]. В этой работе описывается метод определения оптимального размера временного окна фильтрации, как параметра, максимизирующего минимальную длину секретного ключа, получаемого в сеансе квантового распределения ключа (КРК) со спутником.

1. Моделирования экспериментальных данных

Анализ минимальной длины получаемого секретного ключа в зависимости от размера временного окна фильтрации проводится для временного распределения квантовых сигналов, смоделированного на основе данных полуэмпирической модели [3]. В реальном сеансе КРК со спутником, такое распределение можно получить после процедуры восстановления частоты следования квантовых сигналов, зарегистрированных наземной приемной станцией [1, 4]. Для моделирования данных был выбран зенитный пролет спутника, протокол КРК и остальные параметры сеанса были выбраны на основе работ [3, 5]. В результате было получено следующее временное распределение зарегистрированных сигналов по модулю периода следования квантовых сигналов $T_0 = 10$ нс

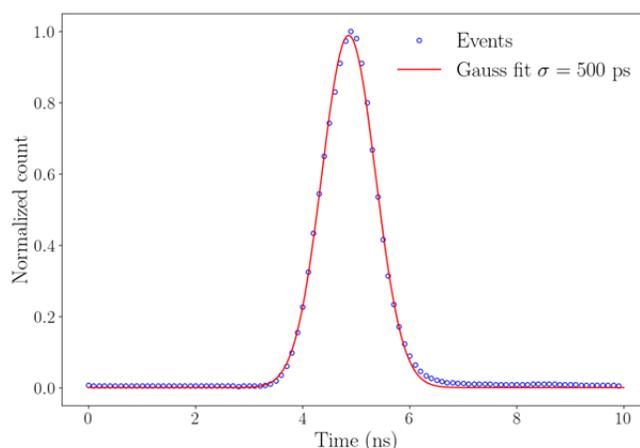


Рис. 1. Нормированное временное распределение зарегистрированных сигналов по модулю периода следования

2. Оптимальное временное окно фильтрации

Оптимальный размер временного окна фильтрации определим как значение, максимизирующее минимальную длину финального секретного ключа, получаемого в сеансе. Установим ограничение сверху на размер временного окна равное 6σ ($\pm 3\sigma$ от пика распределения). Правило « 3σ » гласит, что внутри данного окна находится $\sim 99,7\%$ информационных сигналов, поэтому такое ограничение валидно. Установленное ограничение позволяет значительно сократить диапазон поиска оптимального размера, что облегчает вычислительную задачу. Целесообразность введенного ограничения подтверждает следующий график.

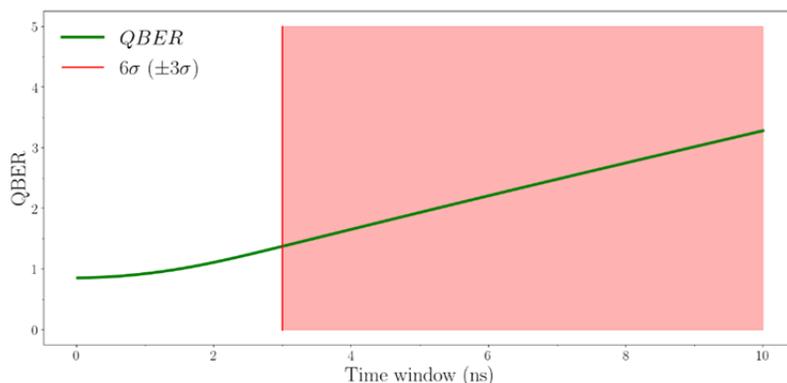


Рис. 2. Зависимость усредненного по сеансу значения QBER от размера временного окна фильтрации

По нему видно, что после отсечки в 6σ QBER линейно возрастает, так как информационных сигналов почти не добавляется, а равномерно распределенные шумы, попадая в фильтрационное окно, увеличивают уровень ошибок. Выбирая размер временного окна фильтрации, фиксируем число сигнальных состояний, состояний ловушек, вакуумных состояний [6], также как и число шумов, попавших в окно фильтрации. Этих данных и параметров сеанса, использованных при моделировании распределения, достаточно, чтобы оценить минимальную длину финального секретного ключа по следующей формуле:

$$l_{sec} \geq N p_s q \left(Q_1 (1 - H_2(E_1)) - 1,44 Q_\mu H_2(E_\mu) \right),$$

где l_{sec} — длина финального секретного ключа; N — общее число световых импульсов, отправленных со спутника; p_s — вероятность испускания сигнального состояния; $q=0,5$ — коэффициент, вызванный процедурой просеивания; Q_1 — число однофотонных состояний; $H_2(\cdot)$ — бинарная энтропийная функция Шеннона; E_1 — уровень ошибок для однофотонных посылок; 1,44 — это эффективность процедуры коррекции ошибок; μ — среднее число фотонов в сигнальных состояниях; Q_μ — число сигнальных состояний; E_μ — усредненное по сеансу значение QBER. Максимизируя правую часть неравенства в зависимости от размера временного окна фильтрации, получим оптимальный размер.

Заключение

В результате работы было смоделировано временное распределение зарегистрированных сигналов, получаемое в сеансе КРК со спутником. Было обосновано ограничение интервала поиска оптимального размера временного окна фильтрации. Был описан метод поиска оптимального размера окна, максимизирующего длину финального секретного ключа.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Стратегический проект «Квантовый Интернет»).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Wang, C. Z.** Synchronization using quantum photons for satellite-to-ground quantum key distribution / C. Z. Wang, et al. // Optics express. — 2021. — Vol 29. — № 19. — С. 29595–29603.
- [2] **Miller, A. V.** Time Synchronization in Satellite Quantum Key Distribution / A. V. Miller // Problems of Information Transmission. — 2023. — Vol 59. — № 4. — С. 225–238.
- [3] **Khmelev, A. V.** Semi-empirical satellite-to-ground quantum key distribution model for realistic receivers / A. V. Khmelev, et al. // Entropy. — 2023. — Vol 25. — № 4. — С. 670.
- [4] **Ivchenko, E.** Blockwise Maximization of the Secret Key with Signal Breaks in Satellite-Based Quantum Key Distribution / E. Ivchenko, et al. // Russian Microelectronics. — 2023. — Vol 52. — № Suppl 1. — С. S317–S321.
- [5] **Liao, S. K.** Satellite-to-ground quantum key distribution / S. K. Liao, et al. // Nature. — 2017. — Vol 549. — № 7670. — С. 43–47.
- [6] **Ma, X. et al.** Practical decoy state for quantum key distribution / X. Ma, et al. // Physical Review A—Atomic, Molecular, and Optical Physics. — 2005. — Vol 72. — № 1. — С. 012326.

Determination of the optimal window size for quantum signals filtering

A. N. Chernov^{1,2,3,4}, A. V. Khmelev^{1,2,3}, V. L. Kurochkin^{1,2,3,4}

¹ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³ QSpace Technologies, Moscow, Russia

⁴ National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia

This work proposes to investigate the influence of the size of the filtering window on the minimum length of the obtained secret key. The analysis is conducted for the temporal distribution of quantum signals after the frequency recovery procedure, simulated based on semi-empirical model data. As a result, the optimal size of the temporal filtering window is found, maximizing the length of the secret key. This study may be useful in designing quantum signal processing systems and improving their efficiency in terms of increasing the quantum secret key distribution rate.

Keywords: *Quantum communications, Quantum key distribution, Satellite-based quantum communications, Time filtering*

Изменение характеристик SSPD с защитным покрытием из ИТО под влиянием радиочастотного поля

К. О. Седых^{1,2}, Е. Сулеймен³, С. С. Святодур^{1,2}, А. Д. Голиков², И. Н. Флоря⁴, В. В. Ковалюк^{1,4}, К. Е. Лахманский³, Г. Н. Гольцман^{1,3}

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

² Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

³ Российский квантовый центр, Москва, Россия

⁴ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

В работе представлены экспериментальные данные исследования макета поверхностной ионной ловушки с радиочастотными (RF) электродами и сверхпроводниковым однофотонным детектором (SSPD) из нитрида ниобия, экранированного оксидом индия-олова (ИТО). SSPD могут быть использованы для считывания возбужденного состояния ионного кубита благодаря высокой квантовой эффективности и низким ложным срабатываниям. Были измерены скорость темнового счета и эффективность детектирования SSPD на длине волны 729 нм при температуре 2,2 К. Нанепление экранирующего покрытия из ИТО продемонстрировало увеличение рабочего диапазона детектора и расширило возможности интеграции детектора SSPD в поверхностную ионную ловушку.

Ключевые слова: Поверхностная ионная ловушка, Сверхпроводниковый однофотонный детектор, SSPD, SNSPD, Нитрид ниобия (NbN), Экранирование, Оксид индия-олова (ИТО), Масштабируемый квантовый компьютер на ионах

Введение

В настоящее время существуют различные технологии для возможной реализации квантовой обработки информации. Один из перспективных методов заключается в использовании кубитов, в которых информация закодирована в электронных состояниях отдельных ионов [1]. Ионы изолируются от внешней среды и удерживаются при помощи электромагнитных ловушек. Поверхностные ионные ловушки являются многообещающей архитектурой для построения масштабируемых систем благодаря их компактным размерам и способности интеграции с фотонными интегральными схемами.

Для считывания возбужденного состояния ионного кубита предлагается использовать сверхпроводниковый однофотонный детектор (SSPD или SNSPD, от англ. Superconducting (Nanowire) Single-Photon Detector), обладающий высокой квантовой эффективностью и низким уровнем ложных срабатываний [2]. Использование таких детекторов в интегральном исполнении в ловушках позволит увеличить точность считывания состояний ионов [3].

Поверхностные ионные ловушки представляют собой достаточно сложную электромагнитную и тепловую среду для совместного использования с SSPD на чипе. Ток смещения в детекторе может подвергаться модуляции под воздействием внешнего радиочастотного поля, что отрицательно сказывается на эффективности процесса считывания фотонов [4]. Также для достижения наилучшей эффективности детектирования SSPD температура сверхпроводящего перехода материала детектора должна быть как минимум на 25 % выше температуры на поверхности ловушки (обычно около 3–4 К). Изготовленные из NbN детекторы имеют критическую температуру 7,5 К, что позволяет проводить измерения скорости темнового счета и эффективности детектирования SSPD в зависимости от приложенного поля ловушки. В работе было исследовано влияние покрытия из оксида индия-олова (ИТО) и металлического зеркала из золота (Au) на характеристики SSPD в составе макета поверхностной ионной ловушки с приложением внешнего RF поля ловушки [5].

1. Изменение характеристик SSPD с защитным покрытием из ИТО под влиянием радиочастотного поля

Дизайн макета поверхностной ионной ловушки (ПЛ) с радиочастотными (RF) электродами и сверхпроводниковым однофотонным детектором, экранированным снизу металлическим зеркалом (Au) и сверху защитным покрытием ИТО представлен на рисунке 1. SSPD, изготовленный из тонкой пленки нитрида ниобия толщиной 5–7 нм и шириной нанополоски 100 нм, обладает достаточно высокой критической температурой $T_c = 7,5$ К и плотностью критического тока $j_c \approx 5$ MA/cm². Металлическое зеркало из золота используется для увеличения эффективности детектирования и экранирования детектора.

В диоксиде кремния над детектором могут возникать заряды из-за воздействия УФ-лазера с длиной волны 397 нм при взаимодействии с ионом кальция, что потенциально приводит к нежелательному нагреву иона под воздействием радиочастотного поля. Для смягчения этого эффекта

и минимизации воздействия внешнего поля использовали проводящий и прозрачный слой ITO, покрывающий как контакт детектора, так и RF-контакт.

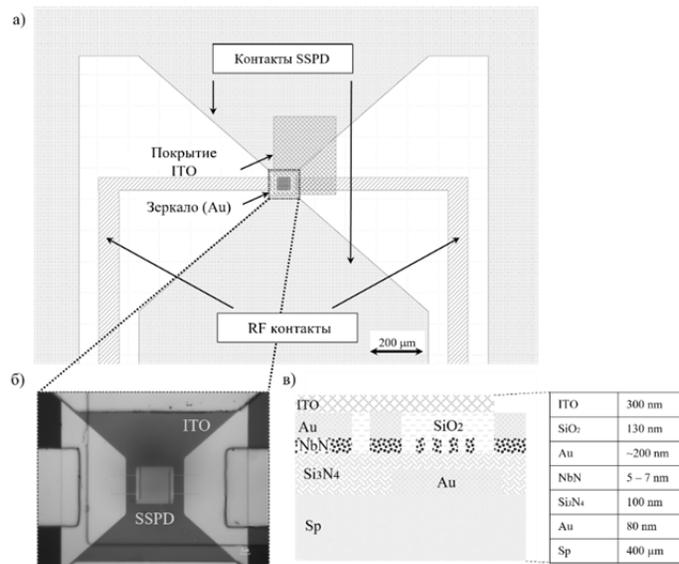


Рис. 1. Дизайн макета ПЛ с RF контактами и сверхпроводниковым однофотонным детектором: (а) контакты RF электродов представлены диагональной штриховкой, контакты SSPD — точечной, область с ITO — перекрестной; (б) микрофотография детектора с шириной полосы 100 нм и покрытием ITO в оптический микроскоп; (в) распределение слоев макета

Исследование макета проводилось при температуре 2,2 К. На рисунке 2 представлены измерения зависимости количества темновых отсчетов (CPS, от англ. counts per second) и световых отсчетов (длина волны 729 нм) SSPD с экранирующим покрытием ITO в зависимости от тока смещения. Значение амплитуды внешнего поля ловушки варьировалось от 0 до 2 В при фиксированном значении частоты 5 МГц.

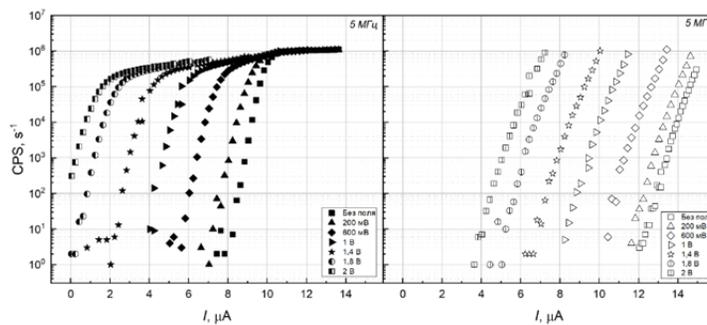


Рис. 2. Зависимость светового (слева) и темнового (справа) счета детектора от тока смещения для различных амплитуд внешнего поля ловушки на частоте 5 МГц с экранирующим покрытием ITO

Анализируя представленные данные, можно заметить, что значение скорости темновых отсчетов не сильно возрастает с увеличением значения частоты внешнего RF-поля. Критический ток, в свою очередь, заметно уменьшается. Однако в сравнении с результатами, представленными в работе [4], где максимально возможное значение амплитуды внешнего поля ловушки на частоте 5 МГц достигало 0,8 В, в данной работе было увеличено до 2 В, что связано с использованием экранирующего покрытия ITO.

Заключение

В данной работе была представлена реализация макета поверхностной ионной ловушки с SSPD, изготовленным из NbN, экранированным ITO. В ходе исследования была измерена зависимость скорости темновых и световых отсчетов от тока смещения SSPD при разных значениях амплитуды внешнего поля на частоте 5 МГц и температуре 2,2 К.

Напыление защитного покрытия из ИТО продемонстрировало увеличение рабочего диапазона поля поверхностной ловушки до 2 В, что является значительным прогрессом для возможностей интеграции детектора SSPD в поверхностную ионную ловушку. Дальнейшее исследование будет направлено на улучшение характеристик детектора и повышения устойчивости к условиям внешнего поля ловушки.

Благодарность

Работа поддержана ГК «Росатом» в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (Договор № 868-1.3-15/15-2021 от 05.10.2021 и Договоры № P2185, P2178).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bruzewicz, C. D.** Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges / C. D. Bruzewicz, J. Chiaverini, R. McConnell, J. M. Sage // *Applied Physics Reviews*. — 2019. — Vol 6. — № 2. — P. 021314. — DOI: 10.1063/1.5088164.
- [2] **Gol'tsman, G. N.** Picosecond superconducting single-photon optical detector / G. N. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, R. Sobolewski // *Applied Physics Letters*. — 2001. — Vol 79. — № 6. — P. 705–707. — DOI: 10.1063/1.1388868.
- [3] **Todaro, S. L.** State readout of a trapped ion qubit using a trap-integrated superconducting photon detector / S. L. Todaro, V. B. Verma, K. C. McCormick, D. T. C. Allcock, R. P. Mirin, D. J. Wineland, S. W. Nam, A. C. Wilson, D. Leibfried, D. H. Slichter // *Physical Review Letters*. — 2021. — Vol 126. — № 1. — P. 010501. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.010501.
- [4] **Sedykh, K. O.** Effect of an External Alternating Electric Field on the Efficiency of a Superconducting Single-Photon Detector / Sedykh K. O., Suleimen Y., Svyatodukh M. I., Podlesnyy A., Kovalyuk V. V., An P. P., Kaurova N. S., Florya I. N., Lakhmanskii K. E., Goltsman G. N. // *Technical Physics*. — 2023. — Vol 93. — № 1. — P. 974. — DOI: 10.61011/TP.2023.07.56637.88-23.
- [5] **Hampel, B.** Trap-integrated superconducting nanowire single-photon detectors with improved rf tolerance for trapped-ion qubit state readout / B. Hampel, D. H. Slichter, D. Leibfried, R. P. Mirin, Sae Woo Nam, V. B. Verma // *Applied Physics Letters*. — 2023. — Vol 122. — № 17. — P. 174001. — DOI: 10.1063/5.0145077.

Performance changing of SSPD with ITO protective coating under the influence of RF field

K. O. Sedykh^{1,2,*}, Y. Suleimen², S. S. Svyatodukh¹, A. D. Golikov², I. N. Florya¹, V. V. Kovalyuk², K. E. Lakhmanskii¹, G. N. Goltsman²

¹ National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia

² Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia

³ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

⁴ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

The paper focuses on the study of a surface ion trap model with radio frequency (RF) electrodes and niobium nitride superconducting single photon detector (SSPD) with indium tin oxide (ITO) shielding cover. These detectors can be used for excited state readout of an ionic qubit due to their high quantum efficiency and low dark count rate. SSPD dark count rate and detection efficiency at 729 nm were measured at 2.2 K temperature. Deposition of ITO shielding cover demonstrated an increase in the operating range of detector, expanding the ability to integrate the SSPD into surface ion trap.

Keywords: Surface ion trap, Superconducting single-photon detector, SSPD, SNSPD, Niobium nitride (NbN), Shielding, Indium tin oxide (ITO), Scalable ion quantum computer

Секция 8

***Технологии микро -
и наноструктурирования***

Современные лазерные технологии в художественной практике

В. П. Вейко

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Лазерные технологии все больше проникают в современное художественное творчество. Если поначалу это были художественная резка и гравировка, затем лазерная очистка произведений скульптуры и искусства, то теперь сделаны первые шаги в лазерной живописи — разработан метод и инструмент для создания полноцветной лазерной миниатюры. Представленный в докладе метод локального лазерного окисления металлов позволяет создавать пространственно-управляемые оксиды интерференционной толщины, конфигурация которых определяет оптическое изображение. Разработанный ручной инструмент — лазерная «кисть» в руке художника позволил впервые нарисовать многоцветные художественные композиции. В докладе обсуждаются физические принципы такой лазерной «живописи», приведена конструкция лазерной кисти и примеры художественных произведений, созданные с помощью этой новой техники.

Ключевые слова: Лазер, Лазерное нагревание и окисление, Интерференция света в тонких пленках, Лазерная кисть

По своей физической сути метод основан на локальном лазерном окислении поверхности металлов, что позволяет создавать пространственно-управляемые оксиды различной интерференционной толщины на поверхности (рис. 1), конфигурация которых образует цветное изображение. Цвет различных участков поверхности в этом процессе определяется природой металла, окружающей атмосферы и толщиной образовавшегося оксида, которая, в свою очередь, управляется температурой поверхности и временем воздействия:

$$color \sim h_{ок} \sim T(q) \times t,$$

где *color* — наблюдаемый цвет обработанного участка; $h_{ок}$ — толщина оксидного слоя; $T(q)$ — температура, до которой нагревается поверхность, как функция плотности мощности лазерного излучения q ; t — время воздействия.

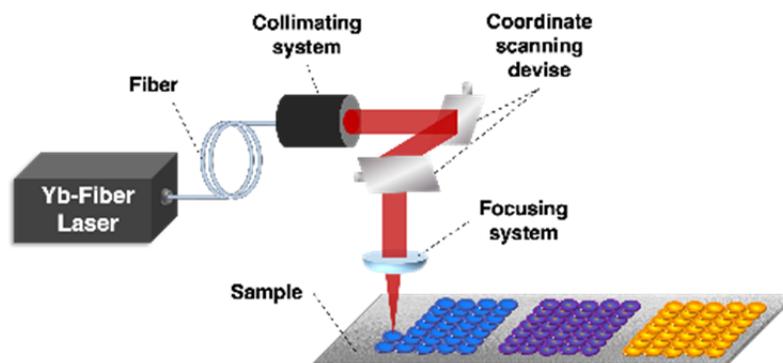


Рис. 1. Схема образование цветных слоев на поверхности металла

Описанный подход является дальнейшим развитием цветной лазерной маркировки. В тот момент, когда в Институте лазерных технологий Университета ИТМО была открыта возможность не только записи цветных изображений, но также корректировки их цвета и формы (ретуши) вплоть до полного преобразования элемента изображения в другой, и полного стирания (перезаписи изображения) [1], стало ясно, что этот метод готов для его применения в художественной практике. Для этого нужен был «только» ручной инструмент — перо или кисть художника. Такой инструмент был создан на основе волоконного иттербиевого лазера непрерывного действия мощностью до 20 Вт [2]. Применяемый для лазерной маркировки импульсный лазер наносекундной длительности здесь не подходит из-за сильного отражения мишени — «холста» и самовозбуждения активной среды. При конструировании лазерной «кисти» были также учтены требования безопасности и эргономические соображения — угол наклона и др.

Ручной инструмент — лазерная «кисть», в руке художника (рис. 2) позволил впервые нарисовать сюжетные и орнаментальные композиции (рис. 3). В докладе более подробно обсуждаются физические принципы такой лазерной «живописи», приведена конструкция лазерной кисти и первые примеры художественных изображений, созданные с помощью этой новой техники и технологии.

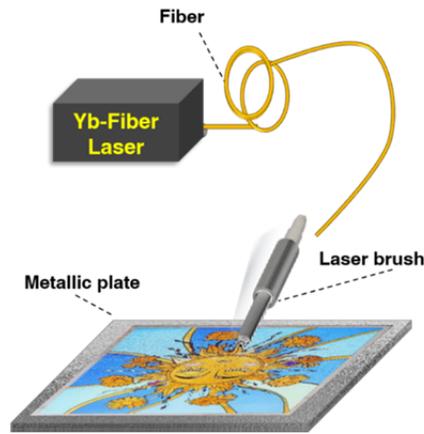


Рис. 2. Схема лазерной «кисти» с непрерывным лазером мощностью 25 Вт на длине волны $\lambda=1064$ нм, диаметр пятна 50 мкм, цвет определяется скоростью движения руки



Рис. 3. Фрагмент плакетки, декорированной лазерной кистью А. Александрова, А. Багаутдинов, (материал — нержавеющая сталь, 13×13 см²)

Благодарность

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030». Автор благодарит всех сотрудников Института лазерных технологий Университета ИТМО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Veiko, V. P.** Production of laser art miniatures using localized oxidation of metals / V. K. Luong, S. G. Gornyi, Y. M. Andreeva, D. S. Lutoshina, G. V. Odintsova // *Journal of Optical Technology*. — 2020. — № 87. — P. 633–637. — DOI:10.1364/JOT.87.000633.
- [2] **Veiko, V. P.** Laser paintbrush as a tool for modern art / Y. Andreeva, L. Van Cuong, D. Lutoshina, D. Polyakov, D. Sinev, V. Mikhailovskii, Y. R. Kolobov, G. Odintsova // *Optica*. — 2021. — Vol 8. — № 5. — P. 577–585. — DOI: 10.1364/OPTICA.420074.

Modern laser technologies in artistic practice

V. P. Veiko

National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Laser technologies are increasingly penetrating into modern artistic creativity. If at first it was artistic cutting and engraving, then laser cleaning of works of sculpture and art, now the first steps in laser painting have been taken - methods and tools have been developed for creating full-color laser miniatures. One such method, local laser oxidation of metals, allows the creation of spatially controlled oxides of interference thickness on the surface, which determine the image. The developed hand tool – a laser “brush” in the artist’s hand will allow you to draw plot and ornamental compositions in an original way. The talk discusses the physical principles of this laser “painting”, showing laser brush designs and artistic images created using this new technique.

Keywords: *Laser, Local heating and oxidation, Interference, Laser brush*

Сочетание двухслойного материала и двухэтапного травления — ключ к идеальной лазерной термохимической технологии бинарных синтезированных голограмм

Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

*Разработана термохимическая лазерная технология прямой лазерной записи бинарных синтезированных голограмм на основе двухслойных материалов типа кремний-металл и двухэтапного селективного травления. Использование термохимической реакции образования силицидов существенно расширило диапазон мощности лазерного пучка для термохимической записи по сравнению с реакцией окисления и улучшило пространственное разрешение. Сформированные металло-силицидные маски проявляются двухэтапным травлением, обеспечивающим уникально высокую селективность, и затем используются для фотолитографии или как маски для травления подложки. Значительное изменение отражения при лазерной записи на двухслойных материалах позволяет реализовать *in-situ* контроль формируемого рисунка до проявления.*

Ключевые слова: *Термохимическая лазерная запись, Селективное травление, Бинарные синтезированные голограммы, Лазерные записывающие системы*

Введение

В настоящее время сканирующие методы лазерной записи являются наиболее универсальными и широко применяемыми для формирования микрорельефа элементов дифракционной и микрооптики. Они основаны на сканировании сфокусированным амплитудно-модулированным лазерным пучком поверхности подложки, покрытой слоем регистрирующего материала. Металлические пленки являются активно используемым регистрирующим материалом для задач изготовления фотошаблонов и маскирующих структур с целью дальнейшего переноса рисунка с помощью плазменного ионного травления в материал оптической подложки при изготовлении синтезированных голограмм (СГ).

Как правило, для формирования маскирующего рисунка в пленке металла, используется фоторезистивная технология, основанная на нанесении поверх металлической пленки слоя фоторезиста, который экспонируется УФ-излучением через фотошаблон или сфокусированным лазерным пучком [1–3] с последующим проявлением записанного рисунка. Однако для ряда задач дифракционной оптики оптимальным является технология прямой термохимической лазерной записи на металлической пленке [3–5]. При использовании в качестве регистрирующего материала пленок хрома (Cr) термохимическое лазерное воздействие на нее приводит к образованию в экспонированных участках тонкого слоя оксида. Таким образом, формируется скрытое изображение структуры, которое проявляется в селективном жидкостном травителе до полного удаления окружающей неэкспонированной пленки Cr. При этом, жидкостное травление неэкспонированных участков хрома является одним из критических этапов данной технологии. Это связано с тем, что селективный травитель хрома, на основе $K_3Fe(CN)_6$ [6], достаточно активно травит, в том числе, и сформированную при термохимической лазерной записи хромово-оксидную маску. В связи с этим ошибки на данном этапе приводят к браку изготавливаемых элементов.

Помимо пленок Cr для задач термохимической лазерной записи исследуются и другие материалы, например, металлы подгруппы титана [7–11]. Однако существенным недостатком титановых пленок является нестабильность их характеристик из-за постепенного окисления при хранении в воздушной атмосфере. Для блокирования процесса окисления поверх металлической пленки можно напылять тонкий защитный слой другого материала, например кремния (Si) [12–15]. Помимо защитных функций, слой Si, напыленный на пленку металла, за счет более низкой теплопроводности кремния может способствовать уменьшению теплового расплывания в локально нагреваемом участке при лазерном воздействии, что позволит увеличить пространственное разрешение при термохимической лазерной записи на двухслойных пленках кремний-металл. В данной работе представлены результаты разработки термохимической лазерной технологии прямой лазерной записи на двухслойных материалах типа кремний-металл для задач изготовления бинарных синтезированных голограмм.

1. Увеличение поглощения на длине волны лазерного записывающего пучка

Пленки Si обладают высокими коэффициентами преломления и поглощения (в УФ и видимом диапазоне), что позволяет не только защитить металлическую пленку, но и увеличить поглощение излучения на длине волны лазерного записывающего пучка. В ИАиЭ СО РАН были разработаны и созданы

установки лазерной записи с длинами волн записывающего пучка $\lambda = 405$ нм [16] и $\lambda = 532$ нм (совместная разработка с КТИ ИП СО РАН) [17]. Для задач изготовления СГ на данных установках было проведено экспериментальное исследование двухслойных пленок Si/Ti, Si/Hf, Si/Zr и Si/Cr, которое показало, что напыление покровного слоя Si позволяет увеличить оптическое поглощение (A) двухслойных металлосодержащих пленок по сравнению с однослойной металлической пленкой на длине волны 405 нм: $A(\text{Si/Ti})/A(\text{Ti}) \sim 1,3$; $A(\text{Si/Hf})/A(\text{Hf}) \sim 1,4$; $A(\text{Si/Zr})/A(\text{Zr}) \sim 1,4$; $A(\text{Si/Cr})/A(\text{Cr}) \sim 2,0$. На длине волны 532 нм, были получены более высокие значения увеличения поглощения: $A(\text{Si/Ti})/A(\text{Ti}) \sim 1,7$; $A(\text{Si/Hf})/A(\text{Hf}) \sim 1,7$; $A(\text{Si/Zr})/A(\text{Zr}) \sim 1,9$; $A(\text{Si/Cr})/A(\text{Cr}) \sim 2,4$.

2. Прямая лазерная запись на пленках подгруппы титана с покровным слоем кремния

Для экспериментального исследования прямой термохимической лазерной записи на металлах подгруппы титана были изготовлены образцы с толщиной металлической пленки (Zr, Hf и Ti) 50 нм, а также соответствующие двухслойные пленки Si/Zr, Si/Hf (толщина покровного слоя Si ~ 8 нм) и Si/Ti (толщина покровного слоя Si ~ 5 нм). Эксперименты по лазерной записи выполнялись на установке XY лазерной нанолитографии [16]. Длина волны лазерного пучка $\lambda = 405$ нм. Диаметр лазерного пучка в экспериментах ~ 700 нм (FWHM). На рис. 1 представлены микроизображения тестовых структур, записанных при различном значении мощности лазерного записывающего пучка (P).

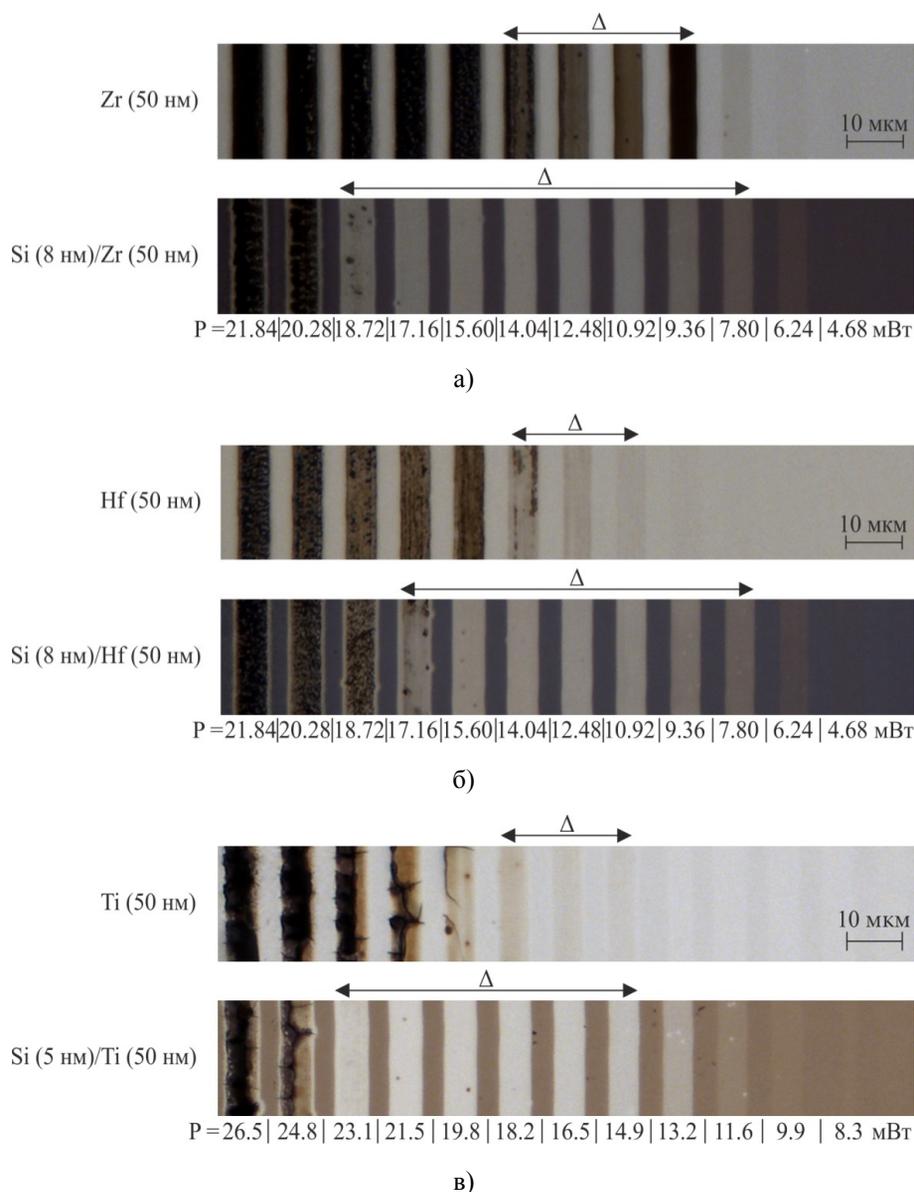


Рис. 1. Микроизображения (в отраженном свете) тестовых структур, записанных с различной мощностью лазерного записывающего пучка:

а) лазерная запись на пленках Zr и Si/Zr; б) лазерная запись на пленках Hf и Si/Hf; в) лазерная запись на пленках Ti и Si/Ti

Экспериментальное исследование показало, что напыление покровного слоя Si позволяет существенно расширить диапазон мощности лазерного пучка для термохимической записи (Δ) на металлических пленках Zr (до $\sim 2,3$ раза), Hf (до ~ 3 раз) и Ti (до $\sim 2,5$ раз). Также можно отметить, что при прямой лазерной записи на двухслойных пленках Si/Ti, Si/Zr и Si/Hf покровный слой кремния просветляется, что приводит к значительному увеличению коэффициента отражения от экспонированных участков. При этом имеется достаточно широкий диапазон мощности записывающего пучка, внутри которого коэффициент отражения от модифицированных участков при записи на исследуемых двухслойных пленках достигает порогового значения и практически не изменяется до приближения к критической мощности термохимической записи, выше которой наблюдается плавление и испарение экспонируемого материала. Такая своеобразная блокировка термохимической реакции в широком диапазоне мощности записывающего пучка может быть использована для более точного управления скважностью записываемых структур.

3. Технология изготовления бинарных СГ на основе термохимической лазерной записи на двухслойных пленках Si/Cr

Стандартная технология изготовления бинарного рельефа элементов дифракционной оптики с помощью прямой лазерной записи на пленках хрома, напыленных на кварцевую подложку [4], включает в себя 3 основных этапа: термохимическая лазерная запись рисунка на пленке хрома; проявление записанного рисунка (жидкостное травление не экспонированных участков пленки хрома); реактивное ионное травление записанного рисунка через сформированную хромово-оксидную маску. Одним из критических этапов данной технологии является этап проявления записанного рисунка путем удаления не экспонированных участков пленки хрома в жидкостном травителе, который достаточно активно травит защитную оксидную маску, сформированную при термохимической лазерной записи. Для решения данной проблемы было проведено исследование по разработке термохимической технологии лазерной записи на двухслойных пленках Si/Cr. Проведенное ранее исследование прямой термохимической лазерной записи на двухслойных пленках Si/Ti [14] показало, что в экспонированных участках при достаточно высоких мощностях лазерного пучка, на границе раздела кремний-металл наблюдается образование композиции силицидов металла, а также оксида металла. Таким образом, можно предположить, что при экспонировании двухслойной пленки Si/Cr также будет наблюдаться формирование хромово-силицидной маски.

Для экспериментального исследования на образце пленки Cr (толщина 25 нм) и двухслойной пленке Si(16 нм)/Cr(25 нм) были записаны тестовые структуры, при различном значении мощности лазерного записывающего пучка (P). На рис. 2 показаны тестовые структуры, на исследуемых образцах после проявления записанного рисунка. Термохимическая лазерная запись на пленке Cr проявлялась с помощью стандартного жидкостного травителя Cr на основе $K_3Fe(CN)_6$. Для проявления записанного рисунка на пленке Si/Cr сначала было необходимо удалить покровный слой Si. Это было сделано путем травления образца в 30 % растворе KOH. В экспериментах время травления слоя Si толщиной 16 нм до полного удаления неэкспонированных участков пленки кремния составляло около 10 минут (при комнатной температуре). Для подтверждения устойчивости сформированной хромово-силицидной маски к данному щелочному травлению после стравливания неэкспонированных участков слоя Si образец дополнительно помещался в 30% раствор KOH еще на 30 минут. Далее через сформированную маску осуществлялось травление неэкспонированных участков пленки Cr в селективном травителе хрома на основе $K_3Fe(CN)_6$. Стандартное время травление пленки хрома толщиной 25 нм до проявления записанного рисунка составляет около 1–2 мин. В связи с этим для начала исследуемый образец травился в селективном травителе хрома в течение двух минут до полного удаления Cr в неэкспонированных участках. После этого образец подвергался дополнительному травлению на протяжении еще 6 минут. Таким образом, общее время травления образца в селективном травителе хрома было увеличено в ~ 4 раза от необходимого для проявления записанного рисунка и составило 8 минут. Полученные результаты показали, что дополнительное время травления хромово-силицидной маски не приводит к ее разрушению, что свидетельствует об уникально высокой селективности данной маски по отношению к кремнию при травлении в 30 % растворе KOH и к хрому при травлении в стандартном травителе хрома на основе $K_3Fe(CN)_6$. Далее проявленная хромово-силицидная маска может быть использована для задач фотолитографии или как маска для травления подложки с помощью реактивного ионного травления с целью формирования микрорельефа бинарных СГ.

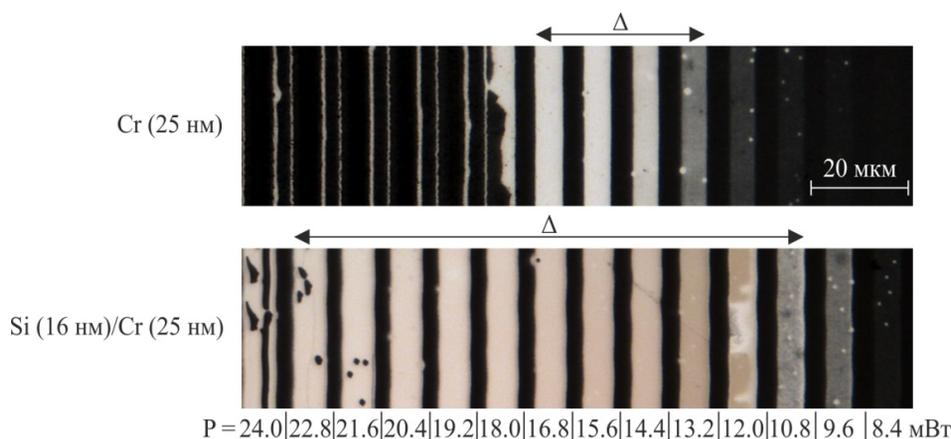


Рис. 2. Микрофотографии (в отраженном свете) сформированных на подложке масок, записанных при различной мощности лазерного записывающего пучка на пленках Cr и Si/Cr, после проявления

Исследование также показало, что напыление покровного слоя Si позволяет до $\sim 3,3$ раза расширить диапазон мощности лазерного пучка для эффективной термохимической записи на пленке Cr защитной маски, устойчивой к жидкостному проявлению (Δ). Важно отметить, что значительное изменение отражения от экспонированных участков при лазерной записи на двухслойном материале Si/Cr позволяет реализовать *in-situ* контроль формируемого рисунка без его проявления [15]. АСМ-анализ тестовых структур, записанных при однократном режиме сканирования лазерного записывающего пучка, показал, что минимальная ширина линии, полученная при записи на двухслойной пленке Si/Cr после проявления, может быть как минимум на $\sim 20\%$ уже по сравнению с линией, формируемой при прямой лазерной записи на однослойной пленке Cr (при толщине покровного слоя Si = 13 нм). Таким образом, экспериментальное исследование показало, что напыление покровного слоя Si также позволяет повысить пространственное разрешение термохимической лазерной записи при изготовлении фотошаблонов и бинарных СГ.

Заключение

Проведено исследование термохимической лазерной записи на двухслойных материалах типа кремний-металл. Анализ характеристик образцов двухслойных пленок Si/Ti, Si/Hf, Si/Zr и Si/Cr показал, что напыление покровного слоя Si позволяет существенно увеличить оптическое поглощение двухслойных металлосодержащих пленок по сравнению с однослойной металлической пленкой на длинах волн 405 нм и 532 нм. По результатам исследования термохимической лазерной записи на длине волны записывающего пучка 405 нм было получено, что напыление покровного слоя Si позволяет существенно расширить диапазон мощности лазерного пучка для термохимической записи на металлических пленках Zr (до $\sim 2,3$ раза), Ti (до $\sim 2,5$ раз) Hf (до ~ 3 раз) и Cr (до $\sim 3,3$ раза).

Разработана технология изготовления бинарных СГ, основанная на использовании термохимической реакции образования силицидов при прямой лазерной записи на двухслойной пленке Si/Cr и двухэтапного селективного травления. По сравнению со стандартной хромовой технологией, основанной на термохимической реакции окисления пленки Cr, данная технология имеет всего один дополнительный этап — травление неэкспонированных участков покровной пленки кремния. Экспериментальная апробация предложенной технологии показала, что термохимически записанные хромово-силицидные маски имеют уникально высокую селективность по отношению к кремнию при травлении неэкспонированных участков двухслойной пленки Si/Cr в 30% растворе KOH и к хрому при травлении открытых участков пленки Cr в стандартном травителе хрома на основе $K_3Fe(CN)_6$. Это позволяет исключить ошибки на этапе жидкостного проявления рисунка с целью формирования на подложке металло-силицидной маски. Далее рисунок, записанный и проявленный хромово-силицидной маски, может использоваться для задач фотолитографии или в качестве маски для травления оптической подложки с целью формирования бинарного рельефа СГ. Экспериментально было получено, что напыление покровного слоя Si позволяет как минимум на $\sim 20\%$ повысить пространственное разрешение термохимической лазерной записи по сравнению с записью на однослойной пленке Cr. Помимо этого важно отметить, что значительное изменение отражения экспонированных участков при лазерной записи на двухслойном материале Si/Cr позволяет реализовать *in-situ* контроль формируемого рисунка без его проявления.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-79-00049, а также за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания ИАиЭ СО РАН (гос. регистрационный № 124041700107-9) с использованием оборудования ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП «Высокие технологии и аналитика наносистем» НГУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Swanson, G. J. *Diractive optical elements for use in infrared system* / G. J. Swanson, W. B. Veldkamp // *Optical Engineering*. — 1989. — Vol 28. — № 6. — P. 605–608.
- [2] Pruss, C. *Metrological features of diffractive high-efficiency objectives for laser interferometry* / C. Pruss, S. Reichelt, H. J. Tiziani, V. P. Korolkov // *SPIE Conference Proceeding*. — 2002. — Vol 4900. — P. 873–884.
- [3] Вейко, В. П. *Лазерные технологии в микрооптике. Ч. 1. Изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием* / В. П. Вейко, В. П. Корольков, А. Г. Полещук, Д. А. Синева, Е. А. Шахно // *Автометрия*. — 2017. — Том 53. — № 5. — С. 66–77.
- [4] Poleshchuk, A. G. *Laser writing systems and technologies for fabrication of binary and continuous relief diffractive optical elements* / A. G. Poleshchuk, V. P. Korolkov // *SPIE Conference Proceeding*. — 2007. — Vol 6732. — P. 130–139.
- [5] Корольков, В. П. *Новые методы изготовления высокоапертурных компьютерно-синтезированных голограмм для формирования эталонных волновых фронтов в интерферометрии* / В. П. Корольков, Р. К. Насыров, А. Г. Седухин, Д. А. Белоусов, Р. И. Куц // *Автометрия*. — 2020. — Том 56. — № 2. — С. 42–54.
- [6] Коронкевич, В. П. *Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома* / В. П. Коронкевич, А. Г. Полещук, Е. Г. Чуринов, Ю. И. Юрлов // *Квантовая электроника*. — 1985. — Том 12. — № 4. — С. 755–761.
- [7] Shakhno, E. A. *Features of laser oxidation of thin films of titanium* / E. A. Shakhno, D. A. Sinev, A. M. Kulazhkin // *Journal of Optical Technology*. — 2014. — Vol 81. — № 5. — P. 298–302.
- [8] Xia, F. *Mechanism of pulsed-laser-induced oxidation of titanium films* / F. Xia, L. Jiao, D. Wu, S. Li, K. Zhang, W. Kong, M. Yun, Q. Liu, X. Zhang // *Optical Materials Express*. — 2019. — Vol 9. — № 10. — P. 4097–4103.
- [9] Korolkov, V. P. *Increasing the spatial resolution of direct laser writing of diffractive structures on thin films of titanium group metals* / V. P. Korolkov, A. G. Sedukhin, D. A. Belousov, R. V. Shimansky, V. N. Khomutov, S. L. Mikerin, E. V. Spesivtsev, R. I. Kutz // *SPIE Conference Proceeding*. — 2019. — Vol 11030. — P. 110300A.
- [10] Belousov, D. A. *Thermochemical Laser-Induced Periodic Surface Structures Formation by Femtosecond Laser on Hf Thin Films in Air and Vacuum* / D. A. Belousov, K. A. Bronnikov, K. A. Okotrub, S. L. Mikerin, V. P. Korolkov, V. S. Terentyev, A. V. Dostovalov // *Materials*. — 2021. — Vol 14. — № 21. — P. 6714.
- [11] Куц, Р. И. *Объемная термохимическая лазерная запись наноструктурированных отражающих дифракционных решеток на двухслойном материале Zr/SiO₂* / Р. И. Куц, В. П. Корольков, С. Л. Микерин, К. А. Окопуб, Д. А. Белоусов, А. И. Малышев, А. Р. Саметов, Р. В. Шиманский, Т. А. Гаврилова // *Оптический журнал*. — 2023. — Том 90. — № 4. — С. 5–17.
- [12] Korolkov, V. P. *Usage of dry processes for the formation of diffractive structures on Ti and Ti/Si films* / V. P. Korolkov, R. I. Kutz, A. I. Malyshev, D. A. Belousov, A. E. Matochkin // *SPIE Conference Proceeding*. — 2021. — Vol. 11873. — P. 1187307. — DOI: 10.1117/12.2597162.
- [13] Белоусов, Д. А. *Лазерная запись силицидных структур на пленках Ti с покровным слоем Si* / Д. А. Белоусов, Р. И. Куц, В. П. Корольков // *HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. — 2023. — С. 318–323.
- [14] Belousov, D. A. *Direct Laser Writing of Diffractive Structures on Bi-Layer Si/Ti Films Coated on Fused Silica Substrates* / D. A. Belousov, R. I. Kutz, K. A. Okotrub, V. P. Korolkov // *Photonics*. — 2023. — Vol 10. — № 7. — P. 771.
- [15] Belousov, D. A. *Thermochemical laser writing of silicide masks on dual-layer films a-Si/Cr* / D. A. Belousov, R. I. Kutz, V. P. Korolkov // *SPIE Conference Proceeding*. — 2023. — Vol 12762. — P. 127620W.
- [16] Корольков, В. П. *Оптимизация оптического канала X-Y лазерного нанолитографа для записи на фото- и термочувствительных материалах* / В. П. Корольков, А. Г. Седухин, А. Е. Качкин, А. Е. Елисафенко // *Интерэкспо Гео-Сибирь. Национальная конференция с международным участием "СИБОПТИКА-2019"*. — 2019. — Том 8. — С. 28–33.
- [17] Poleshchuk, A. G. *Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure* / A. G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, A. A. Kharissov, V. V. Cherkashin, V. P. Kiryanov, A. V. Kiryanov, S. A. Kokarev, A. G. Verhoglyad // *Applied Optics*. — 1999. — Vol 38. — № 8. — P. 1295–1301.

The combination of bi-layer material and two-stage etching is the key to ideal laser thermochemical technology for binary generated holograms

D. A. Belousov, R. I. Kuts, V. P. Korolkov

Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

A thermochemical laser technology for direct laser writing of binary generated holograms based on bi-layer silicon-metal materials and two-stage selective etching has been developed. The use of a thermochemical reaction for the formation of silicides significantly expanded the laser beam power range for thermochemical writing compared to the oxidation reaction and improved spatial resolution. The formed metal-silicide masks are developed by two-step etching, providing unique selectivity, and then used for photolithography or as substrate etch masks. A significant change in reflection during laser writing on bi-layer materials allows for in-situ control of the formed pattern before development.

Keywords: *Thermochemical laser writing, Selective etching, Binary generated holograms, Laser writing systems*

Модификация структуры фоточувствительных борогерманатных стекол фемтосекундными лазерными импульсами

А. Д. Долгополов, И. Ю. Хромых, В. Р. Гресько, М. М. Сергеев, М. К. Москвин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В данном исследовании рассмотрено влияние плотности энергии в зоне фемтосекундной лазерной обработки на коэффициенты отражения и пропускания борогерманатного стекла. Определены пороговые режимы и энергии для модификации кристаллизации и разрушения борогерманатного стекла в одноимпульсном режиме. Было замечено изменение оптических потерь вплоть до 14 % при увеличении энергии импульсов в режиме модификации структуры стекла.

Ключевые слова: Лазерное излучение, Микроструктуры на стекле, Фемтосекундный лазер, Борогерманатные стекла, Модификация поверхности, Оптические свойства стекол

В современной науке и технике фоточувствительные стекла вызывают большой интерес в создании устройств микрообработки. Одним из интересных для исследования видов стекол является борогерманатное стекло, включающее в себя оксиды бора и германия в качестве сеткообразователей [1]. Борогерманатные стекла часто имеют более низкие температуры плавления и более высокую термическую стабильность, что делает их пригодными для применений, где термостойкость и гибкость обработки имеют решающее значение [2]. Кроме того, эти стекла могут иметь различные оптические свойства, такие как более высокие показатели преломления или особые окна пропускания в инфракрасном спектре, что выгодно для оптоволоконной связи и инфракрасной оптики [3]. Исследования зависимости изменения свойств борогерманатных стекол под воздействием лазерного ультракороткого излучения позволит более глубоко понять особенности таких стекол и возможности для их применения в производстве и технике.

Для лазерной модификации структуры борогерманатного стекла использовался лазер Avesta Antaus. Обработка производилась сканированием лазерным излучением, сфокусированным в пятно диаметром 20 мкм на уровне e^{-2} , длительностью импульса 224 фс на длине волны 515 нм. На поверхности стекла при скоростях сканирования от 1 до 5 мм/с и при варьируемых плотности энергии излучения от 10 до 25 Дж/см² были записаны треки длиной до 5 мм.

Результаты оптической микроскопии показали изменение морфологии стекла, происходило уплотнение их структуры и рекристаллизация. Также происходило изменение спектральных свойств обработанного материала, уменьшение оптических потерь в среднем видимом оптическом диапазоне (рис. 1).

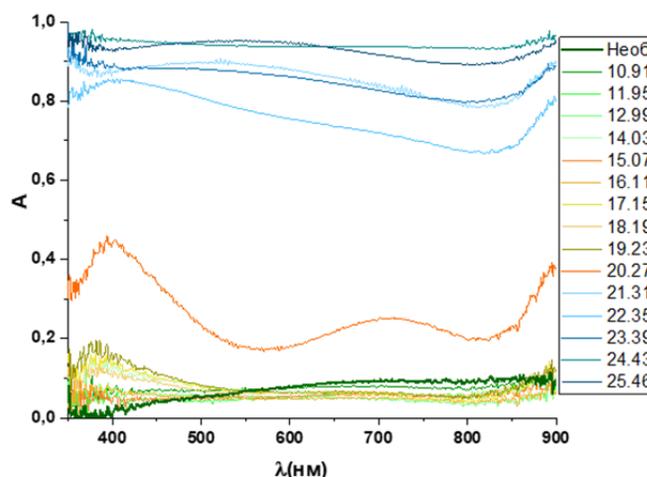


Рис. 1. График зависимостей оптических потерь излучения длин волн от 350 до 900 нм после лазерной обработки с плотностями энергии от 10 до 25 Дж/см²

В данном исследовании подбирались наиболее оптимальные режимы записи волноводов в объеме ФС, изучение пороговых режимов, а также было произведено исследование их оптических характеристик в различных режимах записи. Полученные результаты позволят расширить применение ФС для различного рода задач.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке программы «Приоритет 2030».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Савинков, В. И. Борогерманатные стекла с высоким содержанием оксидов редкоземельных элементов / В. И. Савинков. М.: Москва, 2010.
- [2] Павлюк, А. С. Исследование температурной зависимости оптических свойств борогерманатного стекла с нанокристаллами перовскитов / А. С. Павлюк, А. Н. Бабкина // Стекло: наука и практика (GlasSP2021). — 2021. — С. 120–122.
- [3] Липатьева, Т. О. Формирование под действием лазерного излучения волноводных структур в стеклах и исследование их оптических характеристик / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — Москва. — 2016.

Modification of the structure of photosensitive borogermanate glasses by femtosecond laser pulses

A.D. Dolgoplov, I. Yu. Khromykh, V. R. Gresko, M.M. Sergeev, M. K. Moskvina

ITMO University, St. Petersburg, Russia

This study examines the effect of energy density in the femtosecond laser processing zone on the reflectance and transmittance of borogermanate glass. Threshold modes and energies for modification of crystallization and destruction of borogermanate glass in a single-pulse mode are determined. A change in optical losses of up to 14% was observed with increasing pulse energy in the glass structure modification mode.

Keywords: *Laser radiation, Microstructures on glass, Femtosecond laser, Borogermanate glasses, Surface modification, Optical properties of glasses*

Создание энергонезависимых перестраиваемых элементов фотоники на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур

П. И. Лазаренко¹, В. В. Ковалюк², Е. В. Меньшиков^{1,3}, М. П. Смаев⁴, А. И. Проходцов^{1,2}, А. Д. Голиков^{1,5}, И. С. Синева⁶, С. А. Козюхин⁷

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁶ Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland

⁷ Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Москва, Россия

Фазоперенные материалы (PCM) являются одной из наиболее перспективных платформ для создания перестраиваемых фотонных устройств, обеспечивающих управление оптическим сигналом в свободном пространстве, и устройств интегральной фотоники, предназначенных для выполнения вычислительных операций. В качестве триггеров, инициирующих фазовые переходы в PCM, могут выступать лазерные импульсы фс- и нс- длительности. С практической точки зрения одним из наиболее интересных направлений в рамках взаимодействия лазерного излучения с PCM является формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (LIPSS). В данной работе демонстрируется возможность применения модификации слоев $Ge_2Sb_2Te_5$ с помощью LIPSS для создания фотонных элементов, в том числе перестраиваемых интегрально-оптических брэгговских фильтров.

Ключевые слова: Фазоперенные материалы, Лазерная модификация, Фотонные интегральные схемы

Введение

Фазоперенные материалы (phase change materials, PCM) являются одной из наиболее перспективных платформ для создания перестраиваемых фотонных устройств за счет значительного контраста показателя преломления между аморфной и кристаллической фазами. Применение PCM материалов актуально как для устройств, обеспечивающих управление оптическим сигналом в свободном пространстве, так и для устройств интегральной фотоники, в том числе обеспечивающих выполнение различных вычислительных операций.

В качестве триггеров, инициирующих фазовые и структурные переходы в PCM, могут выступать лазерные импульсы ультракороткой (фемто- и пикосекундной) длительности, которые могут вызывать кристаллизацию, последующую реаморфизацию при использовании большей мощности, абляционные процессы, формирование периодических поверхностных структур. Возможность контроля таких процессов чрезвычайно важна с позиции дальнейшего развития приложений фотоники и интегральной оптики, а сами подобные эффекты представляют фундаментальный интерес из-за относительной малоизученности оптически индуцированных фазовых переходов и сопровождающих их процессов.

С практической точки зрения и научной значимости наиболее интересным направлением в рамках взаимодействия лазерного излучения с PCM, по мнению исполнителей проекта, является формирование в таких материалах лазерно-индуцированных периодических структур (LIPSS - «laser-induced periodic surface structures»), которые могут быть использованы для управления параметрами оптического сигнала в фотонных интегральных элементах.

Таким образом, цель данной работы — демонстрация возможности интеграции LIPSS с элементами интегральной фотоники, функционализированными с помощью GST, для создания перестраиваемых фильтров и оптической многоуровневой памяти ввода/вывода излучения в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1,51–1,62 мкм).

Результаты

В отличие от хорошо известных LIPSS, формирующихся на поверхности различных материалов за счет абляционных процессов, получаемые в условиях «мягкого» (субабляционного) лазерного воздействия на поверхности тонких пленок фазоперенных материалов LIPSS представляют собой периодическое чередование аморфных и кристаллических областей. LIPSS в тонких пленках PCM формируются с периодом как порядка длины волны лазерного излучения, так и с существенно субволновым.

Механизмы формирования и параметры LIPSS во многом зависят от типа материала и параметров воздействия. Одним из возможных механизмов возникновения LIPSS является генерация по-

верхностных плазмон-поляритонов при интенсивном фотовозбуждении свободных носителей заряда в пленках РСМ в результате воздействия ультракороткого лазерного излучения и их последующая интерференция с падающим излучением. Результирующая неоднородность распределения плотности электромагнитной энергии приводит к соответствующей модуляции поглощенной энергии по поверхности пленки, и, как следствие, к пространственному неоднородному распределению температуры РСМ, определяющей возможность фазового перехода. Существенный оптический контраст между аморфной и кристаллической фазами РСМ материалов открывает широкие возможности управления оптическими свойствами фазопеременных пленок за счет формирования LIPSS и, как следствие, может позволить реализовать управление параметрами и направлением распространения оптического излучения.

В данной работе была проведена отработка режимов формирования LIPSS на поверхности тонкой пленки GST, сформированной на покрытых слоем Si_3N_4 подложках, что позволило продемонстрировать возможность точного контроля параметров структуры. Исследование формируемых фазовых состояний, а также определение периода, фактора заполнения, однородности, морфологии поверхности и пространственного распределения элементного состава формируемых LIPSS выполнялось с применением набора распространенных методов исследования, в том числе методов рентгеновского анализа, комбинационного рассеяния света, оптической, атомно-силовой, растровой и просвечивающей электронной микроскопии.

На основе результатов выполненного численного моделирования были изготовлены экспериментальные образцы интегральных элементов, включающих в себя функциональный слой GST. Продемонстрировано, что вызванная формированием LIPSS периодическая модуляция фазового состояния в тонкой пленке фазопеременного материала, нанесенной на планарный волновод, приводит к периодической модуляции показателя преломления эффективной моды, что естественным образом формирует перестраиваемый распределенный брэгговский отражатель или дифракционную решетку.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10322) в лаборатории «Материалы и устройства активной фотоники».

Nonvolatile tunable photonic elements based on laser-induced surface periodic structures

P.I. Lazarenko¹, V.V. Kovalyuk², E.V. Menshikov^{1,3}, M.P. Smaev⁴, A.I. Prokhodtsov^{1,2}, A.D. Golikov^{1,5}, I.S. Sinev⁶, S.A. Kozyukhin⁷

¹ National Research University of Electronic Technology (MIET); Zelenograd, Russia

² National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

³ ITMO University, St. Petersburg, Russia

⁴ Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, Russia

⁵ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

⁶ Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland

⁷ Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow, Russia

Phase-change materials (PCMs) are one of the most promising platforms for creating tunable photonic devices that provide control of an optical signal in free space, and integrated photonics devices designed to perform computational operations. Phase transitions in PCM can initiate by fs- and ns- laser pulses. One of the most interesting area of the interaction of laser radiation with PCM is the formation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS). This work demonstrates the possibility of using LIPSS to create photonic elements based on the $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_3$, including tunable integrated optical Bragg filters.

Keywords: Phase-change materials, Laser modification, Photonic integrated circuits

Фемтосекундное лазерное формирование анизотропного иерархического нанорельефа на поверхности халькогенидных стеклообразных полупроводников

Д.В. Шулейко¹, Д.В. Пепеляев², Е.В. Кузьмин¹, П.П. Пахольчук¹, Т.С. Кункель¹, С.В. Заботнов¹, П.К. Кашкаров¹

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет электронных технологий «МИЭТ», Зеленоград, Россия

В работе показана возможность создания с помощью фемтосекундного лазерного излучения (515 нм, 300 фс) волновых и субволновых поверхностных периодических структур (170–500 нм), с различной глубиной и ориентацией, в том числе в виде иерархических структур, на поверхности тонких пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников. Демонстрируется возможность управления оптической анизотропией сформированного рельефа при варьировании параметров облучения — энергии и числа импульсов, при этом максимальная величина оптического запаздывания составляет не менее 30 нм.

Ключевые слова: Халькогенидные стеклообразные полупроводники, Фемтосекундное лазерное излучение, Оптическая анизотропия

Введение

Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП) являются перспективными материалами для создания элементов инфракрасной фотоники благодаря их высокой прозрачности в инфракрасном диапазоне [1] и возможности создания на них фемтосекундными лазерными импульсами оптически анизотропных периодических поверхностных структур (ППС) [2]. За счет варьирования параметров обработки может быть осуществлено управление оптической анизотропией облученной поверхности, что перспективно для поляризационно-чувствительной оптики и оптической памяти с многоуровневым кодированием [3, 4]. Были получены различные типы ППС на пленках ХСП селенида мышьяка (As_2Se_3 и $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$) и проведен анализ их структурных и оптических свойств.

1. Экспериментальные методики

Для формирования ППС тонкие (850 ± 5 нм) пленки ХСП на хромовых подложках или кварцевых стеклах облучались фемтосекундными лазерными импульсами (Satsuma Amplitude Systems, 515 нм, 300 фс), при различной плотности энергии $E = 34 - 270$ мДж/см² и числе воздействующих импульсов $N = 10 - 1600$.

Морфология облученной поверхности анализировалась методами сканирующей электронной (СЭМ, MIRA Tescan) и атомно-силовой (NEXT II NT-MDT) микроскопии. Для определения оптической анизотропии, индуцированной ППС, были измерены спектры отражения и пропускания исходных и облученных пленок в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне с помощью ИК Фурье-спектрометра (FTIR, Bruker IFS 66v/S) в поляризованном свет, а также проанализированы поляризационные зависимости пропускания на длине волны 633 нм с помощью оптического микроскопа для поляризационных измерений (Thorlabs LCC7201B).

2. Результаты и обсуждение

На поверхности облученных пленок методом СЭМ были выявлены различные типы ППС как с субволновым (~ 170 нм), так и с волновым (~ 500 нм) периодами. Гребни структур параллельны или перпендикулярны поляризации лазера соответственно, а их высота, по данным АСМ-измерений, достигает 100 нм. При постоянной плотности энергии E с ростом N от 50 до 1600 наблюдается трансформация субволновых ППС в волновые. При этом для промежуточных значений N на поверхности облучаемой пленки наблюдается формирование иерархической структуры, когда решетки обоих типов сосуществуют одновременно на облученной поверхности (рис. 1а).

Анализ оптического пропускания облученных пленок ХСП в поляризованном свете на длине волны 633 нм (рис. 1б) показал наличие оптического запаздывания между обыкновенным и необыкновенным лучом до 30 нм, обусловленного наличием одномерного поверхностного рельефа различной глубины. В ближнем ИК диапазоне разница показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн, определенная по положению интерференционных максимумов в ИК-спектрах, составила до 0,1.

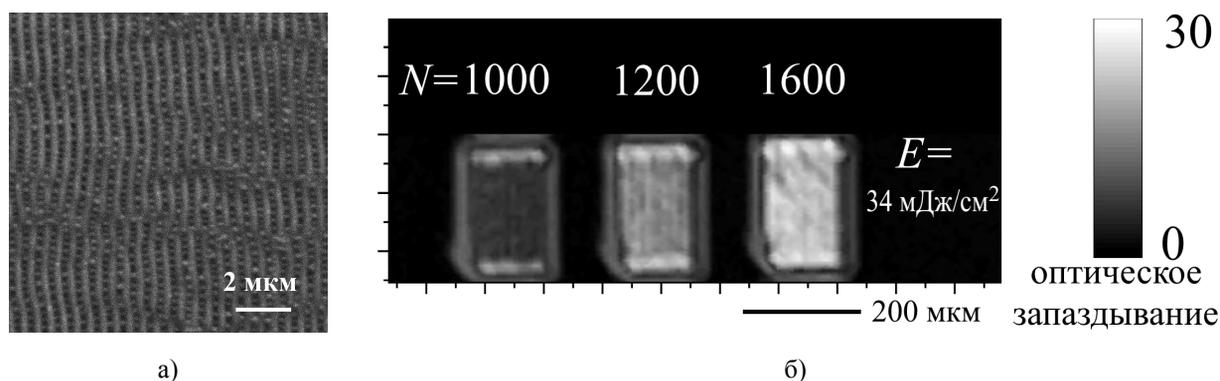


Рис. 1. а) иерархическая ППС, полученная на поверхности пленки $As_{50}Se_{50}$ при $E = 34$ мДж/см² и $N = 1200$; б) оптическое запаздывание обыкновенного и необыкновенного лучей на длине волны 633 нм в тонкой пленке $As_{50}Se_{50}$ при различных параметрах формирования ЛИППС

Заключение

Таким образом, показана возможность создания оптически анизотропного поверхностного рельефа на пленках ХСП фемтосекундными лазерными импульсами, что демонстрирует перспективность использования таких структур в качестве основы для устройств поляризационно-чувствительной ИК-оптики.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-19-00035).

Список источников

- [1] **Ma, W.** Femtosecond laser direct writing of diffraction grating and its refractive index change in chalcogenide As_2Se_3 film / W. Ma, L. Wang, P. Zhang, W. Zhang, B. Song, S. Dai // *Optics Express*. — 2019. — Vol 27. — P. 30090–30101. — DOI: 10.1364/OE.27.030090.
- [2] **Zabotnov, S.** Periodic Relief Fabrication and Reversible Phase Transitions in Amorphous $Ge_2Sb_2Te_5$ Thin Films upon Multi-Pulse Femtosecond Irradiation / S. Zabotnov, A. Kolchin, D. Shuleiko, D. Presnov, T. Kaminskaya, P. Lazarenko, V. Glukhenkaya, T. Kunkel, S. Kozyukhin, P. Kashkarov // *Micro* — 2022. — Vol 2. — P. 88–99. — DOI: 10.3390/micro2010005.
- [3] **Makino, K.** Anisotropic lattice response induced by a linearly-polarized femtosecond optical pulse excitation in interfacial phase change memory material / K. Makino, Y. Saito, P. Fons, A.V. Kolobov, T. Nakano, J. Tominaga, M. Hase // *Scientific Reports*. — 2016. — Vol 6. — Art. 19758. — DOI: 10.1038/srep19758.
- [4] **Wang, H.** 100-Layer Error-Free 5D Optical Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass / H. Wang, Y. Lei, L. Wang, M. Sakakura, Y. Yu, G. Shayeganrad, P.G. Kazansky // *Laser Photonics Rev*. — 2022. — Vol 16. — Art. 2100563. — DOI: 10.1002/lpor.202100563.

Femtosecond laser -induced formation of anisotropic hierarchical nanorelief on chalcogenide glassy semiconductor surfaces

D.V. Shuleiko¹, D.V. Pepelyaev², E.V. Kuzmin¹, P.P. Pakholchuk¹, T.S. Kunkel¹, S.V. Zabotnov¹, P.K. Kashkarov¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Russia

The work demonstrates the possibility to produce wave- and subwave surface periodic structures (170–500 nm) with different depths and orientations, including hierarchical structures, on the surface of thin chalcogenide glassy semiconductor films by femtosecond laser radiation (515 nm, 300 fs). The possibility to control the optical anisotropy of the formed relief by varying the irradiation parameters—energy and number of pulses—is shown, with the maximum optical retardation value being at least 30 nm.

Keywords: Chalcogenide glassy semiconductors, Femtosecond laser radiation, Optical anisotropy

Генерация наночастиц металлов методом лазерно-индуцированного прямого переноса и их применение

Е. В. Ултургашева¹, А. А. Настулявичус¹, С. И. Кудряшов¹, Э. Р. Толордава²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

² Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии имени Н. Ф. Гамалеи, Москва, Россия

Лазерно-индуцированный прямой перенос (ЛИПП) становится высокоэффективным методом и широко применяется во многих областях: начиная от электронных применений (изготовление электродов, зондов, ремонт электрических цепей и т. д.) до применений биомедицины. Кроме того, этот метод является более быстрым и дешевым по сравнению с существующими решениями. С помощью ЛИПП получают нано- и микроструктуры высокого разрешения из практически любого материала, что делает этот метод аддитивной технологией производства различных устройств. В рамках данной работы были изготовлены устройства для различных применений из меди, золота и серебра и исследованы их электромеханические и электрофизические свойства.

Ключевые слова: Лазерно-индуцированный прямой перенос, 3D-печать, Металлические микроструктуры, Аддитивное производство, Наночастицы

Введение

Изготовление микроэлектроники играет немаловажную роль в развитии инновационных технологий. Поэтому изготовление компонентов электроники сейчас активно развивается в направлении быстродействующего и минимально затратного способа печати. Таким критериям удовлетворяет метод лазерно-индуцированного прямого переноса. Его исследования проводились в наших предыдущих работах [1–3], где этот метод зарекомендовал себя перспективным для изготовления высокопроводящих дорожек.

ЛИПП представляет собой технологию аддитивного производства, основанную на использовании лазерного излучения для переноса материала от донорной подложки к акцепторной без промежуточных стадий, как инновационный и перспективный подход в различных областях науки [1], в том числе и для применения в биомедицине. В этой области выделяют одну из насущных проблем — уничтожение бактерий и их скоплений на поверхности кожи. ЛИПП способствует решению данной проблемы. Суть метода состоит в том, что лазерный пучок фокусируется на металлическом слое донорной подложки, нагревает поверхность пленки, причем возникает фронт расплава, распространяющийся по пленке до выхода на свободную поверхность, а когда материал нагревается выше температуры кипения, то результирующее давление пара на границе выталкивает донорный материал в сторону акцепторной подложки.

Здесь представлены последние результаты метода лазерно-индуцированного прямого переноса.

1. Экспериментальная часть

В качестве донорной подложки использовались тонкие пленки меди (серебра) на полиэтилентерефталате (ПЭТ) и предметном стекле. Выбор акцепторной подложки обуславливался в зависимости от задачи исследования, поэтому условно был разделен на стеклянные подложки для проводящих рисунков и стеклянные подложки с выращенной на них биопленкой.

Оптимальный режим для нанесения проводящего слоя соответствует энергии 0,3 мДж, скорости сканирования от 1500 до 2000 мм/с (2–3 импульса в точку) и расстоянию между донорной и акцепторной подложкой около 60 мкм.

При генерации антибактериальных наночастиц (НЧ) оптимальные значения параметров составили: энергия лазерного излучения 0,3 мДж, скорость сканирования 2000 мм/с и расстояние между донором и акцептором около 2 мм.

В обоих экспериментальных исследованиях лазерное излучение фокусировалось f-theta объективом (фокусное расстояние 160 мм) в фокальное пятно диаметром примерно 50 мкм по уровню энергии $1/e$.

2. Результаты и их обсуждение

Полученные с помощью метода лазерно-индуцированного прямого переноса серебряные дорожки на поверхности стекла были визуализированы с помощью оптического микроскопа с увели-

чением 10^{\times} и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) с ускоряющим напряжением 10 кэВ (рис. 1).

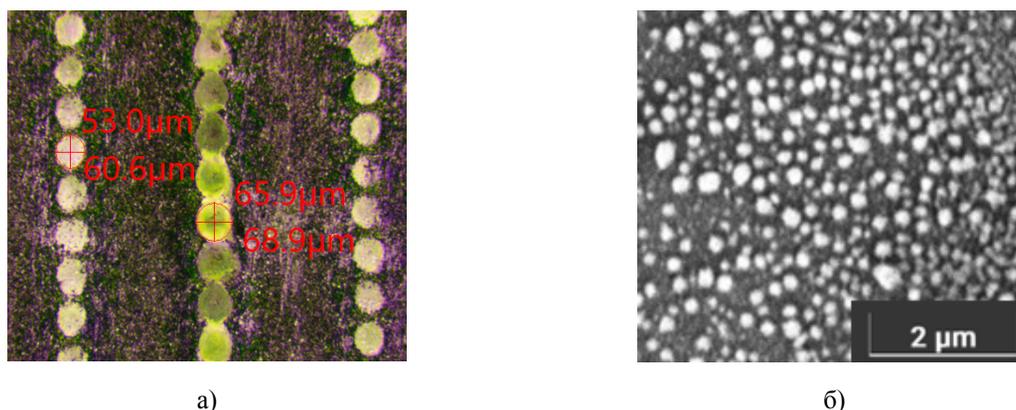


Рис. 1. Визуализация поверхности стекла с нанесенными проводящими дорожками с помощью оптического микроскопа (а) и с помощью СЭМа (б) при оптимальном режиме переноса

Полученные структуры обладают высокой удельной проводимостью (порядка 85 кСм/см), равномерным проводящим слоем и хорошей сплошностью заполнения НЧ.

В ходе эксперимента по исследованию антисептических свойств НЧ серебра, полученных методом ЛИПП, мы получили положительные результаты. Исследуемые образцы (биопленки на стекле) были обработаны наночастицами Ag. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценка антибиопленочных свойств наночастиц серебра при прямом нанесении

	Бактерии КОЕ/мл		
	<i>P.aeruginosa</i> PAO	<i>E.coli</i> 17	<i>S.aureus</i> 15
Ag	<5	<5	<5
Контроль +	3×10^8	6×10^9	3×10^8

Таким образом, исследования показали, что наночастицы серебра проявляют высокие антибиопленочные свойства.

Заключение

Перенос серебряных НЧ с предметного стекла на стекло оказался предпочтительным вариантом при оценке его удельной проводимости до 85 кСм/см, при этом полученные образцы воспроизводились с небольшими отклонениями. По оценке антибактериальной активности НЧ серебра метод ЛИПП нарабатывает наночастицы Ag с высокими антибиопленочными свойствами.

Благодарность

Работа поддержана министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2023-603).

Список источников

- [1] **Nastulyavichus, A.** One-Step Non-Contact Additive LIFT Printing of Silver Interconnectors for Flexible Printed Circuits / A. Nastulyavichus, S. Kudryashov, S. Shelygina, N. Smirnov, P. Pakholchuk, I. Saraeva, D. Zayarny, E. Ulturgasheva, D. Khmelenin, O. Emelyanova, V. Pryakhina, N. Pokryshkin, E. Kuzmin, A. Gorevoy, H. M. Pham, V. D. Pham // *Photonics* — 2024. — Vol 11. — P. 119. — DOI:10.3390/photonics11020119.
- [2] **Настулявичус, А. А.** Выбор режимов одностадийной высокопроизводительной печати серебряных проводящих дорожек на поверхности кремния методом лазерного переноса / А. А. Настулявичус, С. И. Кудряшов, Н. А. Смирнов, П. П. Пахольчук, С. Н. Шельгина, Е. В. Ултургашева, И. Н. Сараева, Д. А. Заярный, В. И. Пряхина, Д. Н. Хмеленин, О. В. Емельянова, Х. М. Фам, В. Д. Фам // *Оптический журнал*. — 2024. — Том 91. — № 2. — С. 99–111.
- [3] **Ulturgasheva, E.V.** Application of Conductive Coatings on a Flexible Polymer Substrate via Laser-Induced Forward Transfer / E. V. Ulturgasheva, A. A. Nastulyavichus, S. I. Kudryashov, H. M. Pham, V. D. Pham // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* — 2024. — Vol 51. — P. 83. — DOI: 10.3103/S1068335623602315.

Generation of metal nanoparticles by laser - induced forward transfer and their application

E. V. Ulturgasheva¹, A. A. Nastulyavichus¹, S. I. Kudryashov¹, E. R. Tolordava²

¹ Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

² Gamaleya Federal Research Center of Epidemiology and Microbiology, Moscow, Russia

Laser-induced forward transfer (LIFT) is becoming a highly effective technique and is widely used in many fields, ranging from electronic applications (electrode, probe, electrical circuit repair, etc.) to biomedical applications. In addition, this method is faster and cheaper than existing solutions. Using LIFT, high-resolution nano- and microstructures are obtained from almost any material, which makes this method an additive technology for the production of various devices. As part of this work, devices for various applications were manufactured from copper, gold and silver and their electromechanical and electrophysical properties were studied.

Keywords: *Laser-induced forward transfer, 3D printing, Metal microstructures, Additive manufacturing, Nanoparticles*

Технология создания оптических линз в объеме кварцевого стекла с помощью фемтосекундной лазерной записи

Г. К. Красин¹, Е. В. Кузьмин¹, М. С. Ковалев^{1,2}, С. И. Кудряшов^{1,2}

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Продemonстрирована технология создания оптических линз в объеме плавленного кварца с использованием технологии фемтосекундной лазерной записи. Эффект фокусировки достигается за счет формирования в объеме кварцевого стекла периодических линий, состоящих из двулучепреломляющих микротреков, с контролируемым фазовым набегом. Варьируя параметры лазерной установки можно управлять не только физическими размерами записываемых оптических элементов, но и глубину фазовой модуляции, что в перспективе позволит заменить существующие массивные объективы на их плоские аналоги.

Ключевые слова: Прямая лазерная запись, Микроструктурирование, Оптические элементы, Двулучепреломляющие микротреки

Введение

Прозрачные диэлектрики, такие как различные стекла и кристаллы, давно зарекомендовали себя как отличные модульные платформы для создания устройств генерации [1], передачи [2] и модуляции [3] света. Ожидается, что в будущем, интегрированные фотонные элементы и системы следующего поколения будут в значительной степени опираться на различные трехмерные (3D) микро- и наноструктуры, записанные в объеме прозрачных диэлектриков [4], что подстегивает постоянно растущий спрос на изготовление высокоинтегрированных полностью оптических устройств и систем. В настоящей работе продемонстрирована технология создания оптических элементов в объеме плавленного кварца на основе самоорганизующихся двулучепреломляющих микротреков.

1. Материалы и методы

В качестве подложки в данной работе была выбрана пластина из плавленного кварца марки КУ-1 (ООО «Электростекло»), образец представляет собой круглую подложку толщиной 3 мм и диаметром 50 мм. Для создания микроструктур в объеме был использован фемтосекундный волоконный иттербиевый лазер Satsuma с основной длиной волны 1030 нм. Длительность импульсов при лазерной записи составляла 0,3 пс, частота следования импульсов от 100 кГц, а максимальная энергия в импульсе варьировалась в диапазоне от 1 до 6 мкДж. Излучение фокусировалось в объеме плавленного кварца с помощью микрообъектива с числовой апертурой $NA = 0,45$. Во время записи образец плавленного кварца перемещался с помощью автоматизированного линейного транслятора Prioq со скоростью 300 мкм/с. В результате лазерного воздействия в объеме плавленного кварца были записаны серии дорожек с варьируемым шагом (случай цилиндрической линзы), а также серий концентрических колец с различным периодом (случай обычной линзы).

В дальнейшем характеристики записываемых оптических элементов исследовались методами оптической микроскопии, фотolumинесцентной (ФЛ) спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) и поляриметрии.

2. Результаты и обсуждение

Для изучения возможности лазерной записи оптических элементов в объеме плавленного кварца были выбраны линзы со следующими параметрами: размер 1000×1000 пикселей, что в совокупности с размером пятна фокусировки (2 мкм) и шагом линейного транслятора Prioq (5 мкм) дает физический размер элементов 5×5 мм; фокусное расстояние $f = 15$ мм на длине волны 660 нм. Были записаны цилиндрические и сферические линзы. Также были записаны не только бинарные оптические элементы, но и градационные. При лазерной записи каждому уровню серого соответствовала своя энергия лазерных импульсов для получения определенного фазового набега.

На рисунке 1 представлены КР спектры до и после формирования двулучепреломляющих микротреков. На спектре КР полосы 490 , 605 и 805 см^{-1} отвечают за мостиковые связи Si-O-Si, по изменению в соотношении между амплитудами этих пиков можно оценить структурные модификации и трансформацию плавленного кварца. Стоит отметить, что с точки зрения изготовления оптических элементов, данные трансформации являются нежелательными, так как уменьшают итоговое оптиче-

ские пропускание. Однако, такие деформации являются обратимыми и устраняются с помощью теплового отжига при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$. Однако это также приводит к уменьшению фазового набегу итоговых микротрещок. Так, на рисунке 2 представлено сравнение поляриметрических снимков линзы до и после отжига, полученных на установке измерения двулучепреломления.

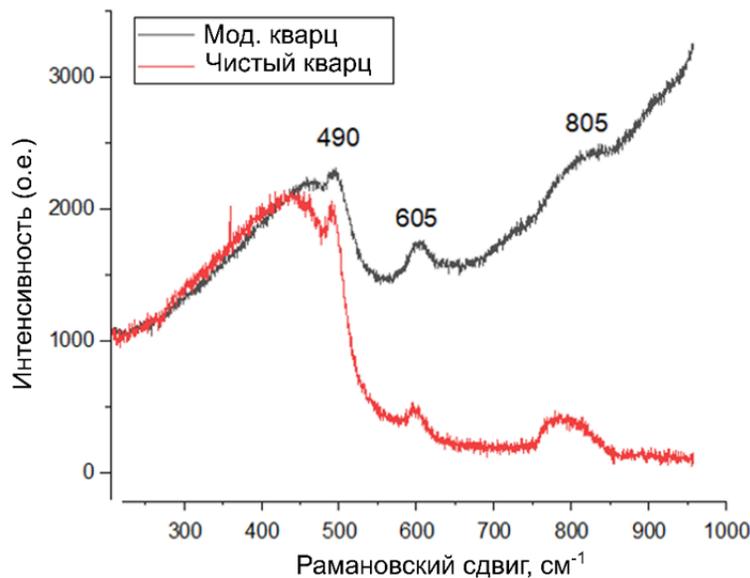


Рис. 1. КР спектры плавленого кварца до и после лазерной модификации

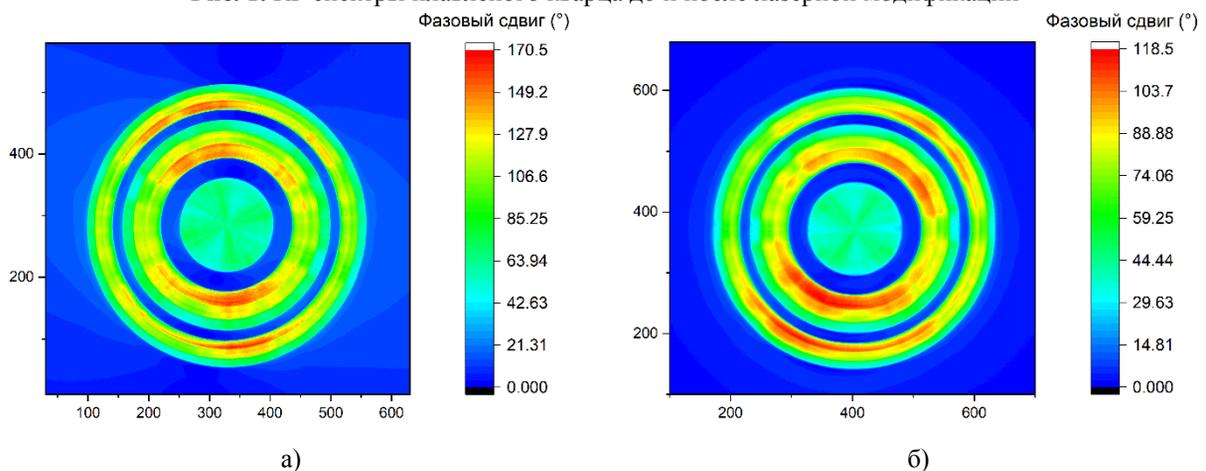


Рис. 2. Поляриметрические снимки линзы в объеме плавленого кварца: до (а) и после (б) отжига

Заключение

В данной работе была исследована технология создания оптических линз в объеме кварцевого стекла с помощью фемтосекундной лазерной записи. Анализ КР спектров в совокупности с методами поляриметрии позволил оценить вклад нежелательных эффектов трансформации плавленого кварца в итоговый фазовый набег записываемых структур. Устраняя данные трансформации, можно уменьшить рассеяние и повысить эффективность создаваемых оптических элементов.

Благодарность

Исследование было проведено в рамках Госзадания №FSFN-2024-0018.

Список источников

- [1] Wang, X.-J. Laser Writing of Color Centers / X.-J. Wang, H.-H. Fang, F.-W. Sun, H.-B. Sun // Laser Photonics Reviews. — 2022. — Vol 16. — P. 2100029.

- [2] **Wang, P.** Functionalized polymer nanofibers: a versatile platform for manipulating light at the nanoscale / P. Wang, Y. Wang, L. Tong // *Light: Science & Applications*. — 2013. — Vol 2. — P. e102.
- [3] **Pelucchi, E.** The potential and global outlook of integrated photonics for quantum technologies / E. Pelucchi, G. Fagas, I. Aharonovich, D. Englund, E. Figueroa, Q. Gong, H. Hannes, J. Liu, C.-Y. Lu, N. Matsuda, J.-W. Pan, F. Schreck, F. Sciarrino, C. Silberhorn, J. Wang, K. D. Jöns // *Nature Reviews Physics*. — 2022. — Vol 4. — P. 194–208.
- [4] **Гулина, Ю.С.** Взаимосвязь параметров двулучепреломления и иерархической пространственной структуры микротреков, записанных в объеме плавленого кварца ультракороткими лазерными импульсами / Ю. С. Гулина, А. Е. Рупасов, Г. К. Красин, Н. И. Буслеев, И. В. Гриценко, А. В. Богацкая, С. И. Кудряшов // *Письма в ЖЭТФ*. — 2024. — Том 119. — № 9. — С. 638–644.

Technology for creating optical lenses in the bulk of quartz glass using femtosecond laser writing

G. K. Krasin¹, E. V. Kuzmin¹, M. S. Kovalev^{1,2}, S. I. Kudryashov^{1,2}

¹ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The technology for creating optical lenses in the bulk of fused silica using femtosecond laser writing technology has been demonstrated. The focusing effect is achieved due to the formation in the bulk of fused silica of periodic lines consisting of birefringent microtracks with a controlled phase shift. By varying the parameters of the experimental setup, it is possible to control not only the physical dimensions of the recorded optical elements, but also the depth of phase modulation, which in the future will allow to replace existing massive lenses with their flat counterparts.

Keywords: Direct laser writing, Microstructuring, Optical elements, Birefringent microtracks

Воздействие на алмаз ультракоротких лазерных импульсов с длинами волн, соответствующими пику его собственного поглощения

П. П. Пахольчук¹, Н. А. Смирнов¹, Н. И. Буслеев¹, А. В. Горевой¹, П. А. Данилов¹, В. Г. Винс², С. И. Кудряшов¹

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² ООО «ВЕЛМАН», Новосибирск, Россия

С появлением мощных лазерных источников среднего ИК-диапазона (2–9 мкм) появилась возможность резонансно и многофотонным образом возбуждать отдельные молекулы, примесные центры в веществе, что можно использовать и по отношению к алмазу. В данной работе красный алмаз, синтезированный при высоком давлении и высокой температуре (НРНТ), подвергался воздействию лазерных ультракоротких импульсов (200 фс) с длиной волны, соответствующей пику собственного поглощения алмаза. Полученные структуры были охарактеризованы методами оптической трансмиссионной микроспектроскопии, динамической и стационарной 3D-конфокальной фотолюминесцентной (ФЛ) микроспектроскопии при комнатной температуре, ИК-Фурье-микроспектроскопии.

Ключевые слова: Алмаз, Ультракороткие лазерные импульсы, Средний ИК, Лазерная модификация алмаза, Спектроскопия алмаза

Введение

Лазерные системы фемтосекундных импульсов зарекомендовали себя в качестве эффективного инструмента для обработки поверхности [1] и объема [2, 3] различных твердых материалов. Несмотря на интенсивное развитие данной области, исследования остаются ограничены видимой и ближней ИК областью спектра. В последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в разработке лазерных систем, позволяющих получать мощные фемтосекундные импульсы среднего ИК диапазона с возможностью перестройки длин волн [4]. Такие системы дают возможность проводить резонансное и многофотонное воздействие на материалы, содержащие фундаментальные колебательные резонансы в средней ИК области спектра. К таким материалам относятся и алмаз [5].

Экспериментальная часть

В данной работе в качестве образца использовался алмаз красного цвета типа Ib, полученный методом НРНТ, подвергнутый облучению электронным пучком (3 МэВ, $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$) с последующим отжигом в течение 30 минут при температуре 1200 °С. Для накачки оптического параметрического усилителя использовался фемтосекундный лазер ТЕТА (Avesta, Россия, $\lambda=1030 \text{ нм}$). Пучок короткой длины волны смешивался с остаточным пучком накачки в кристалле AgGaS_2 для генерации

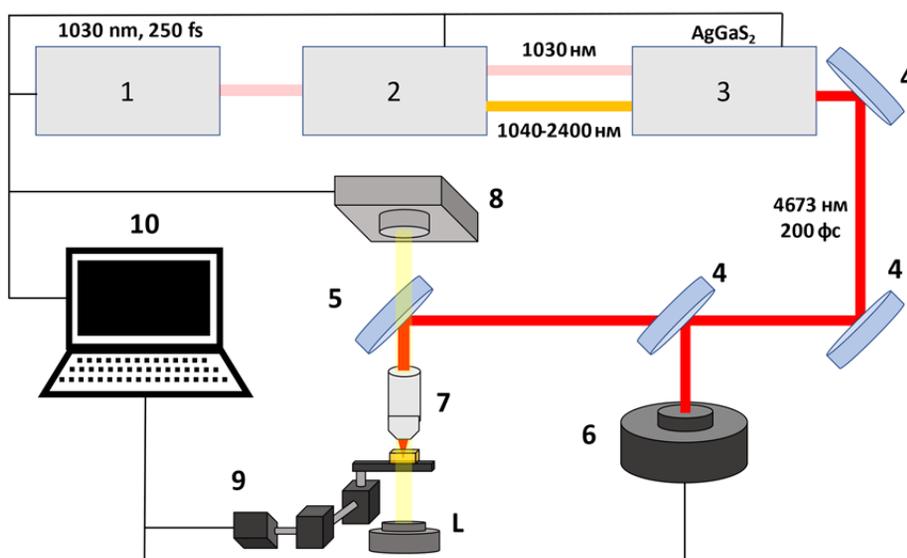


Рис. 1. Экспериментальная схема:

1 — Лазер ТЕТА; 2 — оптический параметрический усилитель; 3 — генератор разностной частоты; 4 — откидное зеркало; 5 — полупрозрачное зеркало; 6 — измеритель мощности; 7 — зеркальный объектив; 8 — ПЗС камера; 9 — моторизованная трехкоординатная платформа; 10 — компьютер

разностной частоты с длиной волны 4673 нм с длительностью 200 фс и частотой следования импульсов 10 кГц. Излучение фокусировалось зеркальным объективом (Edmund Optics) с числовой апертурой $NA = 0,5$ на глубину 240 мкм. На рисунке 1 приведена экспериментальная схема. Плотность энергии, сфокусированная в образец, составляла 0,39, 0,64, 0,88, 1,10, 1,26, 1,48 и 1,65 Дж/см². Экспозиция облучения составляла 1, 10, 30, 60, 120, 240 с. Также для анализа спектра пропускания полученных структур в ИК области спектра была облучена область размером 200×200 мм² в четыре слоя при максимальной плотности энергии 1,65 Дж/см².

Результаты и обсуждение

Облученная область 200×200 мм² была охарактеризована с помощью ИК Фурье спектроскопии. В области С дефектов (одиночная замещающая примесь азота) наблюдалась неоднородная структура алмаза, но в области модификации изменений не было обнаружено. При этом были найдены изменения в следующих областях спектра: 1450 см⁻¹ (центр Н1а), 1354 см⁻¹, 1840 см⁻¹, 1902 см⁻¹.

Записанная матрица была проанализирована на конфокальном микроскопе в режиме на просвет в видимой области спектра. Было обнаружено уменьшение пропускания в области 420–450 нм и увеличение пропускания в области 490–650 нм. Модифицированные области обесцвечиваются.

Также полученные матрицы были охарактеризованы люминесцентной спектроскопией. Наблюдалось снижение люминесценции в области центров NV⁰ и NV⁻ при возбуждении 532 нм. При возбуждении 405 нм наблюдалось увеличение интенсивности в области 480–520 нм.

Заключение

В данной работе мы облучили ультракороткими лазерными импульсами среднего ИК диапазона в области собственного поглощения алмаз, полученный методом НРПТ, предварительно облученный электронным пучком и отожженный. Полученные структуры были охарактеризованы методами ИК Фурье спектроскопии, спектроскопии поглощения в видимом диапазоне и люминесцентной спектроскопии.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30063).

Список источников

- [1] Liu, H. Selforganized periodic microholes array formation on aluminum surface via femtosecond laser ablation induced incubation effect / H. Liu, Z. Lin, L. Ji, M. Hong // *Advanced Functional Materials*. — 2019. — Vol 29. — № 42. — P. 1903576. — DOI: 10.1002/adfm.201903576.
- [2] Jia, Y. C. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: Fabrication and application / Y. C. Jia, S. X. Wang, F. Chen // *Opto-Electronic Advances*. — 2020. — Vol 3. — № 10. — P. 190042-1-190042-12. — DOI: 10.29026/oea.2020.190042.
- [3] Danilov, P. A. Laser-induced luminescent centers in diamond: Influence of exposure and duration of short laser pulses / P. A. Danilov, S. I. Kudryashov, A. O. Levchenko, E. A. Oleynichuk, O. E. Kovalchuk // *Optics and Spectroscopy*. — 2023. — Vol 131. — № 9. — P. 790–794. — DOI: 10.1134/S0030400X23070020
- [4] Liang, H. High-energy mid-infrared sub-cycle pulse synthesis from a parametric amplifier / H. Liang, P. Krogen, Z. Wang, H. Park, T. Kroh, K. Zawilski, P. Schunemann, J. Moses, L. F. DiMauro, F. X. Kartner, and K.-H. Hong // *Nature Communications*. — 2017. — Vol 8. — № 1. — P. 141. — DOI: 10.1038/s41467-017-00193-4.
- [5] Zaitsev, A. M. Optical properties of diamond: a data handbook / A. M. Zaitsev — Springer Science & Business Media, 2013. — 502 p.

The effect of ultrashort laser pulses on diamond at wavelengths corresponding to the peaks of its own absorption

P. P. Pakholchuk, N. A. Smirnov, N. I. Busleev, A. V. Gorevoy, P. A. Danilov, V. G. Vins, S. I. Kudryashov

1 Levedev Physical Institute, Moscow, Russia

2 LLC VELMAN, Novosibirsk, Russia

With the advent of powerful laser sources in the mid-infrared range (2-9 μm), it has become possible to resonantly and multiphotonically excite individual molecules and impurity centres in matter, which can be used in relation to diamond. In this work, red diamond synthesised at high pressure and high temperature (HPHT) was exposed to ultrashort laser pulses (200 fs) with a wavelength corresponding to the peak of diamond intrinsic absorption. The obtained structures were characterised by optical transmission microspectroscopy, dynamic and steady-state 3D-confocal photoluminescence (PL) microspectroscopy at room temperature, and FT-IR microspectroscopy.

Keywords: *Diamond, Ultrashort laser pulses, Mid-IR, Laser modification of diamond, Diamond spectroscopy*

Дифракционная решетка Pd/PdO как сенсорный элемент на водород

А. В. Шелаев¹, Д. П. Куликова¹, А. В. Барышев¹

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

Представлен метод лазерного окисления палладиевых нанопленок для быстрого создания наноструктур Pd/PdO. Анализируются оптические отклики изготовленных наноструктур — дифракционных решеток из чередующихся областей палладия и оксида палладия для обнаружения водорода. Взаимодействие с водородом приводит к восстановлению оксида палладия, что влияет на физические и химические свойства наноструктур. Учитывая каталитическую роль палладия, который ускоряет автокаталитическую реакцию, демонстрируются оптимальные структурные параметры для достижения лучшей чувствительности наноструктур. Исследовано влияние влажности и концентраций газов в атмосфере на отклик такого сенсорного элемента.

Ключевые слова: Оптические сенсоры, Лазерная литография, Дифракционные оптические элементы

Широкое распространение водородной энергетики требует производства дешевых и высокоточных сенсоров на H₂, чтобы обнаруживать утечки, а также, чтобы избежать возможного вредного воздействия высоких концентраций водорода. Оптические датчики безопасны по сравнению с электрическими, так как не имеют электрических контактов и исключают появление искр, что в водородсодержащей атмосфере может привести к разрушительным последствиям. Известно, что PdO восстанавливается водородом, но времена отклика длительны и чувствительность к водороду в воздухе невелика (единицы объемных процентов). Таким образом, требуется найти способы повышения скорости и величины отклика, а также увеличения чувствительности к водороду.

Известно, что эффект каталитического разложения молекулярного водорода на атомарный на поверхности Pd приводит к значительному повышению чувствительности и росту скорости реакции восстановления PdO [1]. Таким образом, сформированные фемтосекундным лазером чередующиеся структуры из Pd и PdO позволяют значительно ускорить отклик. В нашей работе предложено для формирования PdO на поверхности 30 нм пленки Pd использовать сфокусированный пучок импульсного 80 МГц лазера с длиной волны 525 нм и средней мощностью 56 мВт, который в воздушной атмосфере нагревал Pd до температуры более 400 °С, что приводило к локальному окислению. Двигаясь по заданной траектории лазер «записывал» периодические полосы из PdO на поверхности Pd. Ширина полос PdO и Pd составляла по 5 мкм, образуя таким образом периодическую структуру площадью 3×3 мм. Присутствие PdO в окисленных областях подтверждалось с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния и детектирования типичного для PdO пика на 641 см⁻¹.

Для детектирования оптического отклика на водород использовался лазер с длиной волны 633 нм. Для повышения амплитуды отклика предложено использовать структурированную нанопленку с периодом 10 мкм в качестве дифракционной решетки. Сенсорный элемент устанавливался под углом, так чтобы дифрагированное излучение первого дифракционного порядка распространялось обратно вдоль оптической оси. Интенсивность отраженного света измерялась при воздействии различных концентраций H₂ в синтетическом воздухе. Для концентрации 0,5 об. % H₂ в воздухе время отклика составило 2 минуты. Также исследовались влияние влажности и концентрации кислорода на скорость отклика.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Shelaev, A. V. Periodically structured Pd/PdO nanofilm as laser-written optical sensing element for hydrogen detection / A.V. Shelaev, D.P. Kulikova, A.Sh. Amiraslanov, A.S. Baburin, I.A. Rodionov, A.V. Baryshev // Nano-Structures & Nano-Objects. — 2024. — Vol 39. — P. 101234.

Diffraction Grating Pd/PdO as a Hydrogen Sensing Element

A. V. Shelaev¹, D. P. Kulikova¹, A. V. Baryshev¹

¹ Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

A method for laser oxidation of palladium nanofilms for the rapid creation of Pd/PdO nanostructures is presented. The optical responses of the fabricated nanostructures—diffraction gratings composed of alternating regions of palladium and palladium oxide—are analyzed for hydrogen detection. Interaction with hydrogen leads to the reduction of palladium oxide, affecting the physical and chemical properties of the nanostructures. Considering the catalytic role of palladium, which accelerates the autocatalytic reaction, we demonstrate optimal structural parameters to achieve the best sensitivity of the nanostructures. The influence of humidity and gas concentrations in the atmosphere on the response of such a sensor element is also investigated.

Keywords: Optical sensors, Laser lithography, Diffraction optical elements

Экспресс-формирование ГКР-активных слоев для фотонной сенсорики

С.В. Дубков¹, Д.В. Новиков¹, А.И. Новосельцев¹, Е.А. Лебедев¹, А.М. Тарасов¹, Г.А. Меденков¹, Ю.В. Чумаченко¹, Л.С. Волкова^{1,2}, Т.С. Гришин^{1,2}, В.Д. Громов¹, С.А. Гаврилов¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия

² Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, Москва, Россия

ГКР-подложки для фотонной сенсорики являются высокочувствительным и быстрым инструментом обнаружения сверхмалых концентраций опасных примесей в таких областях как медицина, фармакология, экология, пищевая и химическая промышленности. Основной проблемой для таких подложек выступает загрязнение поверхности адсорбируемыми веществами, а также постепенное окисление массивов плазмонных наночастиц, являющихся ключевым функциональным элементом, под действием атмосферы. Перспективным путем решения данных проблем выступает применение тонких многокомпонентных и высокоэнергетических пленок, активация которых энергетическим воздействием приводит к очистке поверхности от адсорбированных загрязнений и одновременному формированию на ней массива плазмонных наночастиц. В данной работе мы исследовали возможность экспрессной активации подобных многокомпонентных тонких пленок, а также их применения в качестве ГКР-подложек для фотонной сенсорики.

Ключевые слова: ГКР-спектроскопия, Фотонная сенсорики, Экспресс-формирование, Тонкие пленки, Наночастицы

В данной работе исследовались возможности экспресс-активации тонких многокомпонентных пленок Ag-Nb-N-O и Ag-Mo-N-O, а также многослойной тонкой пленки Al/CuO_x для получения массивов ГКР-активных наночастиц. Как показано на рисунке 1, после формирования и активации на ГКР-подложку капельным методом наносились растворы малахитового зеленого (MG) и Родамина 6G (R6G) различной концентрации. ГКР-активность образцов исследовалась на спектрометре комбинационного рассеяния Confotec MR200 при использовании лазеров 532 нм 44 мВт для пленок Ag-Nb-N-O и Ag-Mo-N-O, а также 633 30 мВт для пленок Al/CuO_x, объектива 40×, времени съемки 1 секунда и охлаждении матрицы детектора до -20 °С.

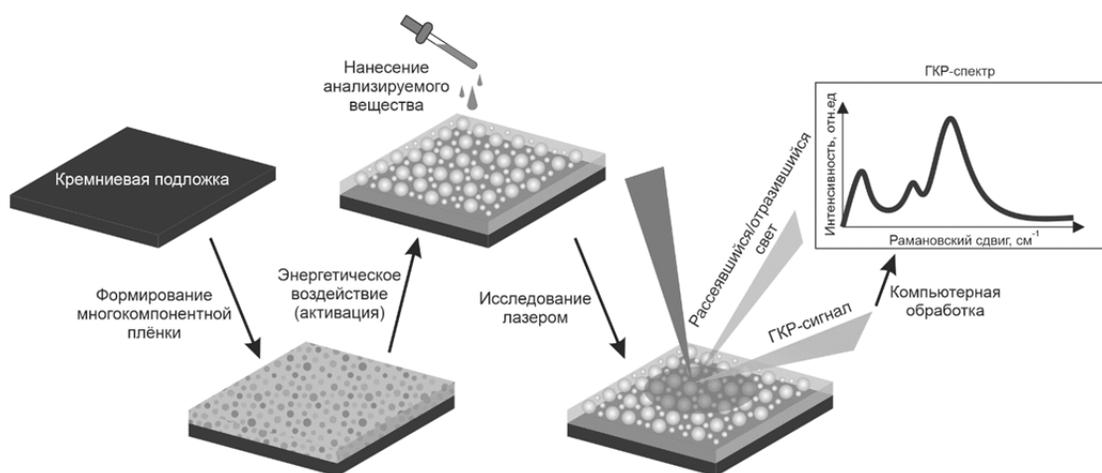


Рис. 1. Схема применения ГКР-подложек на основе тонких многокомпонентных пленок

Тонкая многокомпонентная пленка Ag-Nb-N-O формировалась одновременным магнетронным распылением мишеней Ag и Nb в среде Ar/N₂. Тонкая многокомпонентная пленка Ag-Mo-N-O формировалась ионно-плазменным распылением комбинированной мишени Mo/Ag в среде Ar/N₂. Многослойная тонкая пленка Al/CuO_x формировалась поочередным магнетронным распылением мишеней Al и CuO_x в среде Ar.

Экспресс-активация тонких пленок производилась различными методами. Для тонких пленок Ag-Nb-N-O применялись активации СВЧ-излучением при мощности 800 Вт в течение 15 секунд, термическим отжигом в муфельной печи при температуре 400 °С в течение 10 минут, а также саморазогревом от пропускания через тонкую пленку электрического тока порядка 300 мА. Различные методы активации позволили исследовать разницу в параметрах получаемых массивов наночастиц (рис. 2). Средний диаметр частиц и расстояние между ними составили ~250 нм и ~70 нм при воздействии СВЧ-излучением, ~300 нм и ~320 нм при термическом отжиге, ~160 нм и ~140 нм при

пропускании тока соответственно. При этом наиболее плотный массив был получен при СВЧ-активации (рис. 2а).

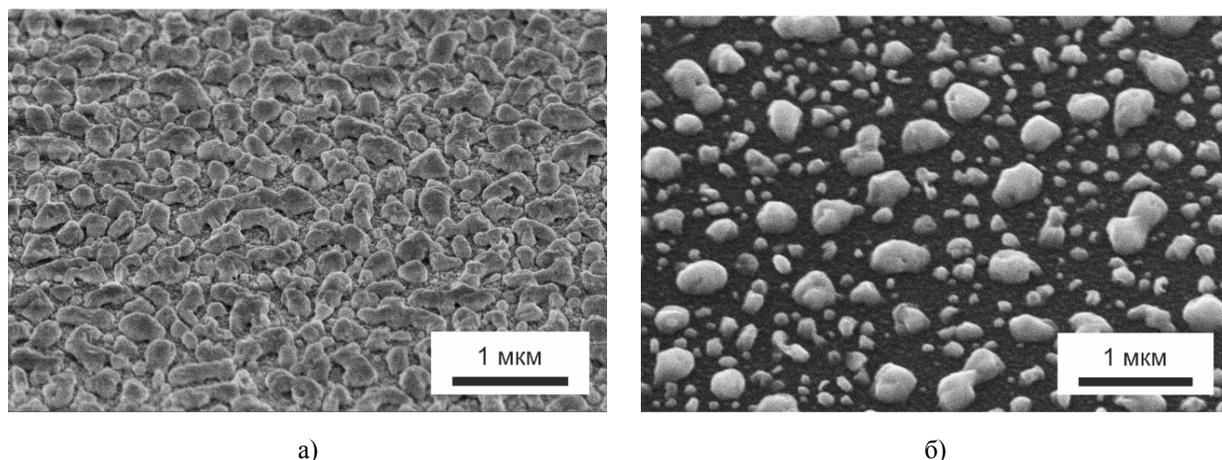


Рис. 2. Морфология массива наночастиц на тонкой пленке Ag-Nb-N-O в зависимости от метода экспресс-активации:

а) массив наночастиц после воздействия СВЧ-излучением; б) массив наночастиц после воздействия током

Тонкая пленка Ag-Mo-N-O активировалась термическим отжигом в муфельной печи при температуре 400 °С в течение 10 минут. В результате были получены массивы частиц со средним диаметром частиц и расстоянием между ними порядка 600 нм и 480 нм соответственно. Приведенные значения параметров наночастиц показали, что различные методы энергетического воздействия позволяют значительно управлять геометрией массивов металлических частиц.

Отдельно стоит заметить, что после формирования независимо от внешних условий Ag-Nb-N-O выделяет на поверхность разреженный массив наночастиц (рис. 3а), средний диаметр частиц и расстояние между которыми могут достигать ~160 нм и ~460 нм соответственно. В то же время Ag-Mo-N-O не демонстрирует подобных изменений, оставаясь стабильным во времени.

Тонкая многослойная пленка Al/CuO_x активировалась самораспространяющейся экзотермической реакцией между слоями тонкой пленки за счет кратковременного воздействия электрическим импульсом от пьезоэлектрического элемента. В результате были получены массивы наночастиц с наибольшими показателями среднего диаметра и расстояниями между частицами, которые составили ~1000 нм и ~2070 нм соответственно. При этом более половины площади занимает объемная сетка Al₂O₃ с вкраплениями микрочастиц Cu (рис. 3б).

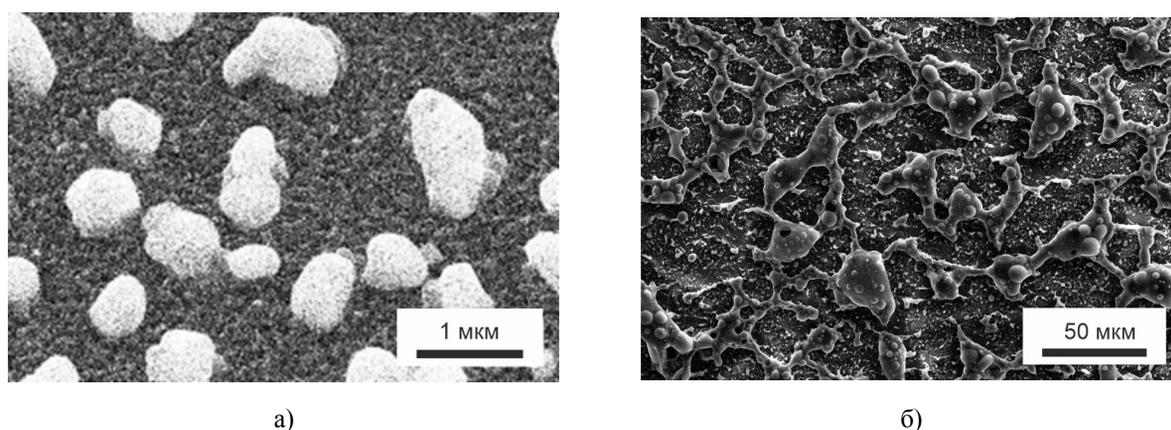


Рис. 3. Морфология массива наночастиц на тонкой пленке Ag-Mo-N-O и Al/CuO, полученные различными методами активации:

а) массив наночастиц активированной пленки Ag-Mo-N-O, полученный термическим отжигом; б) массив наночастиц активированной пленки Al/CuO_x, полученный за счет экзотермической реакции

Исследование морфологии массивов наночастиц на поверхности экспресс-активированных тонких пленок позволило установить, что наилучшими параметрами с точки зрения ГКР-активности обладают тонкие пленки на основе Ag-Nb-N-O. Исследование ГКР-активности Ag-Nb-N-O проде-

монстрировало коэффициенты усиления порядка 2×10^6 , 10^5 и 5×10^5 для СВЧ-излучения, термического отжига и пропускания тока, соответственно. Коэффициенты усиления тонких пленок Ag-Nb-N-O и Al/CuO_x составили 4×10^5 и 10^5 , что является неплохим результатом при достаточно сильной разреженности массивов наночастиц. Отдельно стоит уточнить, что крупные вкрапления наночастиц Cu с размером более 2 мкм на активированной тонкой пленке Al/CuO_x не проявляли ГКР-активности.

Таким образом, в работе демонстрируется возможность экспресс-формирования массивов наночастиц различными методами на различных по составу и методу получения тонких пленках.

Благодарность

Исследования тонких многокомпонентных пленок были выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00610. Исследования тонких многослойных пленок были выполнены в рамках государственного задания 2024-2026 FSMR-2024-0012 Дополнительное соглашение №075-03-2024-061/3 от 15.04.2024.

Express formation of SERS - active layers for photonic sensing

S.V. Dubkov¹, D.V. Novikov¹, A.I. Novoseltsev¹, E.A. Lebedev¹, A.M. Tarasov¹, G.A. Medenkov¹, Yu.V. Chumachenko¹, L.S. Volkova^{1,2}, T.S. Grishin^{1,2}, V.D. Gromov¹, S.A. Gavrilov¹

¹National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", Moscow, Zelenograd, Russia

²Institute of Microelectronics Nanotechnologies, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SERS substrates for photonic sensing are a highly sensitive and fast tool for detecting ultra-low concentrations of hazardous impurities in such areas as medicine, pharmacology, ecology, food and chemical industries. The main problem for such substrates is surface contamination with adsorbed substances, as well as the gradual oxidation of arrays of plasmonic nanoparticles, which are a key functional element, under the influence of the atmosphere. A promising way to solve these problems is the use of thin multicomponent and high energy films, the activation of which by energy leads to the cleaning of the surface from adsorbed contaminants and the simultaneous formation of an array of plasmonic nanoparticles on it. In this work, we investigated the possibility of rapid activation of such multicomponent thin films, as well as their use as SERS substrates for photonic sensing.

Keywords: SERS, Photon sensing, Express formation, Thin films, Nanoparticles

Прямое лазерное интерференционное паттернирование нанорешеток 2D-дихалькогенидов переходных металлов (TMD)

А. О. Калганова¹, А. В. Аверченко¹, О. А. Аббас¹, И. А. Салимон¹, Е. В. Жаркова¹, Д. В. Красников¹, С. Маилис¹, П. Г. Лагудакис¹

¹ Центр Фотоники и Фотонных технологий, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

В данной работе представлен метод лазерного синтеза наноструктурированных двумерных дихалькогенидов переходных металлов (MoS_2 и WS_2) из жидких однокомпонентных прекурсоров. Процесс включает в себя предварительное нанесение рисунка на пленку прекурсора с использованием прямого интерференционного лазерного облучения в условиях окружающей среды, с последующим термическим разложением, с помощью повторного высокоинтенсивного лазерного облучения, либо посредством высокотемпературного отжига в печи. Данный подход позволил синтезировать поликристаллические периодические структуры с большим характеристическим соотношением (ширина ~ 90 нм и длина ~ 400 мкм) на подложках Si/SiO_2 и $LiNbO_3$.

Ключевые слова: 2D-дихалькогениды переходных металлов, Дифракционные решетки, Прямое лазерное интерференционное паттернирование

Исследование микроstructuring двумерных дихалькогенидов переходных металлов (TMD) привлекло значительное внимание научного сообщества в связи с его важностью для разработки функциональных устройств с определенными характеристиками. Однако производство микроstructuring TMD сопровождается трудностями, связанными с требованием особых температурных и атмосферных условий для синтеза, а также с рисками повреждения и загрязнения материала в процессе последующей обработки.

Локализованное лазерное облучение жидких однокомпонентных прекурсоров ($[(NH_4)_2MoS_4]$, $[(NH_4)_2WS_4]$, растворенных в органических растворителях) позволяет получать MoS_2 , WS_2 , их сплавы и гетероструктуры в условиях окружающей среды непосредственно на требуемой подложке [1, 2]. Лазерное воздействие на исходную пленку прекурсора вызывает процесс термической диссоциации и приводит к синтезу TMD на облученных участках. Химическое отличие облученных регионов от исходного прекурсора делает их устойчивыми к воздействию органических растворителей, что позволяет избирательно удалять необработанную пленку и получать микроstructuring TMD фотолитографическим способом. Тем не менее, прямой лазерный синтез накладывает ограничения на одновременную оптимизацию качества материала и точности нанесения рисунка, что во многом связано с неоднородностью синтезируемого материала по толщине и кристалличности, вызванной гауссовым профилем интенсивности лазерного луча.

Продукты термического разложения тиосолей Mo и W зависят от температуры отжига [3]. Так, пленки кристаллических MS_2 ($M = Mo, W$) могут быть получены при температурах, близких к $1000^\circ C$. Однако, воздействие температур в диапазоне от $155^\circ C$ до $450^\circ C$ приводит к формированию аморфных MS_2 и MS_3 , которые также устойчивы к различным органическим растворителям и могут быть трансформированы в соответствующее TMD соединение на более поздних стадиях путем дальнейшего повышения температуры.

Основываясь на вышеупомянутом синтезе определенного химического продукта за счет выбора температурного режима, предлагаем разделить этапы формирования структуры и синтеза в процессе изготовления TMD путем прямого лазерного облучения. Лазерное воздействие с интенсивностью, которая ниже диапазона, необходимого для синтеза кристаллических TMD, приводит к образованию MS_3 на облучаемых участках. Поскольку химический состав обработанных регионов отличается от исходного прекурсора, выборочное удаление пленки по-прежнему возможно, что позволяет получать более тонкие структуры с однородным профилем толщины. Впоследствии, преобразование предварительно нанесенного рисунка в материал TMD может быть завершено (а) путем повторного лазерного облучения с более высокой интенсивностью и площадью воздействия, которая значительно превышает площадь сформированных элементов, или (б) посредством высокотемпературного термического отжига в инертной атмосфере.

Для получения более тонких структур было применено интерферометрическое воздействие с высоким разрешением с использованием видимого (532 нм) или ультрафиолетового (244 нм) лазерных источников. В результате, на поверхности подложек Si/SiO_2 и $LiNbO_3$ были получены периодические структуры с периодом ~ 150 нм и высоким характеристическим соотношением (ширина ~ 90 нм, длина ~ 400 мкм). СЭМ изображения решеток MoS_2 and WS_2 после проведения этапа синтеза и соответствующие им спектры КР представлены на рис. 1а и б. ТЭМ и ЭРС-анализ синтезированной структуры показали получение поликристаллических периодических полос толщиной $\sim 2,5$ нм и средним размером зерен ~ 25 нм без какого-либо материала в промежуточной области между полосами.

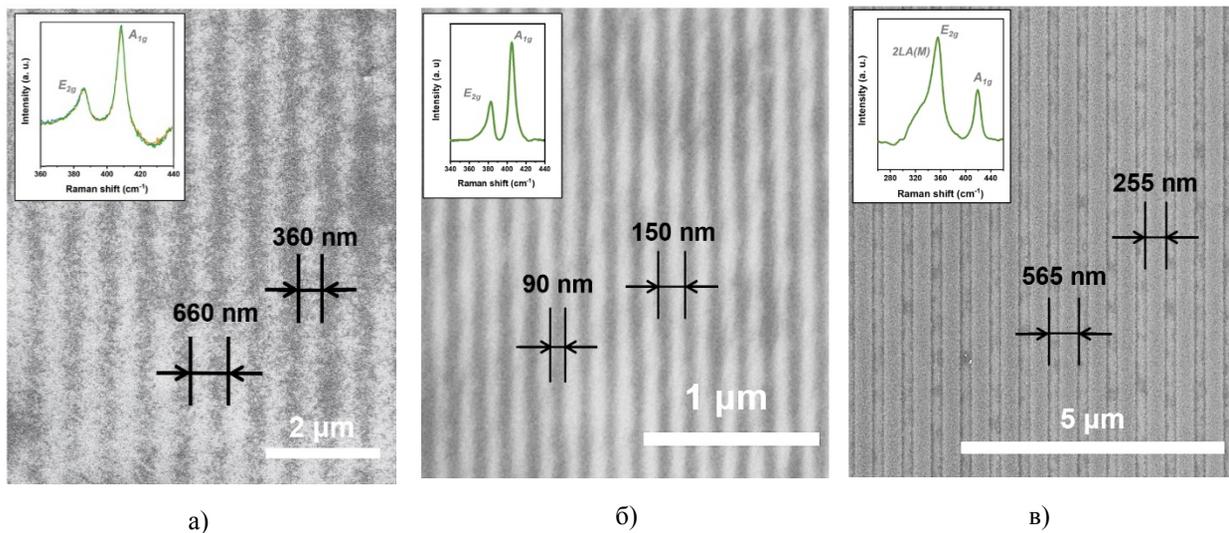


Рис. 1. СЭМ изображения решеток TMD и соответствующие им спектры КР:

а) решетка MoS₂ на подложке LiNbO₃; б) решетка MoS₂ на подложке Si/SiO₂; в) решетка WS₂ на подложке Si/SiO₂

Представленное разделение традиционного процесса лазерного синтеза на этапы структурирования и синтеза продемонстрировало возможность изолированной оптимизации каждого этапа, что позволяет контролировать характеристическое соотношение структур. Полученные решетки из TMD материалов подходят для оптического и химического зондирования, а также для дифракционных (линейных/нелинейных) компонентов в интегрированных фотонных устройствах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Abbas, O. A.** Laser printed two-dimensional transition metal dichalcogenides / A. O. Abbas, A. H. Lewis, N. Aspiotis, C. Huang, I. Zeimpekis, D. Hewak, P. Sazio, S. Mailis // *Scientific Reports*. — 2021. — Vol 11. — № 1. — P. 5211. — DOI: 10.1038/s41598-021-81829-w.
- [2] **Averchenko, A. V.** Laser-enabled localized synthesis of Mo_{1-x}W_xS₂ alloys with tunable composition / A. V. Averchenko, I. A. Salimon, E. V. Zharkova, S. Lipovskikh, P. Somov, O. A. Abbas, P. G. Lagoudakis, S. Mailis // *Materials Today Advances*. — 2023. — Vol 17. — P. 100351. — DOI: 10.1016/j.mtadv.2023.100351.
- [3] **Sang, X.** Atomic insight into thermolysis-driven growth of 2D MoS₂ / X. Sang, X. Li, A. A. Puretzky, D. B. Geohegan, K. Xiao, R. R. Unocic // *Advanced Functional Materials*. — 2019. — Vol 29. — № 52. — P. 1902149. — DOI: 10.1002/adfm.201902149.

Direct laser interference patterning of 2D transition metal dichalcogenide (TMD) nanoribbons

A. O. Kalganova¹, A. V. Averchenko¹, O. A. Abbas¹, I. A. Salimon¹, E. V. Zharkova¹, D. V. Krasnikov¹, S. Mailis¹, P. G. Lagoudakis¹

¹ Center for Photonic Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

Here, we present high resolution, laser-mediated nano-structured synthesis of functional 2D transition metal dichalcogenides (MoS₂ and WS₂) from single source precursors. This involves pre-patterning of the precursor by direct interferometric laser exposure in ambient conditions followed by a thermolysis step, which can be implemented by either post laser irradiation or thermal decomposition in a furnace. The synthesis of polycrystalline periodical structures with large aspect ratios (width ~90 nm, and length ~400 nm) onto SiO₂/Si and LiNbO₃ substrates is demonstrated.

Keywords: 2D transition metal dichalcogenides, Diffraction gratings, Direct laser interference patterning

Лазерная микро- и нанофабрикация — от гибридных материалов до защитных меток

Э. И. Агеев, А. О. Ларин, П. Н. Кустов, В. В. Ярошенко, Д. А. Зуев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены работы по лазерно-индуцированному созданию различных функциональных микро- и наноструктур, таких как источники широкополосного излучения на основе золото-кремниевых наночастиц, некоторые варианты защитных меток и др. Рассмотрены принципы их создания на основе лазерной печати и прямой лазерной записи, а также представлены результаты характеристики их оптических свойств.

Ключевые слова: *Защитный метки, Широкополосная фотолюминесценция, Лазерная печать, Гибридная нанофотоника*

Технологический прогресс современных устройств стремится к миниатюризации используемых систем и переходу от операций с электрическими сигналами к оптическим [1, 2], поскольку электронные устройства обработки информации достигли своих фундаментальных пределов [3]. Это привело к созданию концепции фотонно-интегральных схем (ФИС), представляющих собой многокомпонентное фотонное устройство на единой подложке [4]. Путь от электронного чипа к оптическому состоит в поэтапной замене электрических компонент на оптические аналоги для достижения рекордных значений скорости обработки и передачи информации.

Сейчас создание оптических систем для ФИС невозможно без применения методов литографии, которые являются сложными, дорогостоящими и многостадийными. Успехи последних лет в области лазерно-индуцированных методов создания наноструктур показали возможность создания пассивных и активных компонент ФИС на основе материалов, совместимых с комплементарными системами типа металл-оксид-полупроводник. Особый интерес связан с использованием фемтосекундных источников лазерного излучения для реализации неравновесных термодинамических процессов при формировании оптических устройств на основе кремния и золота как в комбинации, так и по отдельности.

В настоящем докладе представлены работы по лазерно-индуцированному созданию гибридных металл-полупроводниковых функциональных микро- и наноструктур, таких как источники широкополосного излучения на основе золото-кремниевых наночастиц, полученных с помощью лазерной печати или прямой лазерной записи. В первом случае, могут быть получены золотые нанотрубки (диаметром 40–300 нм) [5], поры которых заполнены кремнием, во втором случае создаваемая микроструктура представляет собой кремниевую полусферу с характерным размером ~1 мкм, покрытую сеткой наночастиц золота диаметром 20–40 нм [6]. Обе гибридные наносистемы демонстрируют широкополосную фотолюминесценцию в диапазоне 400–900 нм.

В качестве еще одного направления использования миниатюрных фотонных систем можно выделить нанофотонные защитные метки, среди которых наиболее перспективными, в настоящее время, являются физически неклонируемые защитные метки (physically unclonable functions, PUF), которые в отличие от традиционных методов, основанных на хранении секретных ключей, используют уникальные и непредсказуемые физические вариации, возникающие в процессе производства. С помощью фемтосекундной лазерной печати могут быть получены PUF метки на основе диэлектрических кремниевых наночастиц на стеклянной и полипропиленовой подложках [7, 8]. Неклонированность данных меток заключается в пространственном распределении наночастиц на подложке, их резонансных оптических свойствах, таких как комбинационное и темнопольное рассеяние. Более того, с помощью предлагаемого способа лазерно-индуцированной печати могут быть созданы массивы наночастиц, организованные в произвольные символы и изображения.

Список источников

- [1] **Girtan, M.** Is photonics the new electronics? / M. Girtan // *Materials Today*. — 2014. — Vol 17. — № 3. — P. 100–101.
- [2] **Cheng, J.** Photonic matrix computing: from fundamentals to applications / J. Cheng, H. Zhou, J. Dong // *Nanomaterials*. — 2021. — Vol 11. — № 7. — P. 1683.
- [3] **Shalf J.** The future of computing beyond Moore's Law / J. Shalf // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2020. — Vol 378. — № 2166. — P. 20190061.
- [4] **Karabchevsky A.** On-chip nanophotonics and future challenges / A. Karabchevsky, A. Katiyi, A. S. Ang, A. Hazan // *Nanophotonics*. — 2020. — Vol 9. — № 12. — P. 3733–3753.
- [5] **Larin A.** Plasmonic nanosponges filled with silicon for enhanced white light emission / A.O. Larin, A. Nominé, E.I. Ageev, J. Ghanbaja, L.N. Kolotova, S.V. Starikov, S. Bruyère, T. Belmonte, S.V. Makarov, D.A. Zuev // *Nanoscale*. — 2020. — T. 12. — № 2. — C. 1013–1021.

- [6] **Ageev E.** Internal structure and quantum efficiency of hybrid metal-dielectric nanoparticles fabricated by femtosecond laser exposure of bi-layer film / E.I. Ageev, S.V. Koromylov, M.A. Gremilov, V.A. Gulinian, D.A. Zuev // Nanophotonics and Micro/Nano Optics IX. — SPIE, 2023. — C. 68–73.
- [7] **Kustov P.** Mie-Resonant Silicon Nanoparticles for Physically Unclonable Anti-Counterfeiting Labels / P. Kustov, E. Petrova, M. Nazarov, A. Gilmullin, M. Sandomirskii, E. Ponkratova, V. Yaroshenko, E. Ageev, D. Zuev // ACS Applied Nano Materials. — 2022. — T. 5. — № 8. — C. 10548–10559.
- [8] **Kustov P.** All-dielectric silicon nanoparticles on flexible substrate for anticounterfeiting labels / Kustov P., Petrova E., Sandomirskii M., Zuev D. // 2022 Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). — IEEE, 2022. — P. 244–246.

Laser micro and nanofabrication - from hybrid materials to security labels

E. I. Ageev, A. O. Larin, P. N. Kustov, V. V. Yaroshenko, D. A. Zuev

ITMO University, St.Petersburg, Russia

The report presents works on laser-induced creation of various functional micro- and nanostructures, such as broadband radiation sources based on gold-silicon nanoparticles, some variants of security labels, and others. The principles of their creation based on laser printing and direct laser recording are considered, and the results of characterization of their optical properties are presented.

Keywords: Security labels, Broadband photoluminescence, Laser printing, Hybrid nanophotonics

Исследование динамики делительной машины маятникового типа с учетом влияния бицилиндрической геометрии формующей рабочей кромки алмазного резца

В. М. Бородин¹, А. И. Карпов¹, В. А. Кренев¹, А. В. Лукин², А. Н. Мельников²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия;

²АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия

В докладе обсуждаются результаты исследования динамики делительной машины маятникового типа с учетом влияния бицилиндрической геометрии формующей рабочей кромки алмазного резца, полученные на основе компьютерного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB/Simulink. Проведенное моделирование с учетом заданных допусков на основные параметры штриховых структур дифракционных оптических элементов, влияния внешних факторов, принятых допущений и особенностей нарезной технологии позволяет определить оптимальные (рациональные) значения конструктивных и динамических параметров делительной машины маятникового типа.

Ключевые слова: Делительная машина маятникового типа, Исследование динамики, Алмазный резец, Бицилиндрическая геометрия формующей рабочей кромки, Сила контактного взаимодействия, Штриховая структура, Геометрия штриха

Одной из ключевых проблем в технологии изготовления нарезных дифракционных оптических элементов-оригиналов (НДОЭ-оригиналов) — нарезных дифракционных решеток, синтезированных голограммных оптических элементов, измерительных решеток и т. п. является обеспечение повторяемости воспроизведения геометрии штриха по форме, глубине и периоду в пределах заданных допусков по всей площади нарезки [1, 2]. Эта проблема еще более усложняется для НДОЭ-оригиналов большой апертуры и НДОЭ-оригиналов, удлиненных вдоль одной координаты (при этом длина штриха лежит в пределах 10–20 мм), в частности, к последним можно отнести цилиндрические синтезированные голограммные оптические элементы (ЦСГОЭ) в виде узких и длинных элементов, которые могут применяться:

- для контроля формы крупноформатных асферических оптических поверхностей зеркал телескопов и линз объективов в их заданных сечениях [3, 4];
- для визуализации больших газодинамических полей в пределах контролируемых сечений;
- для контроля радиусов кривизны и формы сферических, цилиндрических и тороидальных (в меридиональном и сагиттальном сечениях) поверхностей [5, 6].

Дополнительно к вышеперечисленным примерам можно добавить предложения по изготовлению на крупногабаритных подложках с рабочей цилиндрической поверхностью [7, 8]:

- ЦСГОЭ-матриц для последующего реплицирования ЦСГОЭ-копий как элементов концентраторов солнечного излучения;
- нарезных дифракционных решеток-матриц для реплицирования «одноразовых» дифракционных решеток-копий для использования в компрессии-декомпрессии лазерного излучения.

Известно [1, 2, 9], что наряду с влиянием механических свойств и неоднородности тонкого металлического слоя, в котором формируются штрихи НДОЭ-оригиналов, формы, износоустойчивости и параметров юстировки специального алмазного резца, температурной нестабильности и виброфона на делительном участке, существенное влияние на процесс профилирования штрихов и обеспечение повторяемости воспроизведения геометрии штриха оказывает динамика резцовой (РК) и делительной кареток (ДК) делительной машины (ДМ). В связи с этим, исследование динамики РК и ДК ДМ является актуальной задачей. В настоящее время наряду с прямыми натурными (физическими) методами исследований динамики исполнительных устройств ДМ, например с применением автоколлимационных приборов и интерферометров различного вида, а также косвенными методами, основанными на исследовании изготовленных штриховых структур при помощи оптических, цифровых, лазерных конфокальных и атомно-силовых микроскопов, применяют компьютерное моделирование динамики РК и ДК, что значительно расширяет возможности проведения исследований, существенно ускоряет и удешевляет их. Основной задачей компьютерного моделирования динамики РК и ДК является поиск оптимальных (рациональных) значений конструктивных и динамических параметров РК и ДК, которые должны обеспечить повторяемость воспроизведения геометрии штриха в заданных допусках при воздействии внешних факторов.

Данный доклад является продолжением более ранних работ авторов по исследованию динамики делительной машины маятникового типа (ДММТ) [10–13], при этом в настоящей работе учитывается бицилиндрическая геометрия формующей рабочей кромки алмазного резца в описании силы контактного взаимодействия, возникающей между рабочей кромкой резца и тонким пластичным металлическим слоем, в котором формируются штрихи НДОЭ-оригиналов.

Приводятся результаты исследований, полученные с использованием пакета прикладных программ MATLAB/Simulink [14] и рекомендации по выбору оптимальных (рациональных) значений конструктивных и динамических параметров РК и ДК ДММТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Герасимов, Ф. М. Дифракционные решетки / Современные тенденции в технике спектроскопии / Ф. М. Герасимов, Э. А. Яковлев. — Новосибирск: Наука, 1982. — С. 24–94.
- [2] Hutley, M. C. Diffraction Gratings / M. C. Hutley. — London–New York: Academic Press, 1982. — 320 p.
- [3] Лукин, А. В. О возможности применения цилиндрических синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Прикладная оптика – 2022: XV Международная научная конференция: Сборник тезисов. — СПб.: Изд-во Скифия-принт, 2023. — С. 28–29.
- [4] Мельников, А. Н. Возможность применения цилиндрических осевых синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей / А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 9. — С. 45–54. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-09-45-54
- [5] Патент № 2746940 РФ. Голографическое устройство для измерения радиусов кривизны сферических поверхностей / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, В. И. Курт, А. И. Садрутдинов. — Заяв. 29.05.2020. — Оpubл. 22.04.2021.
- [6] Лукин, А. В. Голографическая поверочная установка на основе комплекта эталонных наборов в составе осевых синтезированных голограмм и основных пробных стекол / А. В. Лукин, В. И. Курт, А. Н. Мельников, А. И. Садрутдинов, А. А. Янковский // Оптический журнал. — 2021. — Том 88. — № 7. — С. 23–27. — DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-07-23-27
- [7] Мельников, А. Н. Возможности и перспективы организации промышленного выпуска высокоэффективных концентраторов солнечного излучения в виде матрицы тонких цилиндрических голограммных линз / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2021: XVIII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021 — С. 310–311.
- [8] Мельников, А. Н. Круговые и маятниковые делительные машины — универсальное средство изготовления с нанометрической точностью штриховых структур различного назначения для современного оптико-электронного приборостроения и оптической технологии / А. Н. Мельников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 341–346.
- [9] Федотов, А. И. Технология автоматизированного нанесения штрихов и знаков / А. И. Федотов. — Л.: Машиностроение, 1977. — 304 с.
- [10] Бородин, В. М. Исследование динамики резцовой каретки делительной машины маятникового типа / В. М. Бородин, А. И. Карпов, В. А. Кренив, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. — 2003. — № 3. — С. 11–16.
- [11] Мельников, А. Н. Делительная машина маятникового типа для механического формообразования периодических штриховых структур / А. Н. Мельников. Автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.03.01 / Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н. Туполева. — Казань, 2005. — 15 с.
- [12] Лукин, А. В. Делительная машина маятникового типа для изготовления нарезных периодических рельефно-фазовых структур / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, С. О. Мирумьянц // Оптический журнал. — 2007. — Том 74. — № 1. — С. 44–49.
- [13] Карпов, А. И. К расчету динамики делительной машины маятникового типа / А. И. Карпов, В. А. Кренив, А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Современные технологии — ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения: Международная научно-практическая конференция: Материалы, Т. 2. — Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. — С. 49–55.
- [14] Смирнов, Г. Б. Линейные системы управления в пакете MATLAB: учебное пособие / Г. Б. Смирнов, В. Г. Томашевич. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 76 с.

A study of the dynamics of a pendulum - type ruling engine with regard to the influence of the bicylindrical geometry of the forming working edge of the diamond tool

V. M. Borodin¹, A. I. Karpov¹, V. A. Krennev¹, A. V. Lukin², A. N. Melnikov²

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

²JSC “Scientific and Production Association “State Institute of Applied Optics”, Kazan, Russia

The report discusses the results of a study of the dynamics of a pendulum-type ruling engine with regard to the influence of the bicylindrical geometry of the forming working edge of the diamond tool. These results are based on computer simulation conducted in the MATLAB Simulink application software package. The simulation, taking into account the specified tolerances for the main parameters of the groove structures of diffraction optical elements, the influence of external factors, accepted assumptions and features of the ruling technique, allows us to determine the optimal (rational) values of the design and dynamic parameters of a pendulum-type ruling engine.

Keywords: *Pendulum-type ruling engine, Dynamics studies, Diamond tool, Bicylindrical geometry of the forming working edge, Contact force, Groove structure, Groove geometry*

Измерение нелинейно - оптических свойств кремния при воздействии ультракоротких лазерных импульсов ИК-диапазона (1–2,4 мкм)

Н. А. Смирнов¹, С. И. Кудряшов¹, Н. И. Буслеев¹, Ю. С. Гулина¹, П. П. Пахольчук¹, Т. Ю. Котенев^{1,2}

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Обработка материалов ультракороткими лазерными импульсами с длиной волны среднего ИК-диапазона (2–6 мкм) на сегодняшний день практически не исследована, но при этом имеет большой потенциал для узкозонных полупроводников, прозрачных для ИК-излучения, особенно кремния, который является основным полупроводниковым материалом для бесчисленных приложений, включая фотогальванику и микроэлектронику. В работе было измерено нелинейное пропускание ультракоротких лазерных импульсов сквозь кремниевую пластину (380 мкм) в зависимости от длины волны (1,2–2,4 мкм) при облучении объективом с числовой апертурой 0,25.

Ключевые слова: Кремний, Нелинейное поглощение, Ультракороткие лазерные импульсы, Средний ИК диапазон

Введение

В последние годы появляется все больше работ, в которых рассматривается прямая лазерная запись в объеме диэлектриков и полупроводников структур с измененным показателем преломления (волноводы, голограммы, решетки и др.) [1]. Одной из актуальных задач является запись таких структур в кремнии, который является основным материалом электронной промышленности. При лазерной модификации материала ультракороткими лазерными импульсами важным параметром являются нелинейные характеристики материала. Ранее для кремния методом Z-scan для умеренных интенсивностей (до ~ 10 ГВт/см² [1, 2]) были измерены значения нелинейного показателя преломления n_2 , тогда как для больших интенсивностей данный коэффициент может измениться за счет других механизмов поглощения лазерного излучения.

1. Экспериментальная часть

В работе использовалось фемтосекундное лазерное излучение (~ 150 фс) с длинами волн (1200–2400 нм), полученное с помощью генерации разностной частоты (DFG) [3]. Облучение кремния производилось через объектив с числовой апертурой NA 0,25. В качестве образца использовалась кремниевая пластина с двухсторонней полировкой и толщиной 380 мкм. Ориентация поверхности была [001]. Измерение нелинейного пропускания лазерных импульсов от мощности производилось при частоте следования лазерных импульсов 10 кГц.

2. Результаты

Интенсивность лазерного излучения для n -фотонного поглощения была рассчитана по формулам, описанными в статье [3].

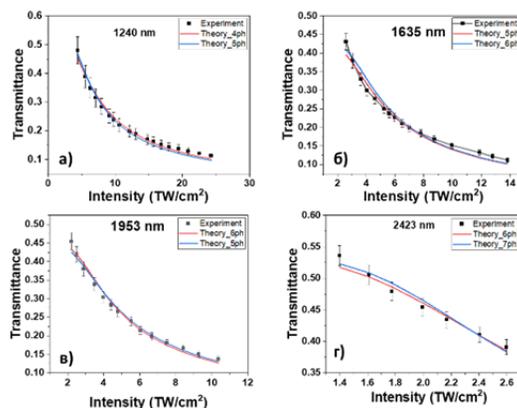


Рис. 1. Экспериментальные данные по пропусканию лазерного излучения от интенсивности с аппроксимацией для длины волны: а) 1240 нм; б) 1635 нм; в) 1953 нм; г) 2453 нм

На рисунке 1 представлены экспериментальные графики нелинейного пропускания кремниевой мишени для разных длин волн с аппроксимацией для разного количества фотонов. Для длины волны: 1240 нм — 4 и 5 фотонов, 1635 нм — 5-6 фотонов, 1953 нм — 5-6 фотонов, 2423 нм — 6-7 фотонов. В отличие от других результатов, полученных при меньших интенсивностях лазерного излучения, где поглощение рассматривалось через не прямые межзонные переходы (1,1 эВ) [2], в нашем эксперименте кривые хорошо аппроксимируются при рассмотрении поглощения через прямые межзонные переходы (~3,2 эВ) [4], вероятность которых выше при многофотонном возбуждении [5].

Заключение

В рамках экспериментальной работы по облучению кремния ультракороткими лазерными импульсами среднего ИК-диапазона (1,2–2,4 мкм) продемонстрировано, что поглощение высокоинтенсивных лазерных импульсов среднего ИК-диапазона ($>1 \text{ TW/cm}^2$) в кремнии происходит через прямые межзонные переходы (~3,2 эВ).

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00290.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Chambonneau, M.** In-Volume Laser Direct Writing of Silicon / M. Chambonneau, O. Tokel, F. Ö. Ilday, S. Nolte // Applied physics letters. — 2007. — Vol 90. — № 19.
- [2] **Bristow, A. D.** Two-photon absorption and Kerr coefficients of silicon for 850–2200nm / A. D Bristow, N. Rotenberg, H. M. Van Driel // Applied physics letters. — 2007. — Vol 90. — № 19.
- [3] **Смирнов, Н. А.** Прямое многофотонное фемтосекундное ИК-лазерное возбуждение решетки алмаза в двухфотонной области и модификация центров окраски / Н. А. Смирнов, Ю. С. Гулина, Н. И. Буслеев, П. П. Пахольчук, А. В. Горевой, В. Г. Винс, С. И. Кудряшов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2024. — Vol 119. — № 6. — С. 411–416.
- [4] **Rajkanan, K.** Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations / K. Rajkanan, R. Singh J. Shewchun, //Solid-State Electronics. — 1979. — Vol 22. — № 9. — С. 793–795.
- [5] **Kozák, M.** Anisotropy and polarization dependence of multiphoton charge carrier generation rate in diamond / M. Kozák, T. Otake, M. Zukerstein, F. Trojánek, P. Malý // Physical Review B. — 2019. — Vol 99. — № 10. — С. 104305.1

Measurement of nonlinear optical properties of silicon under the influence of ultrashort laser pulses in the IR range (1–2.4 μm)

N.A. Smirnov¹, S.I. Kudryashov¹, N.I. Busleev¹, Yu.S. Gulina¹, P.P. Pakholchuk¹, T.Yu. Kotenev^{1,2}

¹ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The processing of materials with ultrashort laser pulses with a wavelength in the mid-IR range (2-6 μm) has been practically unexplored today, but it has great potential for modifying narrow-gap semiconductors that are transparent to IR radiation, especially silicon, which is the main semiconductor material for countless applications including photovoltaics and microelectronics. The work measured the nonlinear transmission of ultrashort laser pulses through a silicon wafer (380 μm) depending on the wavelength (1.2-2.4 μm) when irradiated by a lens with a numerical aperture of 0.25.

Keywords: Silicon, Nonlinear absorption, Ultrashort laser pulses, Mid-IR range

Модуляция периода лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на тонких титановых пленках для управления тензочувствительностью

М. Д. Васильев, Д. А. Синев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе показана возможность контролируемого управления периодом лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на тонких титановых пленках на полиимидной подложке при помощи изменения угла падения лазерного излучения. Таким образом, удается регулировать период регулярных рельефов различной ориентации относительно вектора сканирования. Также показанным способом возможно как управляемо увеличивать, так и уменьшать пространственное разрешение записываемых структур. Измерения дифракционной эффективности оптического отклика ЛИППС показывают возможность регистрации прикладываемых деформирующих нагрузок различного вида. Представленные в работе результаты имеют перспективы в приборостроении и тензометрии.

Ключевые слова: ЛИППС, Дифракционные решетки, Тонкие пленки, Тензометрические датчики, Датчики деформации

В настоящее время одним из актуальных направлений развития приборостроения являются тензометрические датчики. Такие устройства применяются как для измерения приходящих деформирующих усилий на различные элементы, так и для мониторинга положения подвижных узлов систем [1–3]. В то же время современные тензометрические датчики имеют ряд значительных недостатков, одним из которых является высокая стоимость таких устройств.

Возможным решением проблемы могут стать функциональные элементы на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС), формируемых прямой лазерной записью и представляющих собой дифракционные решетки с синусоидальным профилем, сформированные на обрабатываемой поверхности [4]. Отслеживая изменения дифракционных картин или спектральных характеристик таких структур, сформированных на гибких материалах, возможно измерять и контролировать прикладываемые деформации [5].

Ранее уже были продемонстрированы результаты измерения оптического отклика ЛИППС, сформированных на тонких титановых пленках толщиной 30 нм, напыленных на полиимидную подложку толщиной 200 мкм [6]. При растяжении такие структуры демонстрировали изменение угла отклонения первого порядка дифракции до 1° на 1 кг прикладываемой нагрузки. В то же время при изгибе изменения угла составили до 7 град/см^{-1} . Однако у показанных элементов возможно наблюдать дифракционные свойства при длине волны сигнального лазера менее периода решетки ($T = 660 \pm 40 \text{ нм}$), что затрудняет применимость таких структур.

Одной из особенностей формирования ЛИППС на различных материалах является зависимость периода формируемого рельефа от угла падения возбуждающего излучения [7]. Так, в настоящем исследовании были получены ЛИППС с периодом до $1194 \pm 80 \text{ нм}$ при угле наклона 45° , что значительно расширяет возможный диапазон длин волн сигнального лазера до ближнего ИК диапазона. Кроме того, были получены зависимости изменения угла отклонения первых порядков дифракции при растяжении и изгибе элементов для сигнальных лазеров с длиной волны 532 и 660 нм (табл.).

Таблица. Оптический отклик ЛИППС при растяжении

Растяжение			Изгиб		
Период ЛИППС $T = 660 \pm 40 \text{ нм}$	Период ЛИППС $T = 1194 \pm 80 \text{ нм}$		Период ЛИППС $T = 660 \pm 40 \text{ нм}$	Период ЛИППС $T = 1194 \pm 80 \text{ нм}$	
Лазер засветки 532 нм	Лазер засветки 532 нм	Лазер засветки 660 нм	Лазер засветки 532 нм	Лазер засветки 532 нм	Лазер засветки 660 нм
0,09 град/Н	0,04 град/Н	0,05 град/Н	$6,08 \text{ град/см}^{-1}$	$4,93 \text{ град/см}^{-1}$	$4,75 \text{ град/см}^{-1}$

Как видно из представленных результатов, несмотря на значительное изменение периода ЛИППС, структуры сохраняют оптический отклик. Таким образом, представлена потенциальная возможность управляемого изменения периода ЛИППС для создания оптических тензометрических датчиков под конкретные требования габаритных и точностных характеристик элементов.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-79-10230.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhao, Y.** Development and application of resistance strain force sensors / Y. Zhao, et al. // *Sensors*. — 2020. — Vol 20. — № 20. — С. 5826.
- [2] **Shang, K.** Fibre optic sensors for the monitoring of rotating electric machines: A review / K. Shang, et al. // *Optical and Quantum Electronics*. — 2021. — Vol 53. — С. 1–28.
- [3] **Polanco-Gonzalez, J.** Band gap tuning in 2D layered materials by angular rotation / J. Polanco-Gonzalez J. et al. // *Materials*. — 2017. — Vol 10. — № 2. — С. 147
- [4] **Ibrahim, Q.** Laser fabrication of 1D and 2D periodic subwavelength gratings on titanium films / Q. Ibrahim, Y. Andreeva, A. Suvorov, D. Khmelenin, E. Grigoryev, A. A. Shcherbakov, D. Sinev // *Optics and Laser Technology*. — 2024. — Vol. 174. — P. 110642
- [5] **Gräf, S.** Mechano-responsive colour change of laser-induced periodic surface structures / S. Gräf, et al. // *Applied Surface Science*. — 2019. — Vol 471. — С. 645–651.
- [6] **Васильев, М. Д.** Исследование оптических характеристик лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках титана на полимерных подложках при деформации / М. Д. Васильев, Д. А. Синева // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – СПб: Университет ИТМО. — 2024.
- [7] **Либенсон, М. Н.** Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние / М. Н. Либенсон. М.: Наука. — 2007.

Modulation of the period of laser - induced periodic surface structures on thin titanium films for strain sensitivity control

M.D. Vasilev, D.A. Sinev

ITMO University, St. Petersburg, Russia

The study shows the possibility of controlled formation of the period of laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on thin titanium films on a polyimide substrate by changing the angle of incidence of laser radiation. In this way, it is possible to regulate the period of regular reliefs of different orientations relative to the scanning vector. Also, this method can be used to both increase and decrease the spatial resolution of the structures. Measurements of the diffraction efficiency of the optical response of LIPSS show the possibility of recording applied deforming loads of various types. The results presented in the paper have prospects in instrumentation and strain measurement.

Keywords: *LIPSS, Diffraction gratings, Thin films, Strain gauges, Deformation sensors*

Лазерное нано/микроструктурирование и сверхлегирование кремния

А. А. Настулявичус^{1,2}, С. И. Кудряшов^{1,2}, Е. В. Ултургашева^{1,2}, М.С. Ковалев^{1,2}, Н.Г. Сцепуро^{1,2}, И.М. Подлесных^{1,2}

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Под действием многоимпульсного лазерного излучения видимого и ИК-диапазона нано- и фемтосекундной длительности получены образцы сверхлегированного кремния с содержанием легирующей примеси (азот, сера) до 4 ат. %. С помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии охарактеризован микрорельеф поверхности и проанализирован химический состав модифицированного поверхностного слоя. Проведено исследование спектров отражения и пропускания нано/микроструктурированных легированных областей в диапазоне $650\text{--}25000\text{ см}^{-1}$.

Ключевые слова: Кремний, -фемто-, -наносекундные лазерные импульсы, Легирование, Лазерный отжиг, ИК-фотоника

Введение

Кремний традиционно является основным материалом микро- и оптоэлектроники [1]. В последнее десятилетие активно развиваются технологии поверхностного сверхлегирования кремния донорными и акцепторными примесями, что потенциально позволяет формировать лазером в необходимом месте светопоглощающие нанометровые поверхностные слои (*p-n* переходы) с легирующим элементом [2–3]. В рамках данной работы были получены нано/микроструктурированные, легированные серой и азотом поверхности кремния.

2. Экспериментальная часть

Для лазерного нано/микроструктурирования использовалась полированная с двух сторон 200 мкм нелегированная кремниевая пластина (100). Легирование азотом производилось с помощью наносекундного лазера SOLAR с использованием длины волны второй гармоники — 532 нм и длительностью импульса 10 нс в среде жидкого азота. Легирование серой осуществлялось лазерным излучением с длиной волны 1030 нм и длительностью импульса 10 пс в среде жидкого сероуглерода.

3. Результаты

На рисунке 1 показаны спектры ИК-отражения и пропускания образца кремния до обработки (Si) и после легирования в среде жидкого азота и сероуглерода (*n-Si*). Лазерное структурирование кремния в жидком азоте производилось для двух экспозиций ($P = 50, 200$ импульсов в точку). Для образцов, легированных серой, дополнительно производился лазерный отжиг, в результате которого была достигнута кристалличность при сохранении нанотекстуры и уровня легирования серой. Все образцы по сравнению с необработанным кремнием (Si) демонстрируют значительное снижение коэффициентов отражения и пропускания.

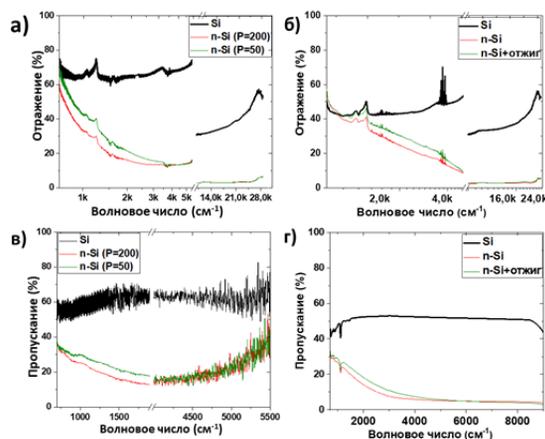


Рис. 1. Спектры отражения и пропускания для кремния, легированного жидким азотом (а, в) и серой (б, г)

ИК-Фурье-спектроскопия микротекстурированной поверхности легированного азотом кремния указывает на значительное широкополосное (2–15 мкм) рассеяние/захват света, проявляющееся как в сильном снижении ИК-отражения и пропускания, также распространяющегося на видимый диапазон.

Заключение

Было произведено одновременное лазерное нано/микроструктурирование и сверхлегирование субмикронного поверхностного слоя кремния атомами серы и азота. Широкополосное поглощение лазерно-модифицированного слоя в диапазоне 800–25 000 см⁻¹ связано с поглощением примесей и светоулавливанием в текстуре поверхности. Наносекундный лазерный отжиг излучением с длиной волны 532 нм был использован для восстановления кристалличности нанотекстурированных и сверхлегированных серой поверхностных слоев кремния, сохраняя как их текстуру, так и высокий уровень сверхлегирования.

Благодарность

Результаты были получены в рамках Государственного задания № FSFN-2024-0019.

Список источников

- [1] Демидов, А. А. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020–2030 гг.) / А. А. Демидов, С. Б. Рыбалка // Прикладная математика и физика. — 2021. — Том 53. — № 1. — С. 53–72. — DOI: 10.52575/2687-0959-2021-53-1-53-72.
- [2] Crouch, C. H. Infrared absorption by sulfur-doped silicon formed by femtosecond laser irradiation / C. H. Crouch, J. E. Carey, M. Shen, E. Mazur, F. Y. Genin // Applied Physics A. — 2004. — Vol 79. — № 7. — P. 1635–1641. — DOI: 10.1007/s00339-004-2676-0.
- [3] Bob, B. P. Fabrication and subband gap optical properties of silicon supersaturated with chalcogens by ion implantation and pulsed laser melting / B. P. Bob, A. Kohno, S. Charnvanichborikarn, J. M. Warrender, I. Umez, M. Tabbal, J. S. Williams, M. J. Aziz // Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol 107. — № 12. — P. 123506. — DOI: 10.1063/1.3415544.

Laser nano/microstructuring and superdoping of silicon

A. A. Nastulyavichus^{1,2}, S. I. Kudryashov^{1,2}, E. V. Ulturgasheva^{1,2}, M.S. Kovalev^{1,2}, N.G. Stsepuro^{1,2}, I.M. Podlesnykh^{1,2}

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

² P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Under the influence of multipulse laser radiation in the visible and IR range of nano- and femtosecond pulse duration, samples of superdoped silicon with a doping impurity content (nitrogen, sulfur) of up to 4 at. %. Using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy, the surface microrelief was characterized and the chemical composition of the modified surface layer was analyzed. The reflection and transmission spectra of nano/microstructured doped regions were studied in the range of 650–2500 cm⁻¹.

Keywords: Silicon, -femto-, -nanosecond laser pulses, Doping, Laser annealing, IR photonics Laser nano/microstructuring and superdoping of silicon

Секция 9

Цифровая голография и методы визуализации

Фантомная микроскопия: на пути к трехмерной визуализации

А. М. Вьюнышев^{1,2}, Н. Н. Давлетшин^{1,2}, А. С. Чиркин³

¹ Институт физики им. Л. В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Сообщаются результаты исследования визуализации микроскопических объектов методом фантомной микроскопии. Произведен анализ качества полученных микроизображений объекта и глубины резкости оптической системы. Полученные результаты демонстрируют новые возможности для трехмерной визуализации микрообъектов.

Ключевые слова: Оптическая микроскопия, Фантомные изображения, Корреляции интенсивности, Глубина резкости, Трехмерная визуализация

Современные методы оптической микроскопии позволяют исследовать морфологические и физиологические характеристики живых тканей и клеток. Одной из ключевых проблем оптической микроскопии является преодоление ограничений, обусловленных явлением дифракции. С этой целью предложен ряд оригинальных методов, которые позволяют получить оптическое сверхразрешение [1]. Другим немаловажным фактором является глубина резкости оптической системы, ограничивающая область, в пределах которой обеспечивается высокое пространственное разрешение. Изображения структурных элементов, находящихся вне области резкости, испытывают размытие и деградацию. В настоящее время предложены подходы на основе вычислительных методов и постобработки, позволяющие восстановить объемное микроизображение изучаемых объектов [2].

Авторами работы предложен новый метод оптической микроскопии на основе принципа фантомных изображений — фантомной микроскопии. Метод фантомной визуализации использует пространственную корреляцию световых пучков [3]. Одно из них взаимодействует с объектом, но регистрируется не обладающим пространственным разрешением детектором. Изображение объекта извлекается с помощью второго пучка, не взаимодействующего с объектом, из измерения корреляций функций интенсивностей пучков.

В настоящем докладе сообщаются результаты исследований визуализации микроскопического объекта методом фантомной микроскопии. Они включают анализ качества полученных микроизображений объекта и глубины резкости, характерной для рассматриваемого типа визуализации. Полученные результаты демонстрируют новые возможности для трехмерной визуализации микрообъектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Astratov, V.** Roadmap on Label-Free Super-Resolution Imaging / Astratov et al. // *Laser & Photonics Reviews*. — 2023. — Vol 17. — P. 2200029.
- [2] **Wu, Y.** Extended depth-of-field in holographic imaging using deep-learning-based autofocusing and phase recovery / Wu et al. // *Optica*. — 2018. — Vol 5. — P. 704–710.
- [3] **Bromberg, Y.** Ghost imaging with a single detector / Y. Bromberg, O. Katz, Y. Silberberg // *Physical Review A*. — 2009. — Vol 79. — P. 053840.

Ghost image microscopy: towards to three-dimensional visualization

А. М. Vyunishev^{1,2}, N. N. Davletshin^{1,2}, A. S. Chirkin³

¹ Kirensky Institute of Physics, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The ghost image microscopy has been studied to visualize the microscopic objects. The analysis of image quality and depth of field of the optical system has been investigated. The results obtained demonstrates new possibilities for three-dimensional imaging of microscopic objects.

Keywords: Optical microscopy, Ghost imaging, Intensity correlations, Depth of field, Three-dimensional visualization

Двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия контроля обращенных к плазме защитных элементов токамака «Глобус - М»

И. В. Алексеенко¹, А. М. Кожевникова¹, А. Г. Раздобарин², Д. И. Елец², О. С. Медведев², Я. Р. Шубин²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Предлагается метод двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии для контроля износа обращенных к плазме защитных элементов (ОПЭ) токамак-реакторов. На примере анализа защитных элементов, извлеченных из разрядной камеры лабораторного токамака «Глобус-М», показана возможность использования цифровой голографической интерферометрии для контроля износа поверхностей таких защитных элементов.

Ключевые слова: Цифровая голографическая интерферометрия, Оптическая метрология

Введение

В настоящее время для эффективного получения энергии ведущие страны мира работают над созданием термоядерных реакторов нового поколения. При проектировании таких установок необходимо обеспечить их безопасность, надежность и устойчивость эксплуатации. Для этого требуется разработка диагностических методик, позволяющих проводить мониторинг целостности внутренних элементов токамак-реакторов в течение работы.

В качестве метода контроля предлагается использовать технику двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии. Такой метод является бесконтактным и позволяет проводить мониторинг поверхности на расстоянии в несколько метров. Планируется создание измерительного комплекса с целью его интеграции в экспериментальный токамак "Глобус-М" для оценки поверхности обращенных к плазме элементов установки.

1. Метод

Определение формы поверхности может быть рассчитано на основе синтетической длины волны и разности фаз для соответствующих длин волн, на которых производится регистрация цифровых голограмм.

Так связь между формой поверхности (высотой профиля), разностью фаз и синтетической длиной волны определяется выражением (1)

$$T = \frac{\Delta\varphi}{4\pi} \lambda_{syn}, \quad (1)$$

где λ_{syn} определяется через разность длин волн, используемых при записи и реконструкции голограмм [1]. Расчет фаз, как правило, осуществляется с применением преобразования Фурье [2].

В качестве источника когерентного излучения использовался непрерывный кольцевой Ti:Sa лазер Техноскан TIS-SF-07 с перестраиваемой длиной волны. Диапазон перестройки длин волн составлял 100 нм и лежал в диапазоне 750–850 нм. Выходная энергия излучения составляла 1,2 Вт, а минимальная перестройка длины волны — 0,085 нм.

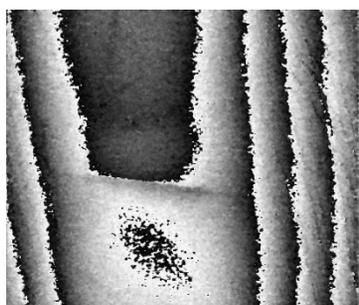
Регистрация голограмм осуществлялась по схеме сфокусированного изображения на матрицу цифровой камеры.

2. Результаты

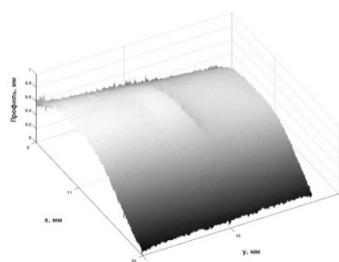
В качестве объекта исследования был выбран один из элементов защитной оболочки экспериментального токамака «Глобус-М». Графитовый защитный элемент был извлечен из разрядной камеры токамака в ходе регламентных работ после длительной его экспозиции плазмой. На рисунке 1 показан экспериментальный образец. Размер наблюдаемой области 30x 23 мм². На поверхности образца достаточно хорошо идентифицируются дефекты. Не трудно заметить, что дефекты имеют нерегулярный профиль и разный размер. На рисунке 2 представлена разность фаз (а), а также реконструированная форма объекта, на которой хорошо проявлен наиболее глубокий и наибольший дефект (б). Синтезированная длина волны составляла около 400 мкм. Таким образом, оцениваемая глубина дефекта около 200 мкм.



Рис. 1. Образец ОПЭ



а)



б)

Рис. 2. Результат измерения профиля образца с дефектом: а) разность фаз; б) реконструированный профиль ОПЭ с дефектом

Заключение

В исследовании продемонстрировано применение метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии для контроля износа поверхности обращенных к плазме защитных элементов токамак-реактора «Глобус-М». Показана возможность мониторинга таких объектов, что позволит в дальнейшем создать измерительный комплекс для дистанционного контроля внутренней поверхности токамака.

Благодарность

Доклад подготовлен в рамках гранта РФФ 23-79-00023 «Оптический неразрушающий контроль и диагностика первой стенки токамак-реакторов с использованием метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии и системы лазерного сканирования».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Friesem, A. A. Fringe formation in two-wavelength contour holography/ Friesem, A. A. & Levy, U. // Applied Optics. — 1976. — Vol 15. — P. 3009–3020.
- [2] Takeda, M. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry / Takeda, M., Ina, H. & Kobayashi, S. // Journal of the Optical Society of America. — 1982. — № 76. — P. 156–160.

Two-wavelength digital holographic interferometry for monitoring the plasma-facing protective elements of the Globus-M tokamak

Igor Alekseenko¹, Anastasiia Kozhevnikova¹, Aleksey Razdobarin², Denis Eletz², Oleg Medvedev², Yaroslav Shubin²

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

² Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

A method of two-wavelength digital holographic interferometry is proposed to control the deterioration of plasma-facing protective elements of tokamak reactors. Using the example of the analysis of protective elements extracted from the discharge chamber of the Globus-M laboratory tokamak, the possibility of using digital holographic interferometry to control the deterioration of the surfaces of such protective elements is shown.

Keywords: Digital holographic interferometry, Optical metrology

Разработка одноэкспозиционного цифрового голографического микроскопа на основе линзы с эффектом геометрической фазы

А. В. Черных¹, А. С. Езерский¹, Н. В. Петров¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен цифровой голографический микроскоп, у которого в качестве окуляра используется линза с эффектом геометрической фазы. Регистрация осевой интерференционной картины осуществляется с помощью матричного детектора, сопряженного с массивом микрополяризаторов. Разработан метод устранения шумов и возмущений, имеющих кольцевую структуру, от вторичных дифракционных порядков. Результаты восстановления фазовых распределений аналогичны полученным в схеме дифракционного голографического микроскопа общего оптического пути.

Ключевые слова: Цифровая голографическая микроскопия, Геометрическая фазовая линза, Метод фазовых шагов, Количественная фазовая визуализация

Введение

В цифровых голографических микроскопах (ЦГМ) общего пути интерферирующие пучки проходят по одинаковым траекториям и через одни и те же оптические элементы, что позволяет эффективно компенсировать вибрации окружающей среды и использовать источники света с низкой временной когерентностью [1]. Недостатком подобных схем является присутствие расфокусированных изображений в опорной волне. Среди ЦГМ общего пути можно выделить схемы с поляризационными светоделительными элементами с эффектом геометрической фазы или фазы Пачаратнама-Берри, которые способны формировать из линейно поляризованной волны два поляризационных порядка: с левой и правой круговыми поляризациями [2].

Результаты

В данной работе рассматривается ЦГМ, у которого в качестве окуляра используется геометрическая фазовая линза (ГФЛ), схема которого исследовалась ранее [3] (рис. 1.) Изображение образца переносится сходящимся поляризационным порядком на камеру с массивом микрополяризаторов, ориентированных в четырех направлениях. В качестве опорной волны выступает поле расходящегося поляризационного порядка. По одновременно регистрируемым четырем интерферограммам, методом фазовых шагов, вычисляется комплексная голограмма. Вычитанием фазовых составляющих комплексных голограмм исследуемого образца и освещающего его поля вычисляется фазовый набег, производимый этим образцом. Однако из-за бинарной структуры ГФЛ генерирует помимо основных поляризационных порядков дополнительные дифракционные порядки, которые нарушают интерференционную структуру поля и формируют в восстановленном фазовом распределении кольцевидные возмущения (рис. 2а).

Для выделения информативного дифракционного порядка в Фурье плоскости к полю комплексной голограммы добавляется параболический фронт с соответствующим радиусом кривизны. Данный дифракционный порядок фокусируется к одной точке в Фурье плоскости и вырезается круглой апертурой. Затем производится расчет обратного преобразования Фурье, и после вычитания освещающего поля, рассчитывается фазовый набег (рис. 2б).

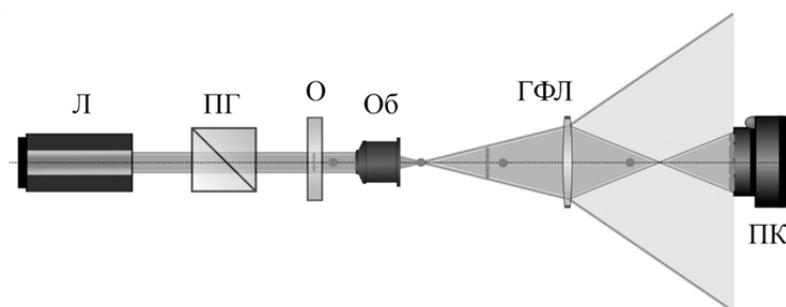


Рис. 1. Принципиальная схема ЦГМ с ГФЛ:

Л — лазерный диод; ПГ — призма Глана; О — образец; Об — объектив микроскопа; ГФЛ — геометрическая фазовая линза; ПК — поляризационная камера

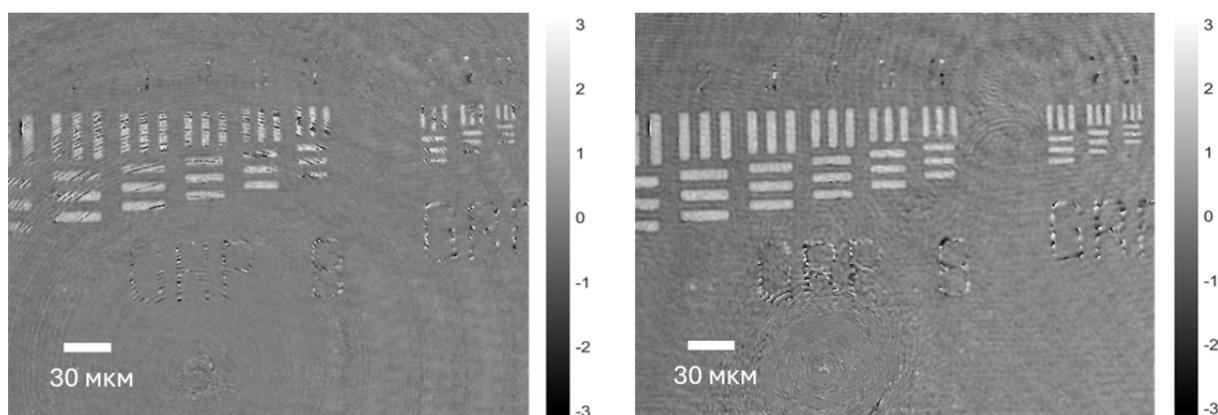


Рис. 2. Восстановленное фазовое распределение калибровочного фазового слайда:
 а) Фурье-фильтрация высоких пространственных частот фазового распределения; б) фильтрация численно сфокусированного дифракционного порядка

Заключение

Методом численной фокусировки параболических волновых фронтов подавляются не только кольцевидные возмущения, а также вторичные изображения. Данный метод может быть востребован и для других схем интерферометров общего пути, где происходит наложение мнимых изображений. Точность определения задержки фазы поля калибровочного слайда сопоставима с результатами измерений в дифракционном фазовом микроскопе.

Благодарность

Авторы выражают благодарность инициативе ИТМО-МФТИ-Сколтех «Клевер».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang, J.** A review of common-path off-axis digital holography: towards high stable optical instrument manufacturing / J. Zhang [et al.] // *Light: Advanced Manufacturing*. — 2021. — Vol 2. — № 3.
- [2] **Choi, K.** Compact self-interference incoherent digital holographic camera system with real-time operation / K. Choi [et al.] // *Optics Express*. — 2019. — Vol 27. — № 4. — P. 4818.
- [3] **Chernykh, A. V.** Study on object wavefront sensing in parallel phase-shifting camera with geometric phase lens / A. V. Chernykh [et al.] // *SPIE Conference Proceeding*. — 2021. — P. 118980X.

Development of the single-shot digital holographic microscope based on the lens with geometric phase effect

A. V. Chernykh, A. S. Ezerskii¹, N. V. Petrov¹

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

This paper presents the digital holographic microscope, which uses the lens with geometric phase effect as ocular. The axial interference pattern is registered via the matrix detector coupled to the array of micropolarizers. The method of eliminating noise and ring-structure perturbations from secondary diffraction orders is developed. The results of the phase distributions reconstruction are identical to those obtained in the common optical path diffraction holographic microscope scheme.

Keywords: Digital holographic microscopy, Geometric phase lens, Phase shift method, Quantitative phase imaging

Исследование нелинейных упругих волн с помощью цифровых голографических методов и ультразвуковой диагностики

А. А. Жихорева, А. В. Белашов, И. В. Семенова, Я. М. Бельтюков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен анализ преимуществ и недостатков регистрации и мониторинга нелинейных волн деформации в твердотельном волноводе из нелинейно-упругого материала (полистирола) с использованием трех методов — внеосевой цифровой голографии с наблюдением «на пропускание» и «на отражение» и ультразвуковой диагностики с применением пьезоэлектрических преобразователей. Показано, что голографические методы позволяют более надежно определять параметры волновой картины как в силу более высокого разрешения, так и вследствие регистрации только продольных волн. При мониторинге волнового процесса с помощью ультразвуковой диагностики чувствительность датчиков к сдвиговым волнам не позволяет выделить вклад продольных волн на достаточно длинной части волновода от его входного торца.

Ключевые слова: *Нелинейная уединенная волна деформации, Цифровая голография, Регистрация на пропускание, Регистрация на отражение, Пьезоэлектрические преобразователи*

В последнее время нелинейно-упругие материалы, в том числе полимерные, приобретают широкое использование в разных отраслях промышленности. Важную роль в динамике таких материалов играют их нелинейные свойства, а именно модули упругости третьего порядка (нелинейные модули упругости). Они определяют такие важные явления, как распространение солитонов деформации и акустоупругий эффект. В предыдущих работах [1, 2] авторы исследовали процесс генерации и эволюции нелинейной уединенной волны (солитона) деформации в волноводах из нелинейно-упругих материалов — полистирола, ПММА и поликарбоната. Эксперименты проводились с регистрацией методом внеосевой цифровой голографии с наблюдением «на пропускание», что существенно ограничивало класс исследуемых материалов условием их прозрачности. Поскольку в настоящее время большой интерес представляет исследование нелинейно-волновых процессов в полимерных (нано)композитных материалах, возникла необходимость разработки методов регистрации таких процессов в непрозрачных материалах. В настоящей работе проведен сравнительный анализ возможности мониторинга нелинейных уединенных волн в волноводах из полистирола с использованием методов цифровой голографии с регистрацией «на пропускание» и «на отражение», а также ультразвуковой диагностики с применением пьезоэлектрических преобразователей.

Экспериментальная реализация осуществлялась следующим образом. Исходная ударная волна генерировалась в кювете с водой при взрывном лазерном испарении металлизированной пленки, помещенной вблизи входного торца бруска из полистирола. Взрывное испарение металлического слоя осуществлялось импульсным Nd:YAG лазером Spitlight 600 (Innolas, Германия) с длительностью импульса 7 нс и максимальной энергией в импульсе $\sim 0,5$ Дж на длине волны 532 нм. Ударная волна входила в волновод из полистирола сечением 10×10 мм², и в процессе распространения по волноводу происходило образование солитона деформации.

Регистрация волновых картин в волноводе осуществлялась тремя методами.

1. При реализации метода внеосевой цифровой голографии с регистрацией «на пропускание» запись голограмм осуществлялась с помощью быстродействующей камеры Nanogate 24 (Nanoscan, Россия) с экспозицией 100 нс. Синхронизация импульса лазера и затвора камеры проводилась генератором импульсов AM300 Dual Arbitrary Generator (Rohde&Schwarz). Для записи голограмм использовался непрерывный лазер DPSS, излучающий на длине волны 532 нм. Размер поля зрения составлял 65 мм, смещение волновода в плоскости, перпендикулярной направлению распространения объектного пучка позволяло регистрировать волновые картины в разных частях волновода. Восстановление двух голограмм, соответствующих отсутствию и наличию упругой волны в поле зрения, позволяло рассчитать распределение интегрального по толщине волновода фазового набега, вызванного упругой волной. Восстановление голограмм проводилось с использованием least-square minimization algorithm [3].

2. Для реализации метода внеосевой цифровой голографии с регистрацией «на отражение» боковая грань прозрачного бруска из полистирола была отполирована, после чего на нее было нанесено алюминиевое покрытие, что позволило значительно увеличить коэффициент отражения и направить предметную волну через телескопическую систему непосредственно на матрицу цифровой камеры.

3. Детектирование солитонов деформации в волноводе с использованием ультразвуковой диагностики производилось с помощью пьезоэлектрических датчиков продольных волн P111-0,6-14

(Amati Acoustics), временная развертка сигнала с которых регистрировалась осциллографом RTB2002 (Rohde&Schwarz). Диаметр рабочей поверхности датчиков составлял 20 мм. Регистрация проводилась в двух конфигурациях: на боковой поверхности на нескольких участках по мере продвижения волны и на выходном торце волновода.

Во всех трех случаях проводилось исследование эволюции волновых картин при распространении по волноводу, а также их изменение в зависимости от энергии исходной ударной волны. Энергия ударной волны варьировалась при изменении энергии лазерного импульса, осуществляющего взрывное испарение металлизированной пленки.

На рис. 1 приведены распределения фазового набега, зарегистрированные в схеме «на пропускание» (a) и «на отражение» (b), соответствующие волновым картинам в бруске из полистирола на расстояниях 150 мм от входного торца, соответственно, и при разных энергиях ударной волны. На рис. 1с приведены огибающие сигналов с пьезоэлектрических преобразователей, располагавшихся на расстоянии 300 мм от входного торца волновода, при разных энергиях ударной волны.

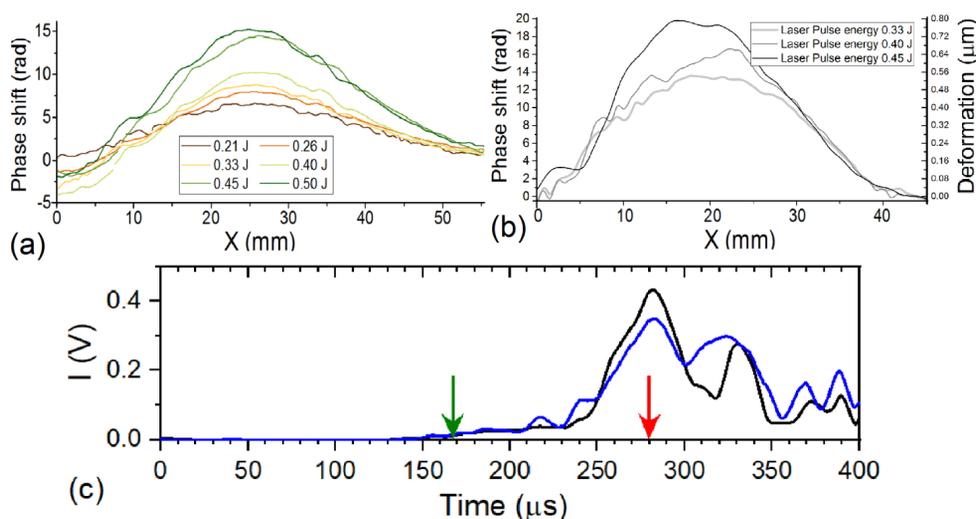


Рис. 1. Профили солитонов деформации в бруске из полистирола, полученные с регистрацией методами внеосевой цифровой голографии с наблюдением «на пропускание» (a) и «на отражение» (b) при разных энергиях ударной волны, а также с помощью ультразвуковой диагностики (c). Зеленой стрелкой показан момент прихода продольных волн, красной — поперечных

Как видно из сравнения профилей солитонов деформации, приведенных на рис. 1a и b, в обоих случаях увеличение мощности ударной волны приводит к более сильной деформации волновода и к повышению фазового набега, внесенного солитоном в волновой фронт. Существенного изменения ширины не наблюдается. Важным преимуществом регистрации в схеме «на отражение» является возможность прямого пересчета фазового набега в каждой точке в соответствующую деформацию волновода, что приведено на правой оси графика на рис. 1b. Заметим, что прямое сравнение величин фазового набега, зарегистрированного методами цифровой голографии с наблюдением «на пропускание» и «на отражение» невозможно.

Как видно из рис. 1, картины огибающих сигналов с пьезодатчиков качественно согласуются с результатами, полученными голографическими методами. При этом необходимо отметить, что высокое временное разрешение голографических методов, соответствующее частоте в 10–50 МГц, позволяло прописать структуру ударной волны и следующих за ней хаотических коротковолновых колебательных возмущений разной амплитуды, наблюдаемых на участках волновода, близких к его входному торцу. Пьезоэлектрические преобразователи, имеющие значительное меньшее временное разрешение (200 кГц) не позволили прописать эти возмущения и показали более сглаженные сигналы.

Кроме того, в отличие от голографической регистрации «на пропускание», при которой вклад в полученное распределение фазового набега вносят только продольные волны, пьезодатчики, приложенные к боковой поверхности волновода, могут детектировать сигналы как от продольных, так и от поперечных волн, что может вносить существенную ошибку в получаемые данные. При разнице в скоростях продольных и поперечных волн в полистироле порядка 700 м/с и при ширине солитона деформации порядка 30–40 мм не удастся достоверно разделить по времени вклады сигналов от продольных и поперечных волн на достаточно больших расстояниях вплоть до 25–30 см. Таким

образом, нарастание сигнала в первом (левом) пике на рис. 1с соответствует вкладу только продольных волн, за которым следует сигнал от суперпозиции продольных и поперечных волн. Для мощности лазерного импульса 0,5 Дж ширина на полувысоте первого пика составляет ≈ 40 мкс, что соответствует ширине солитона ≈ 70 мм, что превышает значение, определенное из голографических данных. Расхождение данных, полученных разными методами, может быть обусловлено невозможностью полностью разделить вклады от прохождения солитона деформации и сдвиговых волн, распространяющихся в волноводе. Также существенным недостатком этого метода является то, что количественное определение амплитуды солитона из данных, полученных с пьезодатчиков, пока не представляется возможным.

Анализ изменения амплитуды и формы сигналов при распространении волны по волноводу показывает качественную корреляцию данных, зарегистрированных разными методами. Эволюция волны сопровождается уширением основного импульса и уменьшением его амплитуды, за первым пиком следуют колебания меньшей амплитуды. Характерно также некоторое пороговое значение энергии исходной ударной волны, требуемое для формирования солитона деформации — при уменьшении энергии лазерного импульса ниже некоторого предела (порядка 0,15 Дж) солитон деформации не наблюдался во всех трех реализациях регистрации.

Таким образом, показано, что регистрация нелинейных волн деформации в твердотельном волноводе может осуществляться с использованием как голографических методов с регистрацией «на пропускание» и «на отражение», так и ультразвуковой диагностики с применением пьезоэлектрических преобразователей. При этом, голографические методы позволяют более надежно определять параметры волновой картины как в силу более высокого разрешения, так и вследствие регистрации только продольных волн. При мониторинге волнового процесса с помощью ультразвуковой диагностики чувствительность датчиков к сдвиговым волнам не позволяет выделить вклад продольных волн на достаточно длинной части волновода, начиная от его входного торца.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 22-72-10083.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Garbuzov, F.E.** Shock wave evolution into strain solitary wave in nonlinearly elastic solid bar / F.E. Garbuzov, A.V. Belashov, A.A. Zhikhoreva, Y.M. Beltukov, I.V. Semenova // *Wave Motion*. — 2022. — Vol 141. — P. 103022.
- [2] **Dreiden, G.V.** Bulk strain solitary waves in bonded layered polymeric bars with delamination / G.V. Dreiden, K.R. Khusnutdinova, I.V. Semenova, A.M. Samsonov // *Journal of Applied Physics*. — 2012. — Vol 112. — P. 063516.
- [3] **Liebling M.** Complex-wave retrieval from a single off-axis hologram / M. Liebling, T. Blu, M. Unser // *JOSA A*. — 2004. — Vol 21. — № 3. — P. 367–377.

Investigation of nonlinear elastic waves using digital holographic recording and ultrasonic diagnostics

A. A. Zhikhoreva, A. V. Belashov, I. V. Semenova, Y. M. Beltukov

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

The report presents an analysis of the advantages and disadvantages of recording and monitoring of nonlinear strain waves in a solid waveguide made of a nonlinearly elastic material (polystyrene) using three methods - off-axis digital holography with observation 'in-transmission' and 'in-reflection' and ultrasound diagnostics using piezoelectric transducers. Holographic methods were shown to provide more reliable determination of wave pattern parameters, that was both due to higher resolution and due to the recording of longitudinal waves only. When monitoring the wave process using ultrasound diagnostics, the sensitivity of piezoelectric transducers to shear waves did not allow us to isolate the contribution of longitudinal waves in a prolonged input part of the waveguide.

Keywords: *Nonlinear strain solitary wave, Digital holography, 'In-transmission' recording, 'In-reflection' recording, Piezoelectric transducers*

Секция 10

***Современные функциональные
оптические материалы***

Технологические подходы создания рельефно-фазовых и голографических дифракционных решеток для устройств дополненной реальности: сравнительный анализ

Е. М. Алексеев, А. М. Алексеев, Н. В. Никоноров

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Прозрачные линзы-дисплеи являются одной из ключевых компонент очков дополненной реальности (Augmented Reality-AR). Наиболее передовой метод создания этих элементов основан на применении световодов изображения, использующих рельефно-фазовые либо голографические дифракционные решетки. В то время, как оба типа решеток способны обеспечить целевые оптические показатели, они требуют принципиально отличающихся производственных подходов. В данном докладе сравниваются преимущества и ограничения рельефно-фазовых и голографических дифракционных решеток с точки зрения производства коммерческих продуктов. В том числе, обсуждаются применяемые оптические материалы (органические полимеры, напыляемые покрытия и стекла) и их пригодность для создания эффективных и долговечных устройств.

Ключевые слова: Дополненная Реальность, Дифракционные Оптические Элементы, Голография, Методы Производства

Введение

Прозрачные линзы-дисплеи, использующие световоды изображения, являются одним из наиболее широко используемых решений для носимых AR-устройств [1]. Ввод изображения в световод и последующий вывод в сторону глаза пользователя, как правило, осуществляется при помощи дифракционных оптических элементов. Наиболее распространенная схема реализации подобных устройств содержит три одномерные дифракционные решетки (ДР), как показано на рис. 1: две из них используются для ввода и вывода пучков изображения, третья — для их размножения, что позволяет увеличить угол обзора без уменьшения «eye box» [2]. ДР могут быть созданы либо в объеме самого световода (как правило методом голографической записи), либо вытравлены или нанесены на его поверхность. Дифракционная эффективность используемых решеток должна иметь минимальную зависимость от длины волны и угла падения, и также балансировать вклад пучков изображения, приходящих с разных направлений. В противном случае виртуальное изображение будет иметь неравномерную яркость и хроматические аберрации. Для того чтобы избежать подобных искажений, требуется использование метарешеток, состоящих из трехмерных нанозащитных элементов, каждый из которых выполняет роль субволновой антенны [3, 4]. Данный подход также позволяет использовать двумерные решетки, объединяющие в себе функции вывода и размножения пучков изображения.

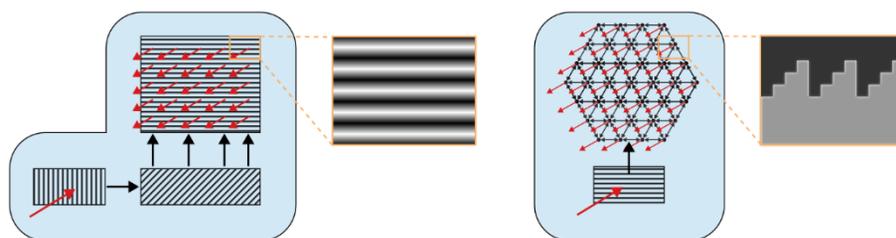


Рис. 1. Примеры световодов с одномерными объемными и двумерными поверхностными решетками

Изготовление ДР представляет собой сложную технологическую задачу, требующую создания дифракционных элементов нанометровых размеров на площади в несколько квадратных сантиметров. Наиболее перспективными подходами к решению этой задачи является использование наноимпринт литографии или контактного копирования голограмм [5, 6].

1. Наноимпринт литография

В основе технологии наноимпринт литографии лежит воспроизведение наноструктур с шаблона посредством механического изменения формы полимерного слоя, нанесенного на целевую подложку [7]. Главным преимуществом данного подхода является то, что он позволяет разделить трудоемкий этап создания наноструктур и их копирование. Создание штампа для дифракционных элементов остается сложной задачей, как правило, осуществляемой при помощи электронной литографии

и последующего химического или ионного травления подложки. Однако после его завершения, штамп может быть использован для быстрого и недорогого переноса наноструктур на поверхность целевых подложек методом термической или ультрафиолетовой наноимпринт литографии.

Основные этапы технологического процесса ультрафиолетовой наноимпринт литографии показаны на рис. 2. Прозрачный штамп погружается в слой наноимпринт резиста, нанесенного на подложку методом центрифугирования. После этого резист отверждается под воздействием ультрафиолета, а штамп может быть использован для создания следующей копии. Наноимпринт литография позволяет воспроизводить наноструктуры размером до 5–10 нм и среднестатистическим отклонением от заданных параметров меньше, чем 1 нм. Так как структуры создаются непосредственно в самом полимерном слое, используемый резист должен иметь подходящий показатель преломления и соответствовать технологическим требованиям наноимпринт литографии. Использование полимера в качестве активного слоя также делает подобные устройства более подверженными механическим повреждениям и воздействию внешней атмосферы (в первую очередь влаги), что требует нанесение дополнительного защитного слоя.

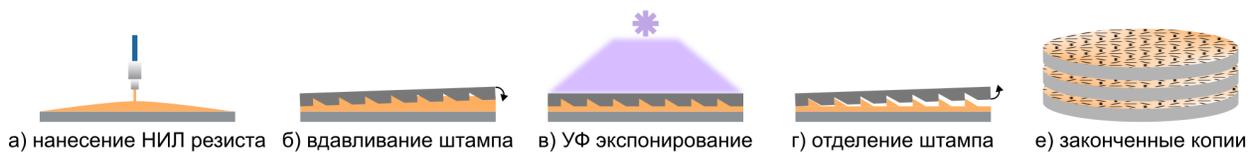


Рис. 2. Размножение рельефно-фазовых дифракционных решеток методом наноимпринт литографии

Альтернативным подходом к копированию рельефных решеток является использование наноимпринт резиста в качестве маски для травления подложки, однако он представляет свои трудности [7]. Во-первых, тонкий слой резиста, остающийся на поверхности подложки после наноимпринт литографии, должен быть удален без повреждения наноструктур. Во-вторых, необходимо найти процесс травления, способный перенести форму наноструктур из маски на подложку с минимальными искажениями критических параметров. Если нет возможности полностью избежать искажений, их можно компенсировать за счет изменения исходной маски, при условии, что тип искажений известен и хорошо воспроизводим при последующих травлениях.

2. Голографические дифракционные решетки

Одним из альтернативных подходов к созданию оптических модулей для AR-очков является классическая запись ДР либо за счет интерференции двух пучков, либо за счет копирования через маску [8]. В этом случае, как правило, используются фотополимеры (например, Bayfol). Однако этот подход проигрывает по сравнению с наноимпринт литографией, допускающей массовое производство ДР. Кроме того, использование фотополимеров требует защитных покрытий или дополнительных пластин. В университете ИТМО предложено использовать фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла для оптических модулей AR-дисплеев [9]. По сравнению с фотополимерами, они имеют высокую химическую устойчивость, механическую, термическую и оптическую прочность, а также абразивостойкость (как у оптического стекла К8). То есть защищать поверхность ДР не надо, т. к. запись голограммы происходит в объеме стекла (рис. 3). Поскольку ФТР стекло относится к сверхглубоким голографическим средам (т. е. запись происходит в образце толщиной несколько миллиметров), то это заметно снижает угол поля зрения для AR-модулей, т. е. для увеличения угла поля зрения необходимо записывать (мультиплексировать) несколько голограмм в ФТР стекле, что увеличивает трудоемкость.

Массовое производство голографических дифракционных элементов возможно с посредством контактного копирования [6], используемого компаниями Luminix и DigiLens. Светочувствительное покрытие наносится на подложку при помощи струйного принтера и затем облучается через голографический шаблон. Разработанная компанией DigiLens система состоит из набора оптических установок, использующий единую лазерную систему, и позволяет облучать до шести решеток (два набора из трех дифракционных решеток) за одну экспозицию, значительно сокращая время изготовления световодов. Данный подход пригоден для мелкосерийного производства, но не подходит для массового производства потребительских устройств.

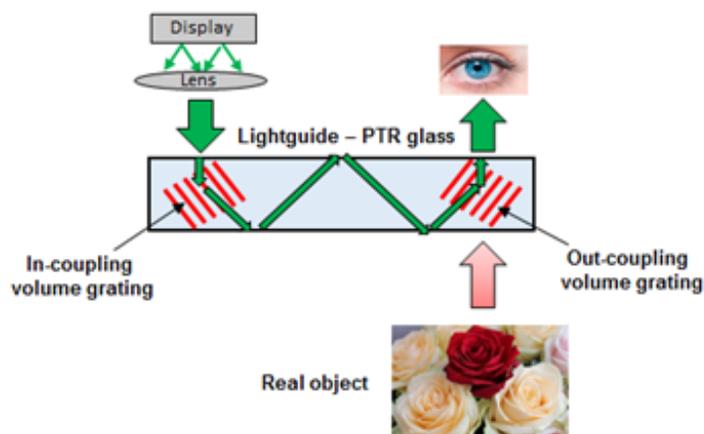


Рис. 3. Пример световодного комбинера для AR-очков на основе световодной пластины из ФТР стекла и брэгговских элементов ввода/вывода дополненного изображения [1]

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Kress, B. C.** Optical Architectures for Augmented-, Virtual-, and Mixed-Reality Headsets, SPIE Press Monograph / B. C. Kress // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Bellingham, Washington DC. — 2020. — PM316.
- [2] **Xiong, J.** Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives / J. Xiong, E.L. Hsiang, Z. He, T. Zhan, S.T. Wu // Light: Science & Applications. — 2021. — Vol 10(1). — P. 1–30.
- [3] **Alexeev, A.M.** Mass production of high-performance optics / A.M. Alexeev // WaveOptics. — 2023.
- [4] **Khaidarov, E.** Asymmetric nanoantennas for ultrahigh angle broadband visible light bending / E. Khaidarov, H. Hao, R. Paniagua-Domínguez, Y. F. Yu, Y. H. Fu, V. Valuckas, S. L. K. Yap, Y. T. Toh, J. S. K. Ng, A. I. Kuznetsov // Nano letters. — 2017. — Vol 17(10). — P. 6267–6272.
- [5] **Sreenivasan, S.V.** Low-cost nanostructure patterning using step and flash imprint lithography / S.V. Sreenivasan, C. G. Willson, N. E. Schumaker, D. J. Resnick // Nanostructure Science, Metrology, and Technology. — 2002. — Vol 4608. — P. 187–194.
- [6] **Chamberlin, G.R.** Contact Copying of Holographic Transmission Gratings / G. R. Chamberlin, D. J. McCartney // Holography Techniques and Applications. — 1989. — Vol 1026. — P. 64–68.
- [7] **Guo, L.J.** Nanoimprint lithography: methods and material requirements / L. J. Guo // Advanced materials. — 2007. — Vol 19(4). — P. 495–513.
- [8] **Aubrecht, I.** Recording of holographic diffraction gratings in photopolymers: theoretical modelling and real-time monitoring of grating growth / I. Aubrecht, M. Miler, I. Koudela // Journal of Modern Optics. — 1998. — Vol 45(7). — P. 1465–1477.
- [9] **Никоноров, Н.В.** Фототерморефрактивное стекло — перспективный материал фотоники (обзор) / Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, Е. С. Мусихина // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 3. — С. 68–100.

Fabrication of surface-relief and holographic diffraction gratings for augmented reality devices: comparative analysis

E. M. Alexeev, A.M.Alexeev, N. V. Nikonorov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Transparent lens-displays are one of the key components of Augmented Reality (AR) glasses. The most advanced method for creating these elements is based on the use of imaging waveguides, which employ either surface-relief or holographic diffraction gratings. While both types of these gratings are capable of delivering the desired optical performance, they require fundamentally different manufacturing approaches. In this report, we compare the advantages and limitations of surface-relief and holographic diffraction gratings from the perspective of producing commercial products. We will also discuss the optical materials used (organic polymers, deposited coatings, and glass) and their suitability for creating efficient and durable devices.

Keywords: Augmented reality, Diffractive optical elements, Holography, Fabrication techniques

Нанопористые силикатные матрицы для оптических экспериментов и высокочувствительной диагностики

О. В. Андреева^{1,2}, И. Ю. Щелканова¹, В. А. Пономарёва^{1,2}, А. О. Исмагилов^{1,2}, Н. В. Андреева², С. А. Сизова^{1,2}, М. В. Мельник², А. Н. Цыпкин^{1,2}

¹ООО «Оптические технологии контроля и диагностики», Санкт-Петербург, Россия

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлена информация о работе по созданию коммерческого продукта, которая направлена на отработку стабильных и воспроизводимых характеристик образцов нанопористых силикатных матриц. Такие матрицы могут быть использованы для исследования веществ в наноразмерном ограниченном объеме, создания оптофлюидных элементов различного назначения и в ряде других научно-технических областях, включая диагностику методом гигантского комбинационного рассеяния, усиленного поверхностью.

Ключевые слова: Оптика, Силикатные матрицы, Параметры нанопористых образцов, Спектральные характеристики, Свободный объем пор

Биография пористых силикатных стекол началась в середине XX в. — американская фирма Corning Glass наладила выпуск пористого стекла Vycor, которое используется до сих пор [1]. В Советском Союзе ведущие ученые-стекольщики в XX в. также активно работали в области исследования и создания так называемых двухфазных стекол, позволяющих изготавливать пористые образцы стекол [2].

Созданный в 1947 г. в рамках АН СССР Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова обеспечивал научную базу этих исследований, а стекольный завод «Красный гигант» (г. Пенза) выпускал двухфазное стекло различных модификаций (с разными характеристиками).

Усилиями большого количества специалистов разных направлений был реализован целый ряд практических приложений использования НПС для создания оптических элементов различного назначения [3].

Интерес к использованию НПС не снижается и в XXI в. — технический прогресс открывает новые горизонты для возможности их практического применения. К сожалению, на практике реализация таких возможностей сталкивается с отсутствием на рынке промышленного двухфазного стекла (марки ДВ). Внутренний спрос обеспечивается только небольшими партиями из уникальных лабораторий и имеющимися остатками стекла заводской варки, т. к. завод «Красный гигант» прекратил свое существование в начале 90-х, став одной из первых жертв среди гигантов стекольной промышленности Советского Союза.

Благодаря благоприятному стечению обстоятельств в распоряжении авторского коллектива оказалась большая часть варки стекла ДВ (одной из последних варок этого стекольного завода). Поэтому пришла идея запустить проект, направленный на отработку технологических режимов изготовления НПСМ и методов контроля их параметров с целью формирования современной технологической базы, для создания оптических элементов нового поколения на основе НПС с широким спектром возможностей. Проект был поддержан Фондом содействия инновациям.

Среди твердых нанопористых материалов нанопористые силикатные матрицы занимают особое место, так как обладают свойствами, широко востребованными в современных научно-технических разработках. Это высокая механическая и лучевая прочность в сочетании с высокой абсорбционной способностью и химической стабильностью; высокая прозрачность в видимой и ближней ИК областях спектра; возможность регулировки оптических свойств образцов введением в свободный объем пор веществ с заданным показателем преломления; возможность получения образцов различных геометрических размеров; возможность получения композитных материалов с рабочим веществом в виде отдельных изолированных наночастиц, распределенных в макрообъеме.

Нанопористые матрицы на основе силикатного стекла представляют собой совершенно особый, в своем роде уникальный, инструмент исследования физико-химических процессов в ограниченном нанобъеме, соизмеримом с масштабом протекания процессов и размерами изучаемых объектов. Ограниченность пространства и эффективный контакт со стенками пор обуславливают существенные особенности состояния вещества-наполнителя по сравнению со случаем его нахождения в свободном объеме.

Цель работы — создание коммерческого продукта — образцов НПСМ со стабильными и воспроизводимыми характеристиками. Такой продукт, по мнению авторов, поможет найти новые современные области применения НПСМ с учетом разработанных ранее технологий.

Процесс изготовления НПСМ относится к наиболее сложным и трудоемким технологическим процессам не только с точки зрения исходного материала, но и с точки зрения его обработки. Сле-

дует сказать, что стекло, особенно оптическое стекло, всегда являлось довольно дорогим материалом, но было широко востребовано, т. к. обеспечивало технологическую независимость страны во многих технических направлениях.

Двухфазное сырое стекло, которое является основой пористых силикатных матриц, проходит целый ряд технологических этапов для получения пористых образцов с заданными характеристиками. Проведение каждого этапа зависит от исходного состава стекла и, в свою очередь, определяет режим проведения последующих технологических процессов.

В данном сообщении мы хотим поделиться теми особенностями проведения технологических процессов изготовления НПСМ, которые обеспечивают их качество, а также обратить внимание на важность проведения контроля параметров НПСМ на всех этапах их изготовления по разработанному режиму.

Надо отметить, что многоступенчатый процесс изготовления НПСМ требует довольно жесткого соблюдения режимов проведения каждого процесса, связанного с изготовлением НПСМ. Первое, что необходимо сделать, это превратить двухфазное сырое стекло в двухкаркасное. Блок непрозрачного белого стекла путем соответствующей двухэтапной термообработки необходимо преобразовать в блок прозрачного стекла, в котором две его фазы (легкорастворимая и устойчивая) пространственно разнесены и представляют собой два каркаса, которые существуют в объеме образца в виде взаимопроникающих каналов. Из блоков двухкаркасного стекла изготавливают плоскопараллельные пластины толщиной 1 мм с габаритными размерами 15×20 мм, которые затем подвергают химической обработке. Первым этапом является обработка в соляной кислоте. Температурно-временной режим кислотной обработки подобран таким образом, что легкорастворимая, нестойкая, фаза практически полностью удаляется из образца, освобождая так называемые ликвационные каналы, ранее полностью заполненные легкорастворимой фазой. В таких образцах, которые называются НПСМ-1, внутри ликвационных каналов остаются наночастицы аморфного кремнезема, а свободный объем пор составляет 24–26 % объема образца. После кислотной обработки образцы НПСМ-1 могут быть подвергнуты дополнительной обработке в растворе щелочи для удаления из ликвационных каналов частиц аморфного кремнезема. Полученные образцы, НПСМ-2, имеют свободный объем пор (50–55 %) и представляют собой стойкий кремнеземный каркас, состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав сырого стекла ДВ и образцов НПСМ-2

Материал	SiO ₂ , %	B ₂ O ₃ , %	Na ₂ O, %
Стекло ДВ	67,8	25,1	6,2
НПСМ-2	91,4	7,4	1,2

Размер пор и величина объема образца, который они занимают, являются основными характеристиками изготавливаемых образцов НПСМ (табл. 2).

Таблица 2. Основные параметры изготавливаемых образцов НПСМ

Тип образца	Средний размер пор	Свободный объем пор
НПСМ-1	10 нм	24–26 %
НПСМ-2	25 нм	50–55 %

Здесь следует отметить, что определение размера пор (рис. 1) производится по БЭТ-методикам на специализированном оборудовании, что не может быть использовано для экспресс-диагностики, тем более в лабораторных условиях.

В лабораторных условиях, как правило, экспресс-диагностика производится путем определения свободного объема пор, для чего используется простая методика, разработанная в ИХСе, — определение свободного объема по весу образца в воздушно-сухом состоянии и при заполнении его водой. Проведенные исследования показали, что при экспресс-диагностике и сравнении качества полученных образцов в лабораторных условиях методика определения пористости обязательно должна быть дополнена измерениями спектрального пропускания образцов видимой области спектра. Это связано с тем, что образцы с одинаковой пористостью могут различаться по величине пропускания на разных длинах волн из-за различия рассеивающих свойств внутренней структуры образца на различных участках спектра. Таким образом, как показали проведенные исследования более полной характеристикой образцов, является спектр пропускания в видимой области спектра (рис. 2, табл. 2).

Образцы НПСМ–1 и НПСМ–2 имеют различную внутреннюю структуру, что влияет на их рассеивающие свойства, особенно это сказывается в коротковолновой области спектра, где пропускание образцов НПСМ–2, при наличии промежуточной обработки может быть существенно ниже, чем образцов НПСМ–1. В то же время в длинноволновой области видимого спектра типичные образцы обоих типов имеют высокое пропускание (рис. 2, табл. 3).

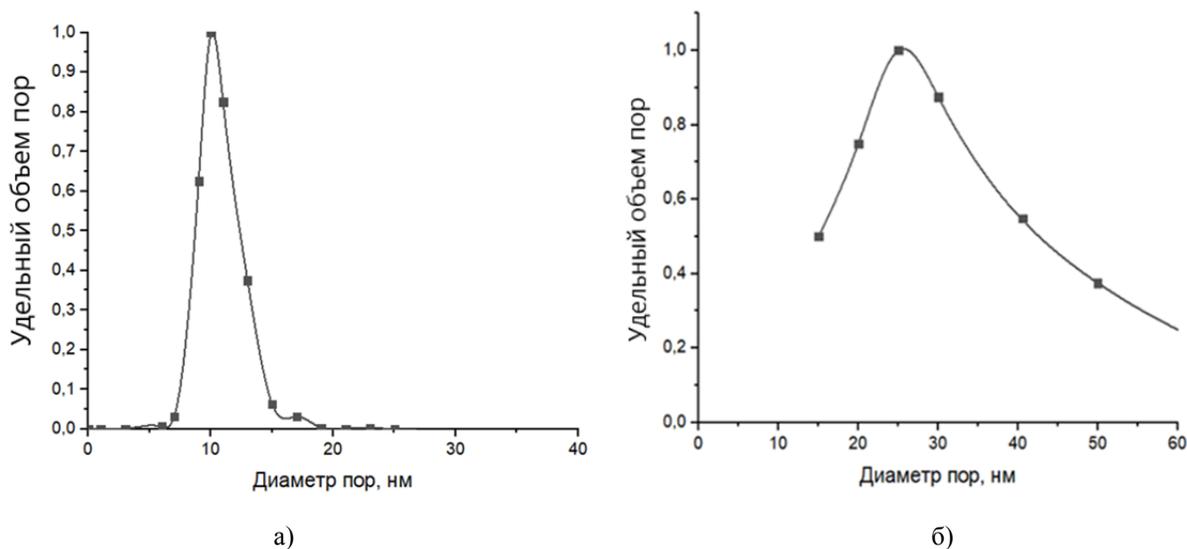


Рис. 1. Распределение пор по размерам в образцах НПСМ-1 (а) и НПСМ-2 (б)

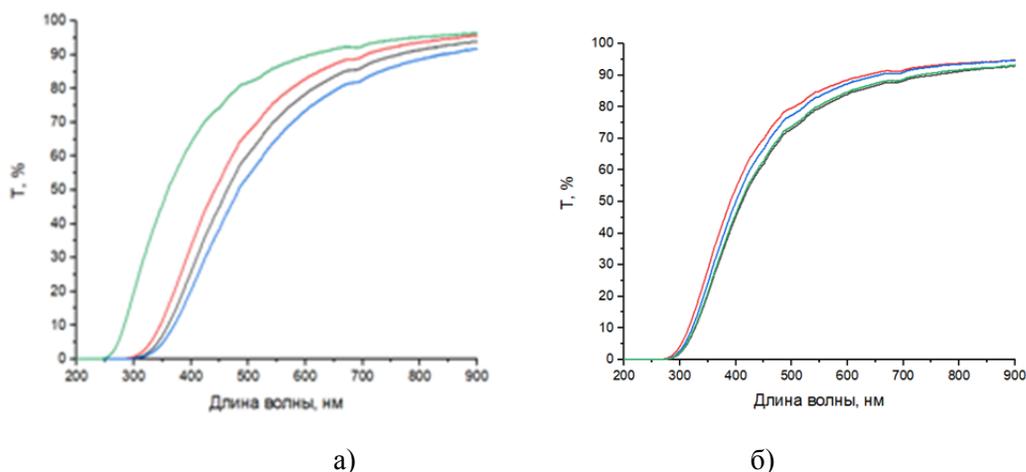


Рис. 2. Спектры пропускания образцов НПСМ-1 (а) и НПСМ-2 (б)

Величина пропускания типичных образцов НПСМ, изготовленных по разработанному режиму приведено в таблице 3.

Таблица 3. Пропускание изготавливаемых образцов НПСМ в видимой области спектра.

λ , нм	Т, %	
	НПСМ–1	НПСМ–2
400	>35	>25
600	>80	>70
800	>85	>85

Два типа НПСМ, благодаря разнице в параметрах, востребованы по-разному. Образцы НПСМ–2 со свободными ликвационными каналами стали основой создания нового класса регистрирующих сред для трехмерной голографии [4]. НПСМ–1 в настоящее время нашли применение при создании

элементов оптофлюидики методом уплотнения/разуплотнения внутренней структуры образцов [5]. Случайно-неоднородная структура шероховатой поверхности образцов НПСМ-1 оказалась востребованной при создании подложек для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния, усиленного поверхностью (SERS) [6]. На рис. 3 приведены результаты исследования поверхности НПСМ-1 с помощью атомно-силового микроскопа (методика АСМ).

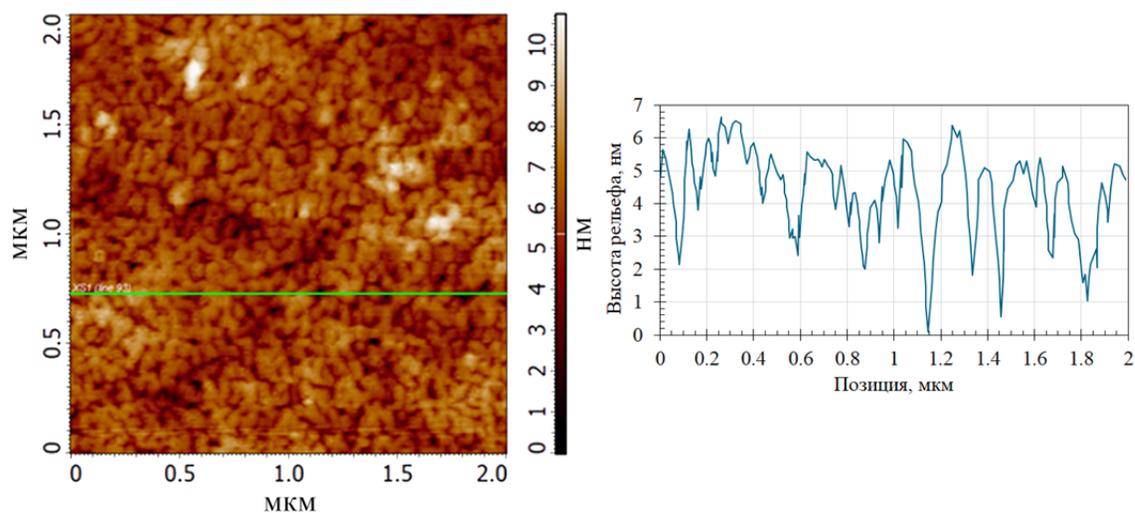


Рис. 3. Топография (слева) и профиль образца (справа) НПСМ-1

Получены следующие результаты: Среднее значение шероховатости — 0,996 нм; максимальный перепад высот — 10,720 нм, (среднеквадратичное отклонение, СКО — 1,25 нм).

Образцы НПСМ были использованы в ряде экспериментов и показали свои возможности при создании оптофлюидных элементов методом уплотнения/разуплотнения [4]. В качестве подложек для метода ГКР, усиленного поверхностью [5], при исследовании квантовых точек и нанокристаллов и в ряде других экспериментов. Авторы надеются, что появление на рынке в качестве коммерческого продукта образцов НПСМ со стабильными и воспроизводимыми характеристиками позволит найти новые области практического использования НПСМ в современных условиях, а также может провоцировать выпуск двухфазного стекла, необходимого для их изготовления.

Благодарность

Исследование поддержано федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» Проект № 89650, заявка № С1–313366.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Rybaltofsky, A. O.** Femtosecond Laser Fabrication of Silver Microstructures in Nanoporous Glasses / A. O. Rybaltofsky, E. O. Epifanov, V. N. Sigaev, S. S. Fedotov, V. I. Yusupov, N. V. Minaev // *Photonics*. — 2023. — Том 10. — № 9. — С. 1055. — DOI: 10.3390/photonics10091055.
- [2] **Молчанова, О. С.** Натриевоборосиликатные и пористые стекла / О. С. Молчанова // *Оборонгиз*. — 1961.— С. 164.
- [3] **Мешковский, И.К.** Композиционные оптические материалы на основе пористых матриц / И. К. Мешковский // СПб: Изд. СПбГИТМО (ТУ). — 1998.— С. 332.
- [4] **Суханов, В. И.** Объемные капиллярные регистрирующие среды со скрытым изображением / В. И. Суханов, М. В. Хазова, А. М. Курсакова, О. В. Андреева// *Оптика и спектроскопия*. — 1988. — Том 65. — № 2. — С. 474–478.
- [5] **Шишкина, А. С.** Гибридная лазерная субтрактивная технология формирования оптофлюидных элементов в нанопористой силикатной матрице /А. С.Шишкина., Я. Алсаиф, В. А, Якимук, Ч. Ли, О. В. Андреева, Р. А. Заколдаев // *Оптический журнал*. — 2023. — Том 90. —№ 4.— С. 78–91.
- [6] **Андреева О. В.** Нанопористые силикатные матрицы для голографии и биомедицины / О. В. Андреева, Е. П. Быков, А. О. Исмагилов, А. Н. Panda, И. Ю. Щелканова, Н. В. Андреева // *Оптика и спектроскопия*. — 2021. — Том 129. — № 4. — С. 418–426.

Nanoporous silicate matrices for optical experiments and highly sensitive diagnostics

O. V. Andreeva^{1,2}, I. Y. Shchelkanova¹, V. A. Ponomareva^{1,2}, A. O. Ismagilov^{1,2}, N. V. Andreeva², S. A. Sizova^{1,2}, M.V. Melnik², A.N. Tsypkin^{1,2}

¹ООО "Optical technologies of control and diagnostics", St. Petersburg

²ITMO University, St. Petersburg

Information is provided on the work on the creation of a commercial product, which is aimed at developing stable and reproducible characteristics of samples of nanoporous silicate matrices. Such matrices can be used for the study of substances in a nanoscale limited volume, the creation of optofluidic elements for various purposes and in a number of other scientific and technical fields, including diagnostics by the method of giant surface-enhanced Raman scattering.

Keywords: Optics, Silicate matrices, Parameters of nanoporous samples, Spectral characteristics, Free pore volume

Жидкокристаллические полимерные материалы с фото- и механически-управляемыми оптическими свойствами

Н. В. Баленко^{1,2}, А. Ю. Бобровский¹, В. П. Шибяев¹

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Разработаны новые функциональные материалы на основе эластичных полимерных матриц (полиуретан, поливиниловый спирт), содержащих капли диспергированных в них жидких кристаллов, образующих холестерический тип мезофазы. Пленки композитов обладают селективным отражением света в видимой области спектра и их цветом можно управлять с помощью механической деформации. Использование фоточувствительных жидкокристаллических смесей позволяет получать многофункциональные материалы, способные изменять свои оптические свойства под воздействием и УФ-света и механической деформации. Это открывает широкие возможности практического применения таких материалов.

Ключевые слова: Холестерические жидкие кристаллы, Композиционные полимерные материалы, Механооптический отклик, Фотохромизм, Селективное отражение света

Одними из наиболее перспективных классов стимул-чувствительных материалов являются холестерические жидкие кристаллы (ХЖК), характеризующиеся спиральной надмолекулярной структурой (рис. 1а). Они обладают селективным отражением света с длиной волны λ_{\max} прямо пропорциональной шагу спирали P : $\lambda_{\max} = nP$ (n — средний показатель преломления). Шаг спирали ХЖК подвержен влиянию электрического поля, температуры, света, механической деформации и др. Целью данной работы являлось разработка и исследование ХЖК-содержащих полимерных материалов, способных изменять свои оптические свойства под действием механической деформации и облучения светом.

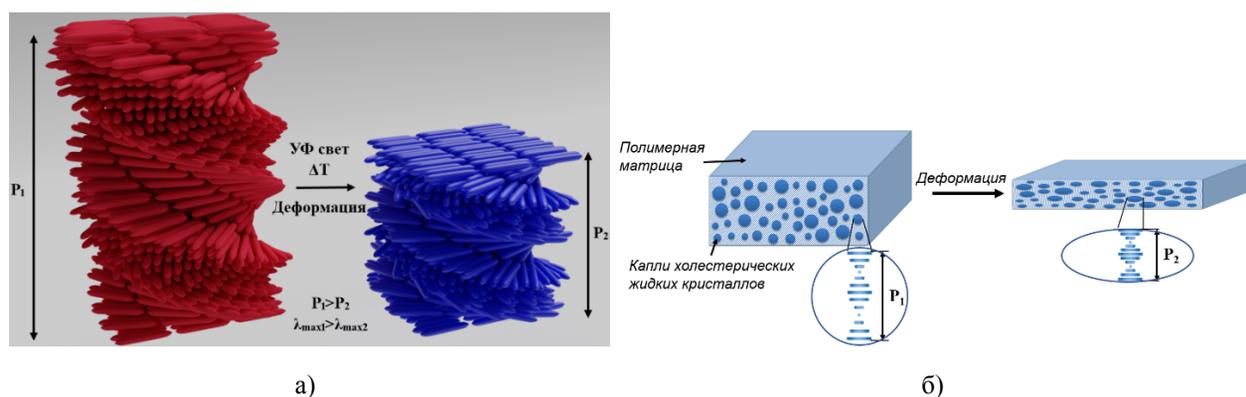


Рис. 1. Схематическое изображение трансформации ХЖК структуры при воздействии внешних факторов: а) в отдельном ХЖК; б) в композите, содержащем капли ХЖК

В работе приготовлены ХЖК смеси производных холестерина (табл. 1). Подбор составов смесей позволил получить пик селективного отражения света в видимой области спектра.

Таблица 1. Состав ХЖК смесей (величины в масс. %)

№	Холестрил-пеларгонат	Холестрил-валериат	Холестерил-хлорид	Холестерил-стеарат	CinSorb
1	48.0	25.0	25.0	2.0	
2	47.3	24.7	20.7	2.3	5.0

Эластичные полимерные пленки, содержащие ХЖК капли микронных размеров (рис. 1б) готовили на основе полиуретана (ПУ) и поливинилового спирта (ПВС), пластифицированного глицерином.

При одноосном растяжении пленок композитов со скоростью 700 мм/мин пик селективного отражения света смещается в коротковолновую область спектра на ~100 нм на первом этапе растяжения (рис. 2а), а при дальнейшем удлинении — в сторону исходных длин волн (рис. 2б). Интенсивность отражения в ходе растяжения увеличивается.

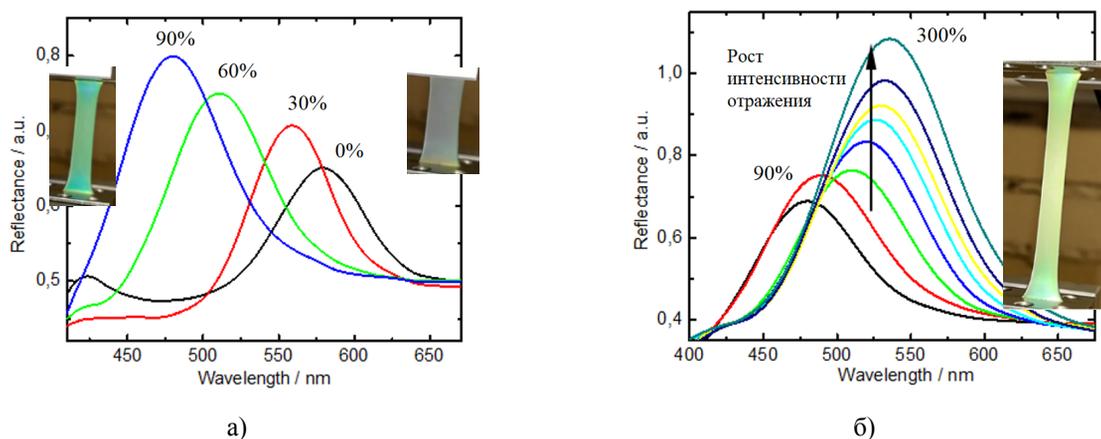


Рис. 2. Спектры отражения ПУ композита, содержащего 10 % смеси ХЖК (№1, табл. 1), в зависимости от степени растяжения (указана на рисунке). На вставках показаны фото образца с разной степенью деформации: а) растяжение 0–90 %; б) растяжение 90–300 %

Предложен механизм изменения оптических свойств пленок композитов, при растяжении связанный с механически индуцированным уменьшением шага спирали и его последующей релаксацией [1, 2].

Был разработан подход к созданию полимерных материалов с двойным механо- и фотохромным эффектом. Для этого в состав ХЖК смеси вводили хирально-фотохромный допант — производное коричной кислоты и изосорбида CinSorb (смесь 2, табл. 1). Он содержит две двойные связи, способные необратимо изомеризоваться под действием УФ света. Изомеризация приводит к изменению шага спирали холестерика и сдвигу пика отражения в коротковолновую область спектра более чем на 100 нм. Благодаря этому появляется возможность, облучая пленку композита через маску, записывать буквенные или цифровые изображения (рис. 3а), которые могут быть стерты при облучении всей пленки без маски (рис. 3б).



Рис. 3. Фотографии пленки на основе ПВХ, содержащей 11 % ХЖК смеси с хирально-фотохромным допантом: а) облученная УФ светом через маску; б) облученная УФ светом без маски

Кроме того, были разработаны композиты, на которые можно записывать скрытые изображения, проявляющиеся при деформации композита. Для этого использовали ХЖК смесь с селективным отражением в ИК области (1110 нм). Облучением УФ светом через маску записывали невидимую надпись с пиком отражения в ближней ИК области (816 нм). При растяжении такого композита происходит смещение пика отражения в видимую область спектра на ~100 нм, что позволяет визуализировать облученную область [3].

Таким образом, в работе получены новые многофункциональные стимул-чувствительные материалы, которые при воздействии сразу нескольких внешних факторов способны изменять свои оптические свойства. Эти материалы могут найти практическое применения для создания датчиков различных видов деформаций (растяжение, изгиб, пульсация), датчиков света требуемой длины волны, защитных устройств со скрытыми изображениями, визуализируемыми при простом растяжении пленок.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (22-13-00055).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Balenko, N. V.** Mechano-optical response of novel polymer composites based on elastic polyurethane matrix filled with low-molar-mass cholesteric droplets / N. V. Balenko, V. P. Shibaev, A. Yu. Bobrovsky // *Macromolecular Materials and Engineering*. — 2021. — Vol 306. — № 10. — P. 2100262. — DOI: 10.1002/mame.202100262.
- [2] **Balenko, N. V.** Mechanosensitive polymer-dispersed cholesteric liquid crystal composites based on various polymer matrices / N. V. Balenko, V. P. Shibaev, A. Yu. Bobrovsky // *Polymer*. — 2023. — Vol 281. — № 126119. — DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126119.
- [3] **Balenko, N. V.** Polymer dispersed cholesteric liquid crystals with combined photo- and mechanochromic response / N. V. Balenko, V. P. Shibaev, A. Yu. Bobrovsky // *Journal of Molecular Liquids*. — 2024. — Vol 401. — № 124637. — DOI: 10.1016/j.molliq.2024.124637

Liquid crystalline polymer materials with photo- and mechanically controlled optical properties

N. V. Balenko^{1,2}, A. Yu. Bobrovsky¹, V. P. Shibaev¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

New functional materials based on elastic polymer matrices (polyurethane, polyvinyl alcohol) containing dispersed droplets of liquid crystals forming a cholesteric type of mesophase have been developed. The films of these composites exhibit selective light reflection in the visible spectrum and their color can be controlled by mechanical deformation. The use of photosensitive liquid crystal mixtures allows one the creation of multifunctional materials capable of altering their optical properties under the influence of both UV light and mechanical deformation. This opens up wide possibilities for practical applications of such materials.

Keywords: *Cholesteric liquid crystals, Composite polymer materials, Mechanical-optical response, photochromism, Selective light reflection*

Динамические фоторефрактивные голограммы в диффузионно-легированных кристаллах ниобата лития: технология и применение

С. М. Шандаров, А. А. Колмаков, Р. И. Анисимов, Э. Комов, А. С. Темерева, Н. И. Буримов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Представлены результаты экспериментов по термической диффузии меди в пластины X-среза ниобата лития, а также численного анализа и экспериментального исследования формирования в них фоторефрактивных голограмм за счет фотовольтаического механизма перераспределения заряда. Подтверждена возможность агрегации наночастиц на поверхности полученных диффузионных структур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ за счет эванесцентных электрических полей сформированных в них фоторефрактивных динамических голограмм.

Ключевые слова: термическая диффузия, Ниобат лития, Фотовольтаический эффект, Фоторефрактивные динамические голограммы, Агрегирование наночастиц

Введение

Кристаллы ниобата лития LiNbO_3 и наблюдающиеся в них физические явления продолжают оставаться предметом исследований с целью реализации устройств для оптоэлектронных и телекоммуникационных систем [1, 2], генерации электронных пучков, рентгеновского и нейтронного излучения [3, 4], технологии фотовольтаических пинцетов [5, 6], нелинейных преобразований лазерного излучения [7, 8], узкополосной оптической фильтрации [9], и других приложений. Легирование ниобата лития соответствующими примесями позволяет в широких пределах подавлять или увеличивать его фоторефрактивную чувствительность и снижать коэрцитивное поле [10]. При легировании LiNbO_3 ионами железа и меди происходящее увеличение фотовольтаических свойств делает возможным формирование в них эффективных фоторефрактивных динамических голограмм, обусловленных перераспределением зарядов по примесным донорным и ловушечным центрам, приводящим к созданию пространственно-неоднородных электрических полей с амплитудой напряженности до 100 кВ/см [11]. В пластинах из легированных кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ такие фоторефрактивные голограммы создают над их поверхностями эванесцентные электрические поля, обеспечивающие силы для захвата микро- и нанобъектов. Такие устройства получили название фотовольтаических пинцетов, их преимуществом является низкая интенсивность используемого лазерного излучения [12]. Одним из методов создания образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с высокими фоторефрактивными свойствами является термическая диффузия меди в пластины нелегированного ниобата лития [6, 13, 14].

Целью настоящей работы является экспериментальные исследования термической диффузии меди в пластины X-среза ниобата лития и формирования в них фоторефрактивных голограмм за счет фотовольтаического механизма перераспределения заряда. Для полученных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ подтверждена возможность их использования в технологии фотовольтаического манипулирования микро- и наночастицами.

1. Термическая диффузия меди

В экспериментах использовались монокристаллические пластины LiNbO_3 X-среза, имеющие размеры $1,33 \times 4,44 \times 12,42$ мм³ по осям x , y и z соответственно. Для легирования пластин методом магнетронного напыления на обе оптически полированные X-плоскости кристалла наносились пленки меди с толщиной 800 нм. Далее проводилась термическая диффузия в воздушной атмосфере в трубчатой электропечи СУОЛ-0,4/12 на карбидокремниевых нагревателях в течение 8 часов для первой и 12 часов для второй пластины, при температуре 600 °С. Скорости нагрева образцов составляли 5 °С/мин; естественное охлаждение после проведения диффузии осуществлялось в течение 12 часов; остатки пленки оксида меди с пластин удалялись с помощью их выдерживания в растворе уксусной кислоты (70 %) при температуре 80 °С.

2. Распределение концентрации ионов меди в пластинах

Распределения ионов меди в образцах, которые экспериментально определялись по зависимостям показателей поглощения от глубины x на длинах волн $\lambda = 532$ и 808 нм в предположении, что основной вклад в них вносят ионы Cu^+ и Cu^{2+} соответственно [6], представлены на рис. 1.

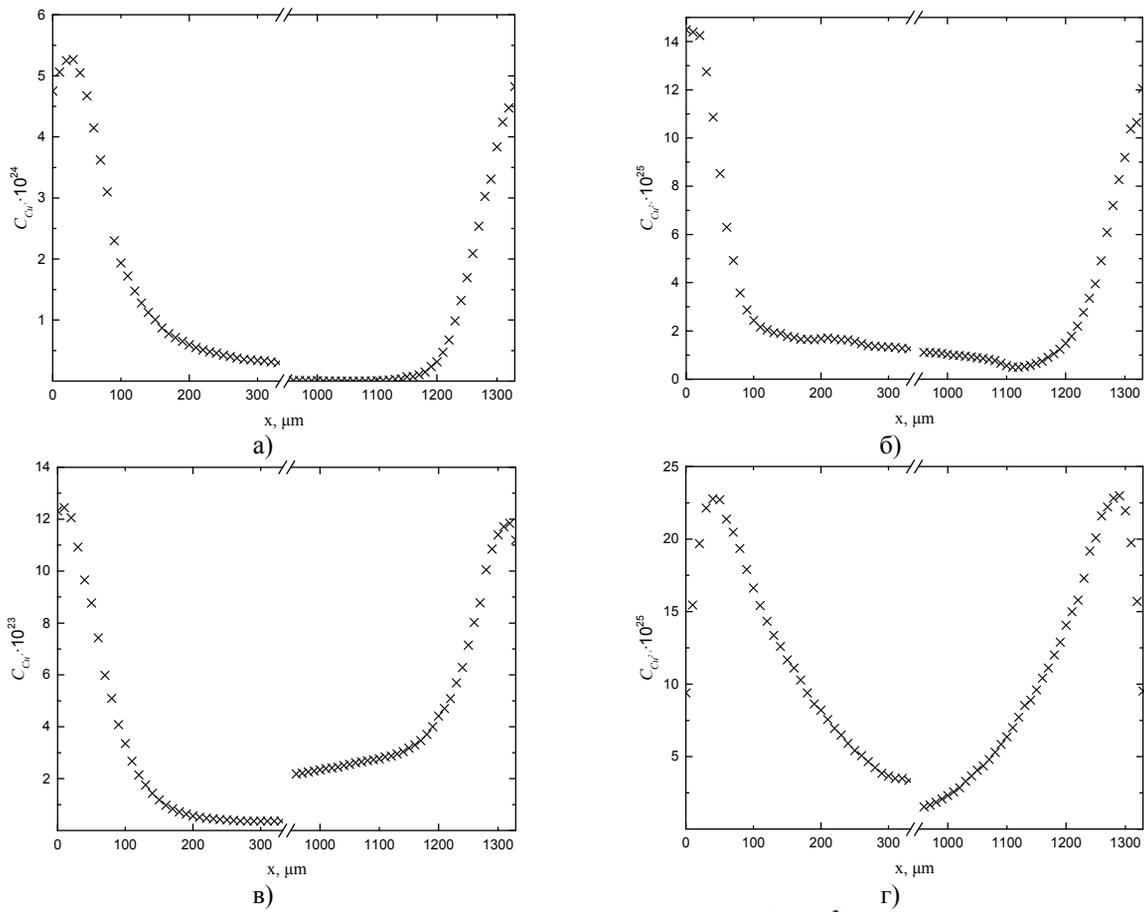


Рис. 1. Профили распределения ионов меди в зарядовых состояниях Cu^+ и Cu^{2+} в образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза: а) зависимость концентрации Cu^+ от координаты x в образце 1; б) зависимость концентрации Cu^{2+} от координаты x в образце 1; в) зависимость концентрации Cu^+ от координаты x в образце 2; г) зависимость концентрации Cu^{2+} от координаты x в образце 2

Как видно, максимумы концентрации донорных (Cu^+) и ловушечных (Cu^{2+}) центров в полученных образцах $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ локализованы вблизи их границ, а рост времени диффузии для второго образца до 12 часов приводит к изменению абсолютных значений концентрации: уменьшению для Cu^+ и увеличению для Cu^{2+} .

3. Динамика формирования фоторефрактивных голограмм

Результаты проведенных экспериментов по динамике формирования фоторефрактивной решетки с пространственным периодом $\Lambda = 10$ мкм, записанной картиной интерференции двух волн, представлены точками на рис. 2. Следуя [15], начальные участки формирования решеток аппроксимировались степенной функцией $\eta(t) = bt^2 + ct^3$ с параметрами $b = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-2}$, $c = -1,12 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-3}$ для первого образца и $b = 7 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-2}$, $c = -1,9 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-3}$ – для второго.

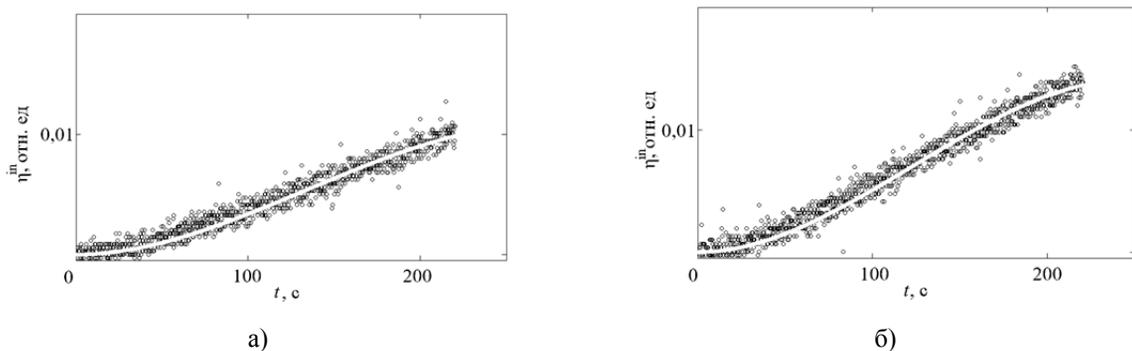


Рис. 2. Аппроксимация временной зависимости роста дифракционной эффективности решетки с $\Lambda = 10$ мкм на начальном участке: а) образец 1; б) образец 2

Расчет по соотношениям из [15] и экспериментальным данным для b констант Гласса позволил получить их оценку как $G_0 = 1,9 \cdot 10^{-12}$ м/В и $G_0 = 2,4 \cdot 10^{-12}$ м/В для образцов 1 и 2 соответственно, что является близким по порядку величины к значению $5,5 \cdot 10^{-12}$ м/В, приведенному в [10] для объемно-легированных образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

4. Моделирование пространственного распределения и динамики поля пространственного заряда

Распределения поля пространственного заряда по глубине образцов 1 и 2 для различных моментов времени, рассчитанные с использованием уравнений модели [16], представлены на рис. 3.

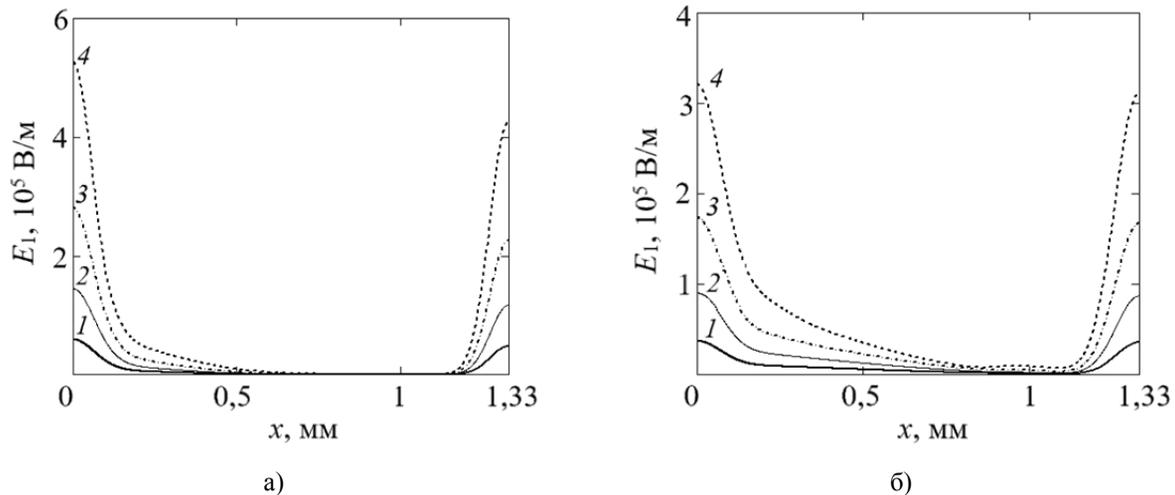


Рис. 3. Распределения амплитуды поля первой пространственной гармоники фоторефрактивной решетки для образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ 1 и 2 при записи интерференционной картины со средней интенсивностью $J=194$ мВт/см², контрастом $m \approx 0,98$, периодом $\Lambda = 10$ мкм и временем формирования $t_w = 10$ с (1), 25 с (2), 50 с (3) и 100 с (4): а) образец 1; б) образец 2

Из него следует, что в обоих образцах, при близком характере распределений донорных и ловушечных центров (рис. 1), наблюдается монотонный рост во времени амплитуды первой пространственной гармоники $E_1(x, t_w)$ по всей их глубине. При этом максимальное значение этой амплитуды достигается на границах структур $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ $x = 0$ и $x = d$, обеспечивая над ними, при $x \leq 0$ и $x \geq d$, значительные эванесцентные поля с амплитудами более 0,3 МВ/м при временах записи $t_w > 60$ с. Таким образом, полученные диффузионно-легированные образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X -среза с близкими распределениями донорных (Cu^+) и ловушечных (Cu^{2+}) центров и с максимумами, локализованными вблизи их границ, позволяющие формировать фоторефрактивные голограммы со значительными амплитудами эванесцентных полей, являются перспективными для реализации фотовольтаических пинцетов, предназначенных для манипуляции микро- и нанообъектами за счет диэлектростатических сил.

Заключение

Таким образом, методом термической диффузии меди в пластины X -среза ниобата лития из металлических пленок получены образцы $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, позволяющие формировать в них фоторефрактивные динамические голограммы. Распределение по глубине x ионов меди в зарядовых состояниях Cu^+ и Cu^{2+} изучалось по поглощению лазерного излучения с длинами волн 532 и 808 нм; получено, что максимумы концентрации этих ионов локализованы вблизи границ пластин $x = 0$ и $x = d$. Исследование динамики формирования фоторефрактивных решеток позволили оценить для полученных диффузионных структур константы Гласса, которые близки к литературным данным для образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ с объемным легированием. Проведенное численное моделирование распределения по глубине и динамики поля пространственного заряда фоторефрактивных решеток продемонстрировало возможность получения над границами образцов эванесцентных полей с амплитудами более 0,3 МВ/м, что делает полученные диффузионные структуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ перспективными для развития на их основе технологии фотовольтаических пинцетов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023–2025 гг. (задание FEWM-2023-0012) и программы «Приоритет 2030».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Qi, Y. Integrated lithium niobate photonics / Y. Qi, Y. Li // *Nanophotonics*. — 2020. — Vol 9. — № 6. — P. 1287–1320.
- [2] Агрузов, П. М. Ниобат лития как платформа для создания интегрально-оптических устройств радиофотоники / П. М. Агрузов, И. В. Ильичев, А. А. Усикова, А. В. Тронеv, А. В. Варламов, М. В. Парфенов, А. В. Шамрай // *Фотон-экспресс*. — 2023. — № 6. — С. 124–125.
- [3] Kukhtarev, N. Pyroelectric and photogalvanic crystal accelerators / N. Kukhtarev, T. Kukhtareva, G. Stargell, J. Wang // *Journal of Applied Physics*. — 2009. — Vol 106. — № 1.
- [4] Geuther, J. A. Enhanced neutron production from pyroelectric fusion / J. A. Geuther, Y. Danon // *Applied Physics Letters*. — 2007. — Vol 90. — № 17.
- [5] Villarroel, J. Photovoltaic versus optical tweezers / J. Villarroel, H. Burgos, Á. García-Cabañes, M. Carrascosa, A. Blázquez-Castro, F. Agulló-López // *Optics express*. — 2011. — Vol 19. — № 24. — P. 24320–24330.
- [6] Мамбетова, К. М. Агрегирование диэлектрических наночастиц на X-срезе кристалла $\text{LiNbO}_3 : \text{Cu}$ электрическими полями фоторефрактивных голограмм / К. М. Мамбетова, С. М. Шандаров, А. И. Татъянников, С. В. Смирнов // *Известия высших учебных заведений. Физика*. — 2019. — Том 62. — № 4. — С. 89–93.
- [7] Ferraro P. Ferroelectric crystals for photonic applications / P. Ferraro, S. Grilli, P. De Natale, eds. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. — 2009.
- [8] Shur, V. Y. Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate / V. Y. Shur, A. R. Akhmatkhanov, I. S. Baturin // *Applied Physics Reviews*. — 2015. — Vol 2. — № 4.
- [9] Канаев, И. Ф. Узкополосные голографические интерференционные фильтры на LiNbO_3 / И. Ф. Канаев, В. К. Малиновский, Н. В. Суровцев // *Физика твердого тела*. — 2000. — Том 42. — № 11. — С. 2079–2084.
- [10] Volk, T. Lithium niobate: defects, photorefractive and ferroelectric switching / T. Volk, M. Wöhlecke. — Springer Science & Business Media 2008. — Vol 115.
- [11] Петров, М. П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М. П. Петров, С. И. Степанов — Наука. С.-Петербург. — 1992.
- [12] Blázquez-Castro, A. Biological applications of ferroelectric materials / A. Blázquez-Castro, A. García-Cabañes, M. Carrascosa // *Applied Physics Reviews*. — 2018. — Vol 5. — № 4.
- [13] Peithmann, K. Photorefractive properties of LiNbO_3 crystals doped by copper diffusion / K. Peithmann, J. Hukriede, K. Buse, E. Krätzig // *Physical Review B*. — 2000. — Vol 5. — № 7. — P. 4615.
- [14] Мамбетова, К. М. Динамика формирования пропускающих голограмм в кристаллах ниобата лития, легированных медью методом высокотемпературной диффузии / К. М. Мамбетова, Н. Н. Смаль, С. М. Шандаров, Л. Н. Орликов, С. И. Арестов, С. В. Смирнов // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2014. — Том 57. — № 8–9. — С. 675.
- [15] Мамбетова, К. М. Формирование динамических фоторефрактивных решеток в кристалле $\text{LiNbO}_3 : \text{Cu}$ с поверхностным легированием / К. М. Мамбетова, С. М. Шандаров, Л. Н. Орликов, С. И. Арестов, С. В. Смирнов, Л. Я. Серебренников, В. А. Краковский // *Оптика и спектроскопия*. — 2019. — Том 126. — № 6. — С. 858.
- [16] Анисимов, Р. И. Объемные пропускающие голограммы в кристаллах ниобата лития с поверхностным легированием медью для реализации фотовольтаических пинцетов / Р. И. Анисимов, А. С. Темерева, А. А. Колмаков, С. М. Шандаров // *Оптика и спектроскопия*. — 2023. — Том 131. — № 10.

Dynamic photorefractive holograms in diffusion-doped lithium niobate crystals: technology and application

S. M. Shandarov, A. A. Kolmakov, R. I. Anisimov, E. Komov, A. S. Temereva, N. I. Burimov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

The results of the experiments on the thermal diffusion of copper into X-cut lithium niobate plates, as well as of the numerical analysis and experimental studies of the formation of photorefractive holograms in them due to the photovoltaic mechanism of charge redistribution are presented. The possibility of aggregation of nanoparticles on the surface of $\text{LiNbO}_3 : \text{Cu}$ plates due to the evanescent electric fields of the photorefractive dynamic holograms formed in them has been experimentally confirmed.

Keywords: *Thermal diffusion, Lithium niobate, Photovoltaic effect, Photorefractive dynamic holograms, Nanoparticle aggregation*

Модификация поверхности фото-термо-рефрактивного стекла методами ионного обмена и химического травления

Н. В. Никоноров, Х. Алхалаби, Д. В. Марасанов, Е. М. Сгибнев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла представляют собой среду для записи сверхглубоких объемных голографических оптических элементов, в которой под действием излучения и термообработки, т. е. в результате фото-термо-индуцированной кристаллизации, формируются металлические наночастицы серебра и оболочки в виде галогенидов серебра и фторида натрия. Различие в показателях преломления матрицы стекла и нанокристаллов галогенидов позволяет записывать в объеме ФТР стекла высокоэффективные брэгговские решетки. В работе предложены две технологии по модификации поверхности ФТР стекол: низкотемпературный ионный обмен и фотохимическое травление. Также представлена комбинация этих технологий с фото-термо-индуцированной кристаллизацией стекла. Такая модификация позволяет увеличивать механическую, термическую и оптическую прочность брэгговских решеток на основе ФТР стекла, а также создавать 3D полые микроструктуры и волноводы.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Голографические оптические элементы, Ионный обмен, Фотохимическое травление

Введение

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла представляют собой среду для записи сверхглубоких объемных голографических оптических элементов (ГОЭ), в которой под действием излучения и термообработки, т. е. в результате фото-термо-индуцированной кристаллизации, формируются нанокристаллы фторида натрия. Различие в показателях преломления матрицы стекла и нанокристаллов позволяет записывать в объеме ФТР стекла высокоэффективные брэгговские решетки (БР), которые используются для задач фотоники. Сегодня ГОЭ и устройства на основе ФТР стекла крайне востребованы на рынке фотоники. Так, на основе ФТР стекла разработана широкая линейка ГОЭ и устройств [1]:

- сверхузкополосные спектральные ($< 10 \text{ см}^{-1}$) и высокоселективные пространственные ($< 0,1 \text{ мрад}$) фильтры для рамановской спектроскопии для повышения спектральной яркости и температурной стабильности полупроводниковых лазеров, для селекции лазерных мод и создания одночастотных твердотельных лазеров;
- фазовые пластины для формирования оптических вихревых лазерных пучков, используемых для увеличения полосы пропускания телекоммуникационных каналов;
- голографические призмы на основе мультиплексных брэгговских решеток для калибровки высокоточных угловых приборов в системах позиционирования;
- оптические модули для очков и нашлемных устройств дополненной реальности (AR-модули) на основе монолитной интеграции световодной пластины из ФТР стекла и записанных в ней мультиплексных голограмм для ввода и вывода информации;
- чирпированные решетки для компрессии световых импульсов;
- сумматоры мощных лазерных пучков.

Такая нарастающая популярность ФТР стекол обусловлена прежде всего преимуществами этих стекол по сравнению с известными коммерческими голографическими материалами. К ним можно отнести следующие. БР могут быть записаны на большой глубине (0,1–10 мм) и иметь высокую дифракционную эффективность (до 99,9 %), а также рекордную угловую ($< 0,1 \text{ мрад}$) и спектральную ($\Delta\lambda < 0,01 \text{ нм}$) селективность. ГОЭ обладают высокой химической устойчивостью, абразивостойкостью, оптической, механической и термической прочностью, которые близки коммерческому оптическому стеклу К8. ФТР стекло выдерживает воздействие мощного непрерывного (до 100 кВт/см^2) и импульсного (до 40 Дж/см^2) лазерного излучения, т. е. пороги оптического пробоя ФТР стекла близки к порогам пробоя коммерческого оптического стекла К8. Также стоит отметить, что БР могут выдерживать многократный нагрев до высоких температур ($+500 \text{ C}$) и охлаждение до минусовых температур (-30 C и более) без потери своих характеристик. К преимуществам ФТР стекол можно отнести то, что они допускают применение традиционных методов механической обработки — шлифование и полирование, а также разнообразные технологии формования (прессование, молирование). Также возможна вытяжка оптического волокна из ФТР стекла. Изготовление ФТР стекла можно осуществлять как в лабораторных (до 5–10 кг), так и в промышленных (до 300 кг)

условиях с использованием простой и нетоксичной технологии. При этом химические реактивы, необходимые для синтеза стекла, являются коммерчески доступными и недорогими.

Технология ФТР стекла и ГОЭ на его основе способна оказывать экономическое влияние на целевые рынки и направлена на становление и поддержание технологического суверенитета РФ. Эта технология обладает потенциалом масштабируемости и возможностью индустриальной реализации. Следует отметить, что ФТР стекло вошло в перечень планируемых к разработке специальных материалов, который вошел в комплексную программу «Развитие электронного машиностроения на период до 2030 года», подготовленную Департаментом станкостроения и тяжелого машиностроения Минпромторга РФ (июнь 2022 г.).

1. Технология ионного обмена

Сегодня существует большая потребность в ГОЭ для работы в мощных лазерных системах. В этом контексте ГОЭ на ФТР стекле являются наиболее перспективными и востребованными, по сравнению с традиционными фоточувствительными материалами (галоидосеребряными покрытиями, желатиной, фотополимерами). Несмотря на высокую оптическую прочность ФТР стекла, требования к этой характеристике в современных лазерных системах повышаются. Поэтому встает задача дополнительного упрочнения поверхности голограмм на основе ФТР стекол к воздействию лазерного излучения.

Для увеличения механической прочности и лучевой стойкости голограмм на основе ФТР стекол в настоящей работе предложена технология ионного обмена. ФТР стекла содержат щелочную компоненту (ионы натрия), и к таким стеклам применима ионообменная технология. Например, возможно заменять ионы натрия в ФТР стекле на ионы K^+ , Rb^+ и Cs^+ из внешнего источника (расплава соли), у которых ионный радиус больше, чем у ионов натрия. При обмене ионов разного радиуса в ФТР стекле возникают механические сжимающие напряжения, которые могут достигать десятков МПа. Эта технология позволяет повышать показатель преломления ($\Delta n \sim 10^{-3}$) на поверхности ФТР стекла и создавать оптические волноводы. Кроме того, она позволяет упрочнять поверхность за счет сжимающих диффузионных напряжений, т. е. повышать механическую, термическую и оптическую прочность ФТР стекла. Это важное обстоятельство для использования ГОЭ на основе ФТР стекол в мощных лазерных системах.

2. Технология химического травления

В работе обнаружено, что скорость травления кристаллической фазы в HF кислоте в 10–20 раз выше, чем скорость травления матрицы ФТР стекла. Этот эффект позволяет создавать 3D полые микроканальные структуры в объеме ФТР стекла за счет трех процессов: а) создания центров кристаллизации лазерным излучением; б) роста кристаллической фазы на этих центрах за счет термической обработки; в) последующего вытравливания этой фазы. Также показано, что возможно объединение этих трех процессов с последующим ионным обменом, т. е. создание волноводов внутри полых микроканальных структур. Таким образом, рассмотрена перспектива разработки на базе ФТР стекла микрофлюидных сенсоров.

Заключение

Можно заключить, что ФТР стекла имеют большой потенциал как голографическая среда, которую можно модифицировать разнообразными методами (ионный обмен и фитохимическое травление) и совершенствовать ее эксплуатационные характеристики.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 20-19-00559).

Список источников

- [1] **Никоноров, Н. В.** Фототерморефрактивное стекло — перспективный материал фотоники (обзор) / Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, Е. С. Мусихина // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 3. — С. 68–100.

Surface modification of photo-thermo-refractive glass using ion exchange and chemical etching methods

N. V. Nikonorov, H. Alhalabi, D. V. Marasanov, E. M. Sgibnev

ITMO University, St. Petersburg, Russia

Photo-thermo-refractive (PTR) glasses are a medium for recording ultra-deep volume holographic optical elements, in which under the influence of radiation and heat treatment (i.e. as a result of photo-thermal-induced crystallization) metallic silver nanoparticles and shells are formed in the form of silver halides and sodium fluoride. The difference in the refractive indices of the glass matrix and halide nanocrystals makes it possible to record highly efficient Bragg gratings in the volume of PTR glass. The work proposes two technologies for modifying the surface of PTR glasses: low-temperature ion exchange and photochemical etching. A combination of these technologies with photo-thermal-induced crystallization of glass is also presented. This modification makes it possible to increase the mechanical, thermal and optical strength of Bragg gratings based on PTR glass, as well as create 3D hollow microstructures and waveguides.

Keywords: *Photo-thermo-refractive glass, Holographic optical elements, Ion exchange, Photochemical etching*

Наноостровковые пленки серебра, сформированные на поверхности стекла методом Na^+ - Ag^+ ионного обмена: свойства и применения

Е. М. Сгибнев¹, А. В. Шелаев¹, Н. В. Никоноров², А. В. Барышев¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследуется влияние Na^+ - Ag^+ низкотемпературного ионного обмена на структурные свойства силикатного стекла, а также спектральные свойства наноостровковых пленок серебра на его поверхности, сформированных в результате термического отжига в воздушной атмосфере. На основе спектроскопии комбинационного рассеяния предложен метод определения концентрационного профиля ионов серебра. Показано, что спектральными свойствами наноостровковых пленок серебра можно эффективно управлять, варьируя температуру и длительность отжига. Обсуждаются перспективы использования стеклянных подложек с наночастицами серебра на поверхности для гигантского комбинационного рассеяния и сверхширокополосных просветляющих метаповерхностей.

Ключевые слова: Стекло, Ионный обмен, Серебряные наноструктуры, Наночастицы, ГКР

С момента своего открытия в 1974 г. явление гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) активно исследуется по всему миру [1]. Существующие на данный момент коммерческие ГКР-активные подложки изготавливаются с помощью литографии, химических методов и лазерных технологий. Однако широкое практическое использование ГКР спектроскопии ограничивается требованиями к ГКР-активным подложкам по воспроизводимости характеристик, долговременной стабильности и равномерности усиления. Еще одним существенным недостатком коммерческих ГКР-подложек является невозможность их многократного использования. С другой стороны, в настоящее время разработаны методы роста наночастиц серебра на поверхности стекла методом Na^+ - Ag^+ низкотемпературного ионного обмена (НИО) с последующим использованием термической обработки в водородной атмосфере или химического травления [2, 3]. Стоит отметить, что при этом возможен рост наночастиц и в поверхностном слое стекла. Если из состава стекла убрать ионы переменной валентности, которые могут приводить к восстановлению ионов серебра, то возможно полностью подавить процесс формирования наночастиц серебра в стекле. В этом случае формирование наночастиц серебра будет происходить при отжиге в воздушной атмосфере. Кроме того, вследствие того, что сама стеклянная подложка является в некотором роде «резервуаром», содержащим ионы серебра, то процесс формирования наночастиц серебра на поверхности стекла может выполняться многократно. В данной работе исследуются структурные свойства стеклянных подложек после НИО, кинетика роста наночастиц серебра на поверхности и перспективы использования таких подложек для различных задач фотоники.

В работе исследовалась матрица силикатного стекла на основе системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{F}$ синтезированное при 1500 °С в воздушной атмосфере с использованием платинового тигля и мешалки. Na^+ - Ag^+ НИО проводился методом погружения образцов стекла в расплав нитратов серебра и натрия (5 мол. % AgNO_3 /95 мол. % NaNO_3) при 320 °С. После процесса НИО образцы подвергались термической обработке на воздухе при температурах 300–500 °С для формирования серебряных наноструктур на поверхности. Образцы характеризовались с помощью абсорбционной спектроскопии, атомно-силовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния.

Структурные исследования стеклянной подложки после Na^+ - Ag^+ НИО показывают, что в результате замещения ионов натрия на ионы серебра при температуре существенно ниже температуры стеклования наблюдаются значительные изменения в спектрах комбинационного рассеяния (КР) стекла. Так, изменяются относительные интенсивности полос в области ≈ 600 , 790 и 1100 см^{-1} . Кроме того, последняя полоса испытывает сдвиг в область меньших частот примерно на 50 см^{-1} . Результаты исследования показывают, что профиль изменения в спектрах КР полностью совпадает с профилем показателя преломления стекла после Na^+ - Ag^+ НИО, а значит и с концентрационным профилем ионов серебра.

Спектральные исследования показывают, что термический отжиг в воздушной атмосфере приводит к формированию наноостровковой пленки серебра на поверхности стекла, при этом стеклянная подложка остается полностью прозрачной во всем видимом диапазоне. Размером и распределением наночастиц на поверхности стекла можно управлять в широких пределах путем изменения параметров термической обработки. Так, например, средний диаметр наночастиц на поверхности стекла увеличивается с 80 до 350 нм при увеличении температуры термообработки с 350 до 500 °С. Данный подход позволил изготовить ГКР-активную подложку на основе наночастиц серебра. Измерения спек-

тра КР водного раствора нильского синего на исходной стеклянной подложке и с наночастицами серебра на поверхности показали, что коэффициент усиления составил 10^6 — характерная величина для коммерческих подложек. Кроме того, для стекла после однократного Na^+ - Ag^+ НИО продемонстрирована возможность циклического формирования/удаления островковой пленки серебра.

В результате проведенных исследований, разработана методика определения концентрационного профиля серебра на основе КР спектроскопии, обусловленная структурными изменениями стекла в результате процесса Na^+ - Ag^+ НИО. Продемонстрировано, что использование комбинации простых и доступных технологий Na^+ - Ag^+ НИО с последующей термообработкой в воздушной атмосфере позволяет формировать массив наночастиц серебра на поверхности стекла, спектральные свойства которого могут варьироваться в широких пределах параметрами отжига. Исследованный подход представляет интерес для разработки ГКР активных подложек многократного использования и для сверхширокополосных просветляющих метаповерхностей при использовании технологии реактивного ионного травления [4].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Sharma, B.** SERS: Materials, applications, and the future / B. Sharma, R. R. Frontiera, A. I. Henry, E. Ringe, R. P. Van Duyne // *Materials Today*. — 2012. — Vol 15. — № 1-2. — P. 16–25.
- [2] **Zhurikhina, V. V.** Self-assembled silver nanoislands formed on glass surface via out-diffusion for multiple usages in SERS applications / V. V. Zhurikhina, P. N. Brunkov, V. G. Melehin, T. Kaplas, Y. Svirko, V. V. Rutckaia, A. A. Lipovskii // *Nanoscale Research Letters*. — 2012. — Vol 7. — P. 1–5.
- [3] **Chen, Y.** Ag nanoparticles embedded in glass by two-step ion exchange and their SERS application / Y. Chen, L. Karvonen, A. Saynatjoki, C. Ye, A. Tervonen, S. Honkanen // *Optical Materials Express*. — 2011. — Vol 1. — № 2. — P. 164–172.
- [4] **Ray, N. J.** All-Glass Metasurfaces for Ultra-Broadband and Large Acceptance Angle Antireflectivity: from Ultraviolet to Mid-Infrared / N. J. Ray, J. H. Yoo, H. T. Nguyen, E. Feigenbaum // *Advanced Optical Materials*. — 2023. — Vol 11. — № 12. — P. 2300137.

Silver nanoisland films on surface of Na^+ - Ag^+ ion-exchanged glass: properties and applications

Y. M. Sgibnev¹, A. V. Shelaev¹, N. V. Nikonorov², A. V. Baryshev¹

¹*Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

²*ITMO University, St Petersburg, Russia*

The study is devoted to influence of low-temperature Na^+ - Ag^+ ion exchange on the structural properties of silicate glass and spectral properties of silver nanoisland films on glass surface formed with thermal annealing in air atmosphere. A method for measurement the concentration profile of silver ions based on Raman spectroscopy is proposed. It is shown that spectral properties of silver nanoisland films can be effectively controlled by varying the temperature and duration of the annealing. The prospects of using glass substrates with silver nanoparticles for SERS applications and ultra-wideband antireflection metasurfaces are discussed.

Keywords: Glass, Ion exchange, Silver nanostructures, Nanoparticles, SERS

Магнитостимулированное изменение люминесценции кристаллов фосфида галлия

А. А. Скворцова¹, Л. В. Волкова¹, С. Г. Каленков¹, С. М. Нефедова¹, А. А. Скворцов¹

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

В работе обнаружено влияние постоянного магнитного поля на спектры фотолюминесценции в кристаллах фосфида галлия $p\text{-GaP}(\text{Zn}, \text{N})$. Установлено, что предварительная экспозиция кристаллов фосфида галлия в постоянном магнитном поле ($B < 0.8$ Тл) при комнатной температуре приводит к возгоранию полосы флуоресценции с максимумом $\lambda = 565$ нм при воздействии на кристалл лазера с длиной волны 405 нм и мощностью не более 30 мВт. Обнаружено также, что время релаксации спектра к исходному состоянию не превышало 5 часов. Наблюдаемые особенности можно связать как с влиянием магнитного поля на скорость интеркомбинационной конверсии ($S_1 \rightarrow T_1$) в кристаллах $p\text{-GaP}(\text{Zn}, \text{N})$, так и с образованием комплексов фосфида галлия с азотом в возбужденном состоянии.

Ключевые слова: Фосфид галлия, Постоянное магнитное поле, Люминесценция, Релаксация, Синглетное и триплетное состояния, Интеркомбинационная конверсия

Сегодня хорошо известно о влиянии магнитного поля на электрические, механические и оптические свойства целого ряда немагнитных металлических, полупроводниковых и диэлектрических кристаллов [1–3]. К примеру, предварительная магнитная экспозиция в постоянном магнитном поле (магнитная индукция $B \leq 1$ Тл) может приводить к увеличению подвижности дислокаций и уменьшению микротвердости (NaCl, Al, GaAs и т. д.). Что касается оптических свойств материалов, то предварительная экспозиция в постоянном магнитном поле также влияет на их свойства. Было обнаружено, что после экспозиции монокристаллов ZnS с микродвойниками в магнитном поле с индукцией 1 Тл и выше интегральная яркость электролюминесценции возрастает в несколько раз [4]. Кроме того, в закаленных кристаллах NaCl:Eu было обнаружено влияние предварительной экспозиции кристаллов NaCl в постоянном магнитном поле на спектры фотолюминесценции. Предполагается, что наблюдаемые изменения связаны с внутрицентровыми атомарными перестройкам димеров (распаде и последующем образовании димеров другого сорта) [5]. Механизмы наблюдаемых изменений связываются со спин-зависимыми реакциями в подсистеме структурных дефектов. Магнитное поле разрешает перестройку магниточувствительных комплексов под действием внешних сил.

Таким образом, постоянное магнитное поле может влиять на спектральные характеристики различных кристаллов. Однако работ по влиянию постоянных магнитных полей на люминесценцию полупроводниковых кристаллов явно недостаточно, поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование спектров люминесценции кристаллов GaP после экспозиции их в постоянном магнитном поле.

В качестве объекта исследования выступали монокристаллы $p\text{-GaP}(\text{Zn}, \text{N})$. Пластины из фосфида галлия диаметром 30 мм и толщиной 0,45 мм. Предварительная экспозиция кристаллов в постоянном магнитном поле осуществлялась между полюсами неодимовых магнитов с индукцией $B < 0,85$ Тл. Регистрация спектров поглощения производилась на спектрофотометре Shimadzu UV-1280, а спектров люминесценции с помощью спектрофотометра OHSP-350 (через 5 минут после окончания МП-экспозиции). В проведенном нами эксперименте спектры люминесценции регистрировались по классической схеме. Возбуждение осуществлялось лазерами с длинами волн 405 и 447 нм.

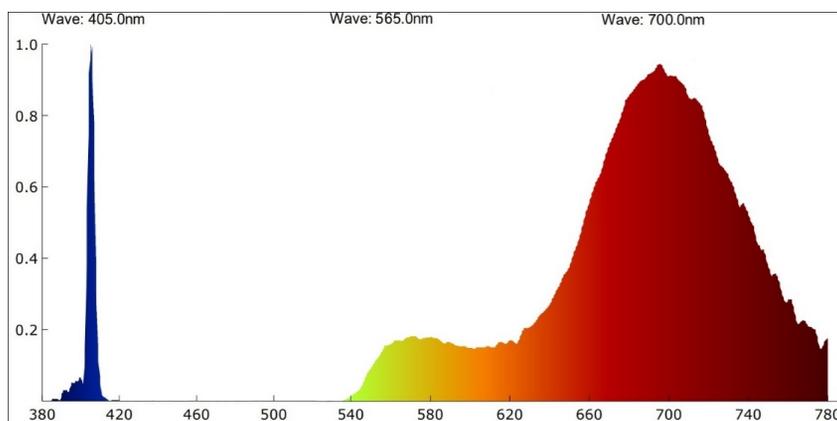


Рис. 1. Спектр люминесценции кристаллов $p\text{-GaP}(\text{Zn}, \text{N})$ после предварительной экспозиции в постоянном МП ($B = 850$ мТл) в течение 30 минут при комнатной температуре

Спектр люминесценции приведен на рисунке 1. Нетрудно увидеть, что в спектре люминесценции исследуемых образцов присутствуют две полосы люминесценции: слабая полоса флуоресценции с максимумом при $\lambda_1 = 565$ нм и сильная полоса фосфоресценции с максимумом $\lambda_2 = 700$ нм.

Результаты исследования показали, что предварительная экспозиция кристаллов в постоянном МП 0,85 Тл приводит к увеличению полосы флуоресценции кристалла ($\lambda_1 = 565$ нм). На рисунке 2 отчетливо видно изменение максимума интенсивности флуоресценции I_1 ($\lambda_1 = 565$ нм) за разное время в течение 60 минут после экспозиции объекта в МП.

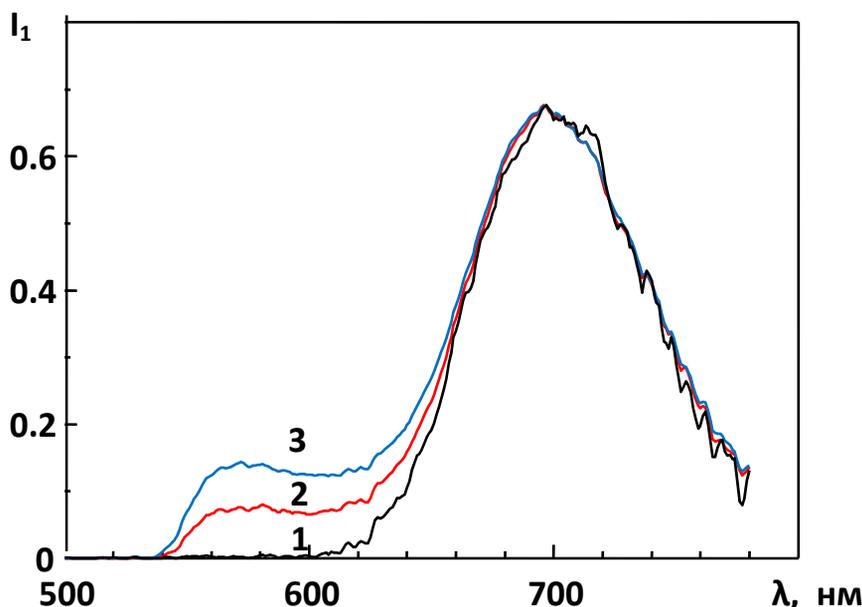


Рис. 2. Изменение полосы флуоресценции с максимумом $\lambda_1 = 565$ нм кристаллов p-GaP(Zn, N), зафиксированное через 12 (1), 22 (2) и 60 (3) минут после экспозиции в постоянном МП ($B = 0,85$ Тл)

Наблюдаемое изменение полосы флуоресценции связывается нами с влиянием магнитного поля на скорость интеркомбинационной конверсии ($S1 \rightarrow T1$) в кристаллах p-GaP(Zn,N) (рис. 3). С другой стороны, данный эффект может быть связан с образованием комплексов фосфида галлия с азотом в возбужденном состоянии.

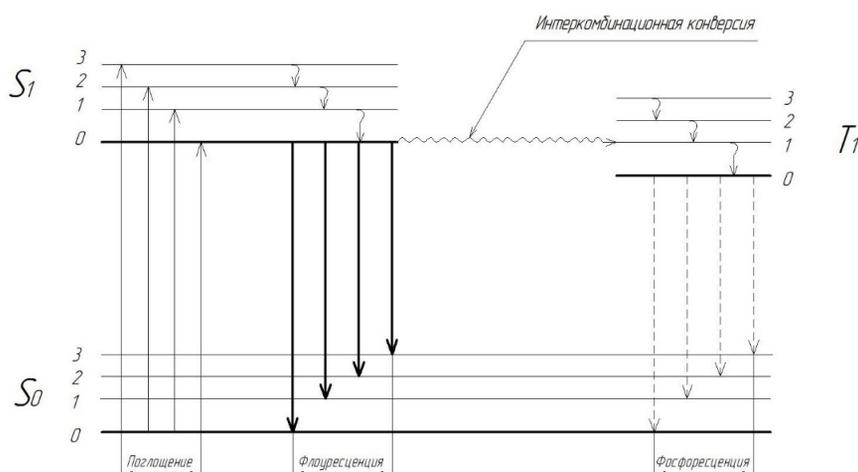


Рис. 3. Схема синглетных и триплетных состояний

Таким образом, в работе рассмотрено влияние постоянного магнитного поля на спектры люминесценции в кристаллах p-GaP:(Zn, N). Выявлено, что после экспозиции образца в постоянном МП возгорается полоса флуоресценции ($\lambda_1 = 565$ нм) при воздействии лазера ($\lambda = 405$ нм, $P = 30$ мВт). Также, определена зависимость максимума интенсивности полосы флуоресценции I_1 от времени.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FZRR-2023-0009).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Альшиц, В. И. Физическая кинетика движения дислокаций в немагнитных кристаллах: взгляд через магнитное окно / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Р. К. Котовский, Е. А. Петржик, П. Трончик // Успехи физических наук. — 2017. — Том 187. — № 3. — С. 327–341.
- [2] Моргунов, Р. Б. Спиновая микромеханика в физике пластичности / Р. Б. Моргунов // Успехи физических наук. — 2004. — Том 174. — № 2. — С. 131–153.
- [3] Головин, Ю. И. Магнитопластичность твердых тел (обзор) / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. — 2004. — Том 46. — № 5. — С. 769–803.
- [4] Головин, Ю. И. Влияние магнитного поля на интенсивность электролюминесценции монокристаллов ZnS / Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, А. А. Баскаков, С. З. Шмурак // Физика твердого тела. — 1999. — Том 41. — № 11. — С. 1944–1947.
- [5] Моргунов, Р. Б. Кинетика преобразования димеров Eu^{2+} в кристаллах NaCl в постоянном магнитном поле 15 Т / Р. Б. Моргунов, М. А. Баширов, Ю. В. Малютин, В. Л. Бердинский, Y. Tanimoto // Физика твердого тела. — 2007. — Том 49. — № 3. — С. 430–433.

Magnetically stimulated change in luminescence of gallium phosphide crystals

A. A. Skvortsova¹, L. V. Volkova¹, S. G. Kalenkov¹, S. M. Nefedova¹, A. A. Skvortsov¹

¹Moscow polytechnic university, Moscow, Russia

The effect of a constant magnetic field on the spectra of photoluminescence in p-GaP:(Zn,N) crystals has been revealed. It was found that the preliminary finding of gallium phosphide crystals in a constant magnetic field ($B < 0.8$ T) at room temperature leads to an increase in the luminescence band with maximum 565 nm when exposed to the crystal with a laser with a wavelength of 405 nm and a power of no more than 30 MW. It was also found that the relaxation time of the spectrum to the initial state did not exceed 5 hours. The observed features are associated both with the influence of magnetic field on the rate of intercombination conversion ($S1 \rightarrow T1$) and the formation of complexes of gallium phosphide with nitrogen in the excited state.

Keywords: Gallium phosphide, Permanent magnetic field, Luminescence, Relaxation, Singlet and triplet states, Intercombination conversion

Мономеры с высоким показателем преломления в голографических фотополимерных материалах

В. В. Шелковников^{1,2}, Е. В. Васильев¹, А. Д. Бухтоярова¹, Д. И. Деревянко¹, В. Н. Бережная¹, И. Ю. Каргаполова¹, И. К. Шундрин¹

¹Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Проведено исследование влияния атомов кислорода и серы ($-O-CH_2-CH_2-O-$, $-O-CH_2-CH_2-S-$, $-S-CH_2-CH_2-S-$) в структуре спироциклических мономеров на основе акрилоильных производных 4-пиперидона на физико-химические и голографические свойства фотополимерного материала. Измерены показатели преломления мономеров и полученных из них полимеров. Методом ИК-спектроскопии исследована степень конверсии двойных связей акриламидных мономеров при УФ иницированной полимеризации. Проведена голографическая запись элементарных фазовых пропускающих дифракционных решеток в фотополимерных материалах. Выявлено, что наибольшей модуляцией коэффициента преломления обладают образцы на основе акрилоильного дитиаазаспирогетероциклического ($-S-CH_2-CH_2-S-$) мономера. Проведена оценка величин светорассеяния фотополимерных слоев при записи дифракционных решеток.

Ключевые слова: Фотополимерные материалы, Показатель преломления, Серосодержащие мономеры

Введение

Интерес исследователей к серосодержащим мономерам связан с тем, что полимеры из них обладают удачным сочетанием параметров для оптических приложений [1]. Эти полимеры, как правило, легки в обработке и имеют высокий уровень механической прочности [2], недороги. Они используются для антибликовых покрытий [3], как компоненты светоизлучающих диодов [4], в том числе в OLED-дисплеях [5], как компоненты оптических сенсоров [6], для фоторезистов 193 нм литографии [7], в то же время обладают полезными оптическими параметрами. Они стабильны, прозрачны в видимом диапазоне спектра, термостойки, обладают высокими показателями преломления (RI) и числами Аббе (V_D), которые характеризуют низкую дисперсию показателей преломления [8]. Сильно преломляющие материалы обычно имеют небольшое число Аббе [9], тогда как, например, серосодержащие метакрилаты имеют высокие показатели преломления и большие числа Аббе [10].

Серосодержащие мономеры играют важную роль в голографических фотополимерных материалах (ГФПМ). Серосодержащие полимеры, как правило, имеют большие величины показателей преломления по сравнению с кислородсодержащими [11]. Одним из подходов к получению мономеров с высокими показателями преломления является введение атомов серы в его структуру [12].

В данной работе представлен синтез ряда дитиаазаспироакрилатных мономеров на основе тиоацеталей пиперидона, содержащих в циклической структуре атомы серы. Из синтезированных мономеров получены образцы оптических полимерных пленок обладающих высокими значениями показателей преломления. Изучены термические и оптические свойства мономеров и полученных из них полимеров. Исследованы голографические свойства ГФПМ на основе трех мономеров — акрилоильных производных 4-пиперидона, содержащих разное количество атомов серы и кислорода при однотипной акриламидной части, обозначенные как DO — dioxygen, OT — oxygen-thio, DT — dithio мономеры.

Результаты и обсуждение

Для получения мономеров, содержащих атомы серы и ароматические кольца и алкильные группы, был проведен синтез дитиаацеталей с использованием коммерчески доступных ароматических тиолов или алкилтиолов согласно схеме:

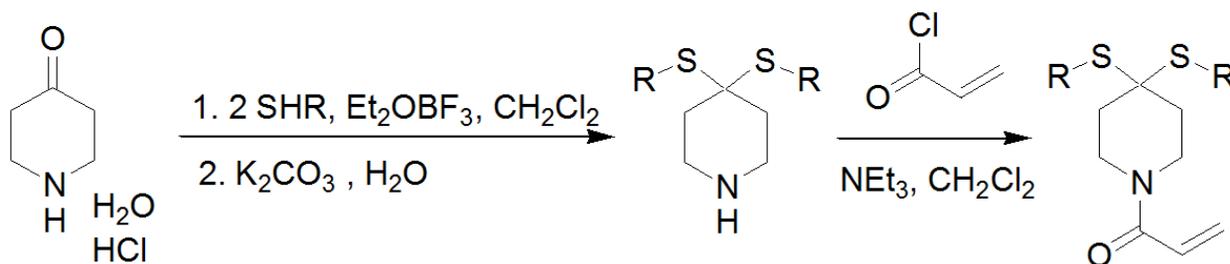
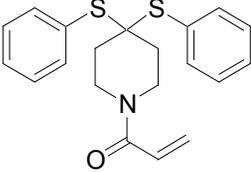
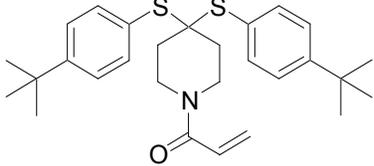
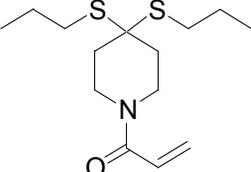
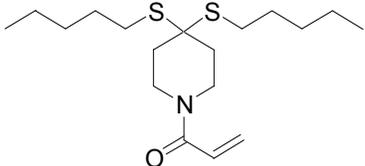
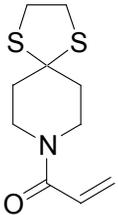
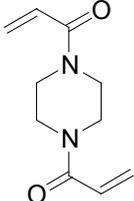


Схема реакций

Из синтезированных мономеров были приготовлены слои фотополимерных пленок. Для приготовления полимерных слоев использовался метод получения пленок из расплава. Данный метод позволил получить из синтезированных мономеров полимерные слои толщиной 500–800 μm , необходимые для измерения спектров пропускания, показателей преломления (RI — refractive index) и термических параметров. Полученные полимеры были охарактеризованы методами оптической спектроскопии, рефрактометрии, дифференциальной сканирующей колориметрии и термогравиметрического анализа. Результаты измерений RI мономеров и полученных из них соответствующих полимеров представлены в таблице 1.

Таблица 1. RI мономеров и полимеров.

Мономер	n (мономер) $\pm 0,004$	Δn	n (полимер) $\pm 0,004$
	$\lambda_{\text{изм}}$ 589 нм		$\lambda_{\text{изм}}$ 589 нм
M1 	1,613	0,029	1,642
M2 	1,582	0,031	1,613
M3 	1,546	0,019	1,565
M4 	1,528	0,026	1,554
M5 	1,583	0,047	1,630
M6 	1,588	0,028	1,616
ВАР 	1,551	0,032	1,583

При анализе таблицы следует обратить внимание на высокое значение RI синтезированных полимеров при наличии с серосодержащего спироцикла. Алифатические спироциклы в структуре мономеров и полимеров приводят к повышению RI по сравнению с нециклическими линейными серу-содержащими заместителями. В целом, введение в структуру алифатического спироциклического мономера двух атомов серы повышает показатель преломления мономера в среднем на 0,022 по сравнению с бисакрилоилпиперазином ВАР.

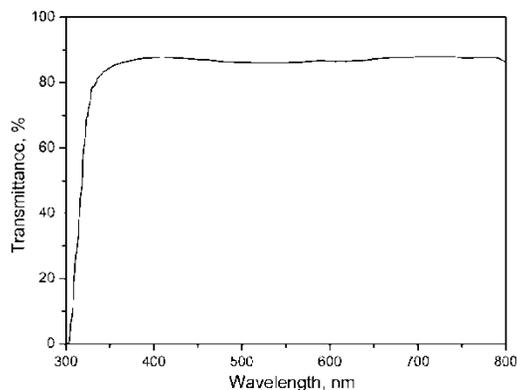
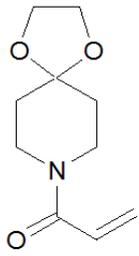
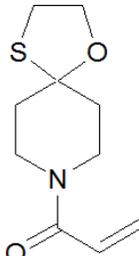
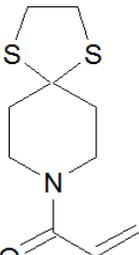


Рис. 1. Спектр пропускания пленки полимера из мономера М5

Как видно из представленного спектра поглощения полимера из мономера М5 (рис 1), спироциклические мономеры и полимеры прозрачны в УФ от 350 нм и всей видимой области.

Проведены количественные исследования голографических свойств материала при последовательной замене в спироциклическом мономере кислорода на серу. Исследованы три мономера — акрилоильные производные 4-пиперидона, содержащие разное количество атомов серы и кислорода при однотипной акриламидной части (рис. 2), обозначенные как DO — dioxygen, OT — oxygen-thio, DT — dithio мономеры.

Таблица 2. RIs исследованных мономеров

	Структуры спироциклических мономеров — акрилоильных производных 4-пиперидона	n_{25}^D (monomer)	n_{25}^D (polymer)	Δn
DO		1,512	1,543	0,03
OT		1,554	1,582	0,028
DT		1,583	1,63	0,047

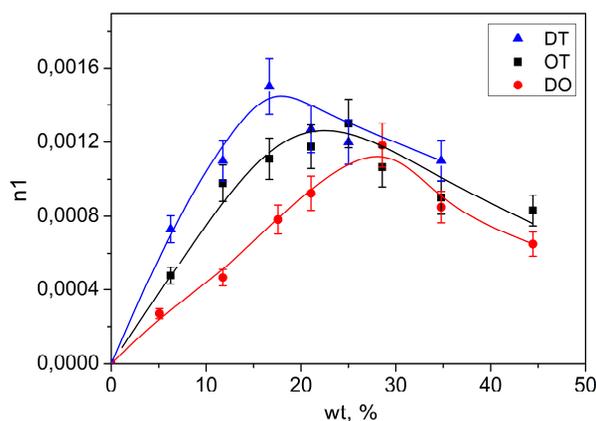


Рис. 2. Зависимость величин модуляции коэффициентов преломления мономеров от их массовой доли в фотослое

Ввиду того, что мономеры имеют различные RI (табл. 2), то их введение в фотополимерный слой в количествах 0–20 wt.% дает различную эффективность. Это выражается в различном наклоне кривых на рис. 2 в диапазоне 0–20 wt.%. При введении 20 wt.% мономера DT достигается максимальная модуляция RI и дальнейшее увеличение концентрации мономера в слое приводит только к снижению эффективности полимеризации.

Замена двух атомов кислорода на атомы серы позволило увеличить RI с 1,513 (DO) до 1,583 (DT). Учитывая, что RI поливинилацетата $n = 1,467$, то разница RI между полимером и матрицей увеличилась в 2,1 раза с 0,076 до 0,163. Тем не менее, в результате записи дифракционной решетки в слое с разными мономерами не наблюдалось существенного увеличения n_1 (рис. 2). Наиболее вероятная причина такого поведения может быть связана с рассеянием света на формируемых дифракционных решетках.

Слой ГФПМ с различными мономерами показали увеличение светорассеяния материала в ряду DO – OT – DT параллельно с увеличением модуляции показателя преломления решеток. Увеличение светорассеяния фотополимеризующихся материалов снижает дифракционную эффективность решеток и ограничивает разрешающую способность материала. Светорассеивание приводит к появлению эффекта нелокального зарождения процесса фотополимеризации. При этом можно наблюдать формирование «шумовых голографических решеток», вызванных интерференцией рассеянным и падающим излучением, который в данном случае имеет форму круга между прошедшим и дифрагированным пучком (рис. 3). На рис. 4 приведены кривые распределения относительной интенсивности рассеянного излучения в районе нулевого порядка дифракции. В данном случае также наблюдается существенное изменение интенсивности рассеянного излучения в ряду мономеров: DO–OT–DT. Больше светорассеяние приводит к более интенсивному формированию шумовых голографических решеток, на которых расходуются часть активных компонент, и которые в конечном итоге снижают DE первого порядка дифракции. Возможной причиной подобного поведения может быть несовместимость полимерной матрицы и полимеров, образованных из мономеров.



Рис. 3. Фотография дифракционной картины голограммы, записанной в слой с DT мономером

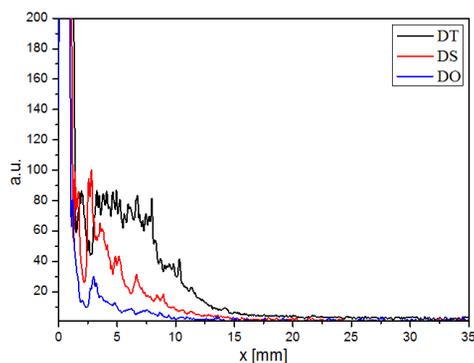


Рис. 4. Относительная интенсивность рассеянного света в области нулевого порядка дифракции для слоев с различными мономерами

Заключение

Синтезирован ряд дитиаазаспироакрилатных мономеров, содержащих в циклической структуре атомы серы и обладающих высокими значениями показателей преломления. Мономеры полимеризованы по свободно радикальному механизму с образованием прозрачных пленок при иницировании фотополимеризации.

Значения показателей преломления исходных мономеров и полимеров n_{25}^D находятся в широком диапазоне 1,52–1,67, что определяется структурными особенностями этих соединений. Полимеры, состоящие из спироциклических неразветвленных звеньев, показали большие значения коэффициентов преломления и чисел Аббе, высокую прозрачность, что представляется перспективным для использования в фотолитографии, голографии, элементах полимерной и волноводной оптики.

Исследовано влияния атомов кислорода и серы в структуре спироциклических мономеров DO, OT, DT на основе акрилоильных производных 4-пиперидона на физико-химические и голографические свойства фотополимерного материала на базе данных мономеров и поливинилацетата как полимера матрицы. При последовательном замещении двух атомов кислорода на серу наблюдалось увеличение RI у мономеров от 1,513 (DO) до 1,583 (DT) и полученных из них полимеров от 1,543 (DO) до 1,63 (DT). Полученные полимеры показали высокую прозрачность в видимом диапазоне и хорошую термостойкость ($T_g = 130–155\text{ }^\circ\text{C}$). При записи пропускающих голограмм с использованием данных мономеров в матрице ПВА наблюдалось светорассеяние фотополимерных слоев, которое возрастало при замещении кислорода на серу. Подход, направленный на повышение эффективности ГФПМ путем использования серосодержащих мономеров/полимеров, требует учета их фазовой морфологической совместимости с полимерной матрицей.

Список источников

- [1] Liu, J. High refractive index polymer: fundamental and practical applications / J. Liu // *J. Mater. Chem.* — 2009. — Vol 19 (47): 8907. — DOI: 10.1039/B909690F.
- [2] Mosley, D.W. / D. W. Mosley, K. Auld, D. Conner, J. Gregory, X. Liu, A. Pedicini, D. Thorsen, M. Wills G. Khanarian, E. S. Simon // *Proc. SPIE.* — 2008. — Vol 6910. — P. 691017.
- [3] Nakamura, T. / T. Nakamura, H. Fujii, N. Juni, N. Tsutsumi // *Opt. Rev.* — 2006. — № 13. — P. 104.
- [4] Yen, H.-J. A facile approach towards optically isotropic, colorless, and thermoplastic polyimidothioethers with high refractive index / Yen H.-J., Liou G.-Sh. // *J. Mater. Chem.* — 2010. — Vol 20 (20): 4080. — DOI: 10.1039/c000087f.
- [5] Macdonald, E. K. Intrinsic high refractive index polymers / E. K. Macdonald, M. P. Shaver // *Polymer International.* — 2015. — Vol 64 (1). — P. 6–14.
- [6] Blakey, I. Synthesis of High Refractive Index Sulfur Containing Polymers for 193nm Immersion Lithography / I. Blakey, W. Conley, A. Graeme, J. T. Hill, L. Heping, R. Firas, A. K. Whittaker // *A Progress Report Proc. of SPIE.* — Vol 61530H. — P. 1–10.
- [7] Matsuda, T. / T. Matsuda, Y. Funae, M. Yoshida, T. Yamamoto, T. J. Takaya // *Appl Polym Sci.* — 2000. — Vol 76. — P. 50–54.
- [8] Jen, M. H. Polymer-based optical waveguides: materials, processing, and devices / M. H. Jen, L. R. Dalton // *Adv. Mater.* — 2002. — Vol 14. — P. 1339–1365.
- [9] Okutsu, R. Sulfur-containing poly(meth)acrylates with high refractive indices and high Abbe's number / R. Okutsu, S. Ando, M. Ueda // *Chem. Mater.* — 2008. — Vol 20. — P. 4017–4023.
- [10] Higashihara, T. Recent Progress in High Refractive Index Polymers / T. Higashihara, M. Ueda // *Macromolecules.* — 2015. — Vol 48. — P. 1915–1929.
- [11] Басистый, В. С. / В. С. Басистый, А. Д. Бухтоярова, Е. В. Васильев, В. В. Шелковников // *Оптика и спектроскопия.* — 2018. — Том 125. — Вып. 1. — С. 797. — DOI: 10.21883/OS.2018.07.46270.285-17.

Эффект пост-экспозиционного набухания голографических фотополимерных материалов

Д. И. Дервянко^{1,2}, Е. Ф. Пен², В.В. Шелковников¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Определена зависимость изменения спектральных сдвигов отражательных голограмм, сформированных в голографических фотополимерных материалах (ГФПМ), с нанесенным защитным покрытием, так и без него при пост-экспозиционной термообработке. Показано, что термообработка приводит к увеличению дифракционной эффективности голограмм в обоих случаях, для голограмм с защитной пленкой происходит гипсохромный сдвиг с 679 до 675 нм, что соответствует эффективной усадке $\Delta S=0,6\%$, а для голограмм, сформированных без защитных покрытий, наблюдается bathохромный сдвиг с 672 нм до 739 нм.

Ключевые слова: Голография, Эффективная толщина голограмм, Фотополимерные материалы, Набухание, Усадка

Введение

На сегодняшний день активно разрабатываются и исследуются голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) [1, 2], которые используются в защитной голографии (security), системах хранения информации, голографических дисплеях [3–5]. ГФПМ включает в себя полимерную матрицу, мономер, инициатор и систему фотоиницирования (ФИС).

При отсутствии покрытия слой ГФПМ после записи голограмм может подвергаться воздействию окружающей среды, что приводит к изменению дифракционных свойств голограмм. Данный эффект используют для создания различных голографических сенсоров и устройств на их основе [6–8]. Кроме того, исследование ГФПМ без покрытий позволяет получить новую важную информацию о физико-химических процессах, происходящих в материалах во время и после воздействия света. Например, в работе [9] установлено, что нагрев отражательных голограмм с удаленной защитной пленкой после их записи приводит к пост-экспозиционной эффективной усадке до 17 %, без ухудшения дифракционной эффективности, а появление данной усадки, вызвано релаксацией напряжений полимерной матрицы, возникших при фотополимеризации ГФПМ. Однако запись голограмм и исследование пост-экспозиционных процессов в ГФПМ без защитных пленок имеет свои ограничения, вызванные кислородным ингибированием радикальной полимеризации в тонких слоях [10].

В работе [11] авторами представлена новая ФИС на основе тетрабутиламмонийной соли бутилтрифенилбората. Особенностью данной ФИС является возможность фотоактивации полимеризации в окислительной атмосфере воздуха.

Целью данной работы было определение спектральных сдвигов отражательных голограмм в ГФПМ на основе ранее разработанных борат-содержащих ФИС, как с защитными покрытиями, так и без них при постэкспозиционной термообработке.

Основная часть

В работе использован фотополимерный материал на основе акриламидного мономера и поливинилацетата [11]. Методики приготовления пленок и составы фотополимерных слоев при использовании ФИС приведены в работе [12]. Толщина слоя образцов фотополимера $T_{\phi} = 30$ мкм. Запись голограмм проводили с использованием лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 639$ нм. Подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [9].

Экспериментальные значения дифракционной эффективности (ДЭ) отражательных голограмм оценивали по формуле:

$$\eta_r = (1 - T_r / T_0) \cdot 100\%$$

где T_r — пропускание голограммы на длине волны максимума спектрального отклика; T_0 — остаточное пропускание образца вне участка голограммы.

Степень усадки ΔS оценивали по относительному сдвигу спектрального отклика отражательной голограммы по формуле:

$$\Delta S = \frac{(\lambda_{исх} - \lambda_{ис})}{\lambda_{исх}} \cdot 100\%$$

где $\lambda_{исх}$ — длина волны максимума спектрального отклика отражательной голограммы сразу после записи; $\lambda_{ис}$ — длина волны максимума этого отклика в результате пост-обработки.

Пост-экспозиционную термообработку образцов приводили с помощью нагревательного столика (Термопро, Россия) на протяжении 5 минут при 50 °С.

Экспериментальная часть

Известно, что пост-экспозиционная термообработка сформированных отражательных голограмм с нанесенной защитной пленкой приводит к увеличению степени конверсии двойных связей и, как следствие, к уплотнению полимерной сетки, что способствует увеличению усадки ГФПМ. На рисунке 1 можно увидеть гипсохромный сдвиг спектрального отклика в результате пост-экспозиционной усадки с 679 до 675 нм, что соответствует степени усадки $\Delta S = (1 - 675/679) \cdot 100\% = 0,6\%$, а также наблюдается рост дифракционной эффективности с 62 до 93 %.

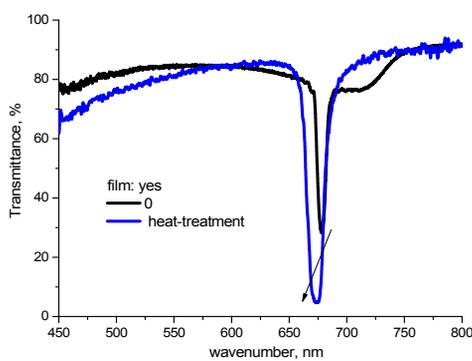


Рис. 1. Спектры пропускания отражательной голограммы, сформированной с нанесенной защитной пленкой до (—) и после пост-экспозиционного термообработки (—)

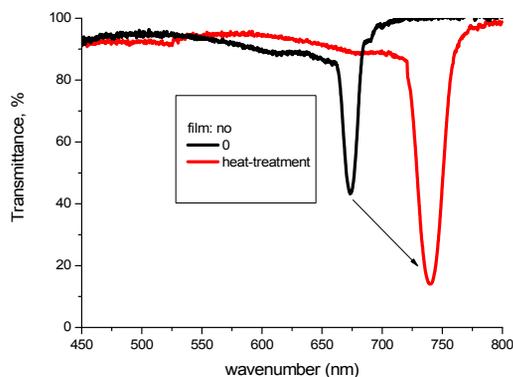


Рис. 2. Спектры пропускания отражательной голограммы, сформированной без защитной пленки до (—) и после пост-экспозиционного термообработки (—)

В тоже время, в случае формирования голограмм без защитной пленки при ее дальнейшей пост-экспозиционной термообработке, происходит рост ДЭ с 55 до 90 %, и в отличие от образцов с нанесенной защитной пленкой, происходит батохромный сдвиг максимума спектрального отклика с 672 до 739 нм (рис. 2). Такой сдвиг соответствует отрицательной степени усадки $\Delta S = (1 - 739/672) \cdot 100\% = -10\%$, т. е., нагрев приводит к набуханию фотополимерного слоя. Можно предположить, что данный эффект связан с изменением сил когезии в ГФПМ без защитного слоя.

Природа процессов, приводящих к батохромному сдвигу, не выяснена. Более детальное исследование протекающих процессов и их моделирование является частью дальнейших исследований. Результаты этих исследований важны также при корректном проектировании вышеупомянутых голографических сенсоров.

Заключение

Обнаружено отличие влияния пост-экспозиционной термообработки на изменения спектральных свойств отражательных голограмм с нанесенной защитной пленкой и без нее. Показано, что термообработка приводит к увеличению ДЭ с ≈ 60 до $\approx 90\%$. В тоже время сдвиги максимумов спектральных откликов имеет разный характер. Выявлено, что в случае голограмм с защитной пленкой происходит гипсохромный сдвиг с 679 до 675 нм, что соответствует эффективной усадке $\Delta S = 0,6\%$, а для голограмм, сформированных без защитных покрытий, наблюдается батохромный сдвиг с 672 до 739 нм.

Список источников литературы

- [1] **Tork, A.** New photopolymer materials for holographic data storage / A. Tork, P. Pilot, T. V. Galstian // *Optical Data Storage. Conference Digest.* — 2000. — P. 138–140. — DOI:10.1109/ODS.2000.848006.
- [2] **Neipp, C.** Optimization of Photopolymer Materials for the Fabrication of a Holographic Waveguide / C. Neipp, J. Francés, F. J. Martínez, R. Fernández, M. L. Alvarez, S. Bleda, M. Ortuño, S. Gallego // *Polymers.* — 2017. — Vol 9. — № 9 — P. 395. — DOI: 10.3390/polym9090395.
- [3] **Liu, T.** High-fidelity multiplexing meta-hologram for information display, storage and encryption / T. Liu, W. Li, Y. Meng, W. Tang, H. Ma, X. Li, R. Zhu, C. Liu, H. Zhang, J. Wang, S. Qu // *Materials & Design.* — 2022. — Vol 224. — P. 111353. — DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111353.
- [4] **Zhu, J.** Multiplexing Perfect Optical Vortex for Holographic Data Storage / J. Zhu, F. Zou, L. Wang, X. Lu, S. Zhao // *Photonics.* — 2023. — Vol 10. — P. 720. — DOI: 10.3390/photonics10070720.
- [5] **Peng, W.-T.** Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display / W.-T. Peng, J. Liu, X. Li, G.-L. Xue // *Acta Physica Sinica (Chinese Edition).* — 2018. — Vol 67. — № 2 — DOI: 10.7498/aps.67.20172026.
- [6] **Shelkovnikov, V. V.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials / V. V. Shelkovnikov, E. F. Pen, V. I. Kovalevsky // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics).* — 2007. — Vol 16. — № 2.— P. 75–83. — DOI: 10.3103/s1060992x07020038
- [7] **Yetisen, A. K** Holographic Sensors: Three-Dimensional Analyte-Sensitive Nanostructures and Their Applications/ Ali K. Yetisen, I.Naydenova, F.Vasconcellos, J.Blyth, C.R. Lowe// *Chem. Rev.* — 2014. — Vol 114. — № 20. — P. 10654–10696
- [8] **Syms R.R.A.** The Effects of Swelling on Volume Holograms Formed in Bleached Photographic Emulsion / R.R.A. Syms, L. Solyar // *Optica Acta: International Journal of Optics.* —1984.— Vol 31.—№ 2.—P.149–157.— DOI: 10.1080/713821483
- [9] **Шелковников, В. В.** Влияние термической пост-обработки на спектральные сдвиги фотополимерных отражательных голограмм и ее использование для получения цветоделенных изображений. / В. В. Шелковников, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен. // *Оптика и спектроскопия.* — 2022. — Том 130. — № 5. — С. 1559–1566. — DOI: 10.21883/OS.2022.10.53626.3795-22.
- [10] **Gervase Ng** Strategies for Achieving Oxygen Tolerance in Reversible Addition–Fragmentation Chain Transfer Polymerization / Gervase Ng, Stuart W. Prescott, Almar Postma, Graeme Moad, Craig J. Hawker, Cyrille Boyer // *Macromolecular Chemistry and Physics.* — Vol 224. — I. 19. — P. 1. — DOI: 10.1002/macp.202300132
- [11] **Патент № 25 523 51 РФ.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне / В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев, В. В. Русских, Л. В. Эктова. — Оpubл. 10.06.2015.
- [12] **Деревянко, Д. И.** Запись монохромных и цветных голограмм в фотополимерном материале с использованием боратсульфониевого комплекса с переносом заряда / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников, В. В. Бардин // *HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов.* — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 322–329.

Effect of post - exposure swelling of holographic photopolymer materials

D. I. Derevianko^{1,2}, E. F. Pen², V. V. Shelkovnikov¹

¹ N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

The dependence of the change in spectral shifts of reflection holograms formed in holographic photopolymer materials with and without an applied protective coating during post-exposure heat treatment has been determined. It is shown that heat treatment leads to an increase in the diffraction efficiency of holograms in both cases; for holograms with a protective film, a hypsochromic shift occurs from 679 to 675 nm, which corresponds to an effective shrinkage $\Delta S = 0.6\%$, and for holograms formed without protective coatings, a bathochromic shift is observed with 672 nm to 739 nm.

Keywords: Holography, Effective thickness of holograms, Photopolymer materials

Междисциплинарная группа изобразительной и прикладной цветной голографии

С. С. Семенов¹, В. П. Кузнецов¹, А. А. Барышников¹, В. Ю. Юрченкова¹, М. К. Шевцов², С. К. Стафеев², О. В. Андреева², М. К. Москвин², Е. В. Рабош², Н. С. Балбекин², Н. В. Петров², В. В. Дёмин³, Ю.А. Березкина⁴, Д. Д. Шаров⁵, Акилов А.А.⁶

¹ Голографическая лаборатория «Continuum», Новосибирск, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ ООО «Славич НТ» ХСП «Микрон», Переславль-Залесский, Россия

⁵ Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Ярославский музей фотографии, Ярославль, Россия

Представлен проект междисциплинарной группы изобразительной и прикладной цветной голографии при сотрудничестве голографической лаборатории (ГЛ) «Continuum», Университета ИТМО, Национального исследовательского Томского государственного университета (ТГУ), Санкт-Петербургского Государственного Университета (СПбГУ) и ООО «Славич НТ» ХСП «Микрон». Основные научные и образовательные интересы и фокусировки группы: разработка цветных регистрирующих сред, запись на них высококачественных изобразительных голограмм, дифракционных решеток и голографических оптических элементов; разработка и модификация голографического принтера (ГП); формирование коммерческой голографической индустрии; социальные и когнитивные исследования влияния голографических и стереоскопических технологий на восприятие человека; разработка и модификация голографического принтера (ГП); системный подход в популяризации голографии; применение накопленного опыта голографических технологий для подготовки кадров и формирование коммерческой голографической индустрии. В настоящее время получен галогенидосеребряный материал, на который с помощью ГП «Велес» (разработан ГЛ Continuum) были записаны отражательные цветные голограммы и голографические стереограммы.

Ключевые слова: Изобразительная голография, Голографический принтер, Дифракционные оптические элементы, Регистрирующие среды

Введение

В 90-е годы XX в. массовое производство голограмм и материалов для их записи в России начало резко сокращаться. Причиной к этому послужили многие обстоятельства: сложности поддержания работоспособности лабораторий в условиях дефицита финансов, остановка развития технологий записи голограмм и материалов для их записи, кризис в отношениях между научными институтами и производствами, а также практически полное исчезновение практики подготовки специалистов в области регистрирующих сред.

За рубежом развитие продолжилось: появились новые высококачественные цветные материалы и сложные голографические установки. Результат — значительный разрыв между отечественным и зарубежным состоянием производства.

С целью изменения текущего положения ГЛ «Continuum», Университет ИТМО, НИ ТГУ и ООО «Славич НТ» ХСП «Микрон» разработали проект междисциплинарной группы изобразительной и прикладной цветной голографии.

1. Задачи группы

Основные задачи группы:

- 1) разработка материалов для изготовления цветных голограмм, не уступающих зарубежным аналогам, — ULTIMATE (Франция), Colour Holographic (Англия), Covestro (Bayfol® HX 200) (ФРГ);
- 2) запись высококачественных голограмм различных типов;
- 3) организация промышленного производства новых материалов совместно с ООО «Славич НТ» ХСП «Микрон»;
- 4) создание и усовершенствование ГП;
- 5) создание компактных, дешевых и безопасных голографических установок для массового сектора;
- 6) формирование коммерческой голографической индустрии;
- 7) использование системного подхода в продвижении, популяризации и коммерциализации голографии;
- 8) подготовка специалистов;
- 9) разработка голографической мультипликации и кинематографа на основе разработок научного коллектива Комара В. Г (НИКФИ);
- 10) проведение когнитивных исследований с целью выявления особенностей восприятия различных голограмм.

2. Результаты

На данный момент получены следующие результаты:

- 1) достигнуты значительные успехи в вопросе записи высококачественных полноцветных голограмм отечественным оборудованием на зарубежные и российские материалы;
- 2) с помощью ГП «Велес» (разработан ГЛ Continuum) записаны отражательные цветные голограммы и голографические стереограммы;
- 3) томским отделением ГЛ Continuum изготовлен цветной галогенидосеребряный голографический материал и составлена имиджевая голографическая программа;
- 4) ведется подготовка молодых ученых и специалистов в области изобразительной и прикладной голографии — по этому направлению в 2023 г. в ИТМО защищена кандидатская диссертация (физико-математические науки);
- 5) с целью продвижения голографии и обсуждения достигнутых результатов опубликованы научные статьи и новости на информационных площадках, таких как Медиапортал Университета ИТМО, Хабр, Дзен [1–7];
- 6) при Музее оптики ИТМО и Ярославском музее фотографии организованы мастер-классы по записи голограмм для школьников и любителей.

Заключение

В работе представлены задачи и текущие результаты работы междисциплинарной группы изобразительной и прикладной цветной голографии.

Список источников

- [1] **Rabosh, E.V.** Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: I. discussion / E.V. Rabosh, N. S. Balbekin, A. M. Timoshenkova, T. V. Shlykova, and N. V. Petrov // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. — 2023. — Vol 40. — № 4. — P. B47–B56. DOI: 10.1364/JOSAA.478498.
- [2] **Rabosh, E.V.** Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: II. photogrammetric digitization / E.V. Rabosh, N.S. Balbekin, N.V. Petrov // Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision. — 2023. — Vol 40. — № 4. — P. B57–B64. DOI: 10.1364/JOSAA.478499.
- [3] **Rabosh, E. V.** Quality control of the diffraction structure of display reflection holograms / E. V. Rabosh, N. S. Balbekin, O. V. Andreeva, N. V. Petrov // Journal of Optical Technology. — 2024. — Vol 90. — № 10. — P. 582–589.
- [4] Чем сейчас занимается голография / URL: <https://habr.com/ru/companies/spbifmo/articles/803597/>
- [5] Воссоздать даже утраченное: ученые ИТМО предложили новый метод оцифровки предметов искусства с помощью голографии / URL: <https://news.itmo.ru/ru/news/13289/>
- [6] Голография для школьников / URL: <https://dzen.ru/suite/05bcf974-3796-4c8a-90bf-bbbcdc8f6060>
- [7] **Ivliev, V. S.** Recording conditions and processing optimization for holograms using Bayfol hx200 photopolymer film / V. S. Ivliev, R. A. Kozin, I. S. Voropaev, D. D. Sharov, S. K. Stafeev // MOMENTO, Universidad Nacional de Colombia. — 2023. — No 67. — P. 79–100. — DOI: 10.15446/mo.n67.106022.

Multidisciplinary Laboratory of Display and Applied Color Holography

S. S. Semenov¹, V. P. Kuznetsov¹, A. A. Baryshnikov¹, V. Y. Yurchenkova¹, M. K. Shevtsov², S. K. Stafeev², O. V. Andreeva², M. K. Moskvina², E. V. Rabosh², N. S. Balbekin², N. V. Petrov², V. V. Dyomin³, Y. A. Berezkina⁴, D. D. Sharov⁵, Akilov A.A.⁶

¹ «Continuum» Holographic laboratory, Novosibirsk, Russia

² ITMO University, St. Petersburg, Russia

³ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴ Slavich NT LLC HSP Micron, Pereslavl-Zalessky, Russia

⁵ Saint-Petersburg University, St. Petersburg, Russia

⁶ Yaroslavl Museum of Photography, Yaroslavl, Russia

The project of the interdisciplinary group of display and applied color holography in cooperation with the holographic laboratory (HL) «Continuum», ITMO University, NI TSU and Slavich NT LLC HSP Micron is presented. The tasks of the group: development of color recording media, recording of high quality display holograms, diffraction gratings and holographic optical elements; social and cognitive research of the influence of holographic and stereoscopic technologies on human perception; development and modification of holographic printer (HP); system approach in popularization of holography; application of the accumulated experience of holographic technologies for personnel training and formation of commercial holographic industry. The following results were achieved: halogensilver material was obtained, on which reflection color holograms and holographic stereograms were recorded with the help of HP "Veles" (developed by HL «Continuum»).

Keywords: Display holography, Hologprinter, Diffractive optical elements, Recording media

Возможности использования 2D-3D гетероперехода MoS₂/p-Si для детектирования излучения малой интенсивности видимого диапазона

Е.В. Жаркова, А.В. Аверченко, О.А. Аббас, И.А. Салимон, А. Калганова, Д. Красников, С. Маилис, П.Г. Лагудакис

¹ Сколковский институт науки и технологий

Вертикальные 2D-3D гетеропереходы на основе дихалькогенидов переходных металлов в последнее время привлекают большое внимание для целей высокочувствительного сверхбыстрого фотодетектирования. Однако сообщений об успешном внедрении таких структур мало. Одной из причин этого является сложность синтеза тонких пленок на проводящих подложках. Кроме того, трудно добиться качества интерфейса между подложкой и выращенной пленкой, что ухудшает эффективность устройств. В данной работе продемонстрировано успешное создание устройств на основе гетеропереходов MoS₂/p-Si с хорошей чувствительностью в видимом спектральном диапазоне.

Ключевые слова: Электроника, Фотодиоды, Двумерные материалы

Введение

Оптоэлектрические свойства дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) тщательно изучаются уже давно [1]. Было обнаружено, что эти материалы обладают хорошим поглощением в широком спектральном диапазоне [2, 3], подвижности носителей заряда в транзисторных структурах на их основе достигают нескольких сотен см²/В×с [4], а также для них характерны высокие отношения тока включения/выключения $\sim 10^8$ [5]. Хотя методы синтеза ДПМ хорошо разработаны [6], для реализации большинства из них требуется применение подложек Si/SiO₂. Недавно для промышленной реализации были предложены так называемые 2D-3D гетеропереходы ДПМ/объемный полупроводник [7–9]. Несмотря на простоту концепции, создание подобных структур может потребовать немасштабируемых процедур, таких как перенос с помощью полимерных пленок [7] с подложек Si/SiO₂. В упомянутом процессе может произойти загрязнение интерфейса и вследствие этого ухудшиться производительность устройств. В нашей работе для создания 2D-3D гетероперехода методом термического разложения жидкого прекурсора были синтезированы пленки MoS₂ на поверхности подложек из p-легированного кремния и исследованы их оптоэлектрические свойства.

Методы

В качестве подложки для синтеза пленки MoS₂ использовался коммерчески доступный p-легированный кремний (p-Si). Пленка была выращена методом термического разложения тетрамолибдата аммония в инертной атмосфере согласно процедуре, описанной в работе [10]. Для оценки качества выращенных пленок были получены спектры рамановского рассеяния. На рисунке 1 приведен типичный спектр MoS₂, выращенного на p-Si.

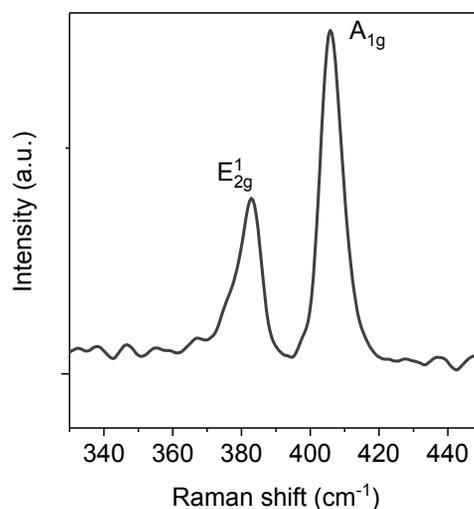


Рис. 1. Рамановский спектр пленки MoS₂, выращенной на p-легированной подложке кремния

Для изготовления светочувствительного устройства к слою MoS_2 сначала был создан электрод из Ag/Au с толщинами пленок 100 нм/100 нм для обеспечения низкого сопротивления и достижения омического контакта металл-полупроводник. Во избежание взаимодействия пленки MoS_2 с растворителями в процессе фабрикации, осаждение металлов осуществлялось через медную теневую маску методом магнетронного распыления. Обратная сторона подложки p -Si была покрыта серебряной пастой и размещена на токопроводящей медной ленте для формирования второго контакта. Электрические и фотоэлектрические свойства исследовались с помощью анализатора полупроводниковых приборов Keysight B1500A, оснащенного набором диодных лазеров. Для подключения прибора к анализатору использовались вольфрамовые иглы зондовой станции.

Обсуждение результатов

Устройства MoS_2/p -Si смещались по напряжению в диапазоне от -2 В до 2 В в темноте и под падающим излучением с тремя разными длинами волн: 450, 520 и 650 нм. Лазерное пятно фокусировалось до размера $0,24 \text{ мм}^2$, что покрывает всю фотоактивную область устройства, равную по площади $\sim 0,25 \text{ мм}^2$.

На рисунке 2 показано, что в темноте были получены несимметричные ВАХ, а это означает, что устройство может обладать выпрямляющими свойствами. Это связано с образованием p - n -перехода на границе раздела кремниевой подложки p -типа и пленки MoS_2 n -типа. При воздействии излучения с плотностью мощности 180 мВт/мм^2 в режиме прямого смещения ток устройства остается практически неизменным, тогда как в режиме обратного смещения ток значительно увеличивается для всех доступных длин волн, что указывает на то, что рассматриваемое устройство проявляет свойства фотодиода.

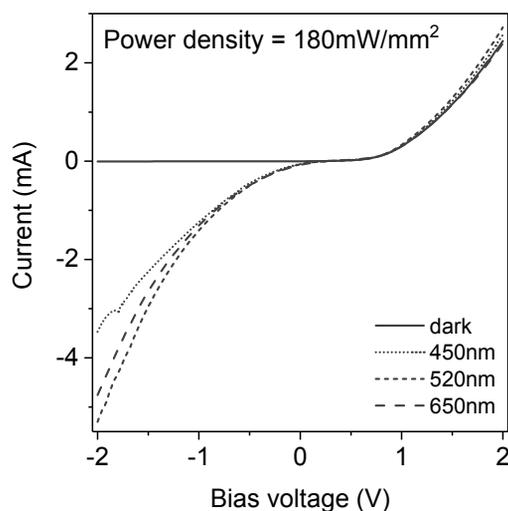


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диода MoS_2/p -Si в темноте (сплошная линия) и при освещении излучением с длинами волн 450 нм (точки), 520 нм (короткие штрихи) и 650 нм (длинные штрихи)

Кроме того, были рассчитаны отношение токов при освещении к темновым токам устройств при смещениях по напряжению -1 В и -2 В для излучений с доступными длинами волн. Полученные значения представлены в таблице 1. Из нее видно, что по сравнению с заявленными диодами с p - n -гетеропереходом [8] представленные демонстрируют хорошие характеристики в видимом диапазоне.

Таблица 1. Отношение тока при освещении к темновому току в фотодетекторе MoS_2/p -Si при смещениях по напряжению -1 В и -2 В. Плотность мощности освещения 180 мВт/мм^2

Длина волны, нм	$I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$	
	V = -1V	V = -2V
450	530	760
520	358	905
650	386	898

Чувствительность устройства при плотности мощности 180 мВт/мм^2 в режиме обратного смещения представлена на рисунке 3.

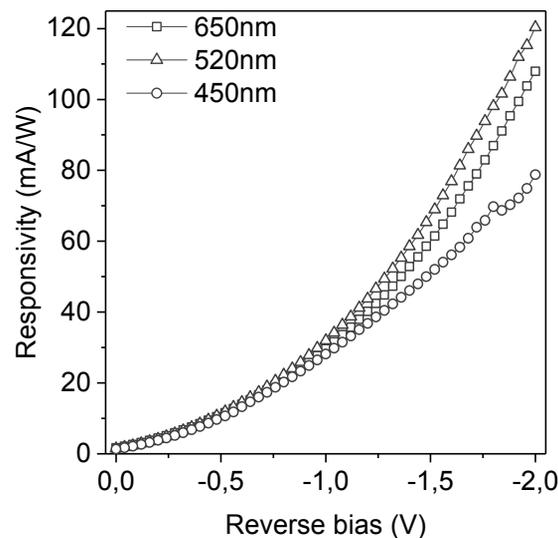


Рис. 3. Чувствительность при различных напряжениях обратного смещения при плотности освещения 180 мВт/мм^2 и длине волны 450, 520 и 650 нм

Заключение

Таким образом, продемонстрирован 2D-3D гетеропереход путем прямого синтеза пленок MoS_2 на кремниевой подложке p -типа легирования. Полученные гетеропереходы демонстрируют поведение, подобное фотодиоду. Были использованы эти гетеропереходы $\text{MoS}_2/p\text{-Si}$ для детектирования света в видимом диапазоне, продемонстрирована чувствительность 120 мА/Вт в режиме обратного смещения с высоким коэффициентом включения/выключения тока, составляющим около трех порядков при смещении по напряжению, равному -2В .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Mak, K. F.** Atomically Thin MoS_2 : A New Direct-Gap Semiconductor / K. F. Mak, et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Vol 105. — № 13. — P. 136805.
- [2] **Lee, H. S.** MoS_2 Nanosheet Phototransistors with Thickness-Modulated Optical Energy Gap / H. S. Lee, et al. // *Nano Lett.* — 2012. — Vol 12. — № 7. — P. 3695–3700.
- [3] **Bernardi, M.** Extraordinary Sunlight Absorption and One Nanometer Thick Photovoltaics Using Two-Dimensional Monolayer Materials / M. Bernardi, M. Palummo, J. C. Grossman // *Nano Lett.* — 2013. — Vol 13. — № 8. — P. 3664–3670.
- [4] **Perera, M. M.** Improved Carrier Mobility in Few-Layer MoS_2 Field-Effect Transistors with Ionic-Liquid Gating / M.M. Perera, et al // *ACS Nano.* — 2013. — Vol 7. — № 5. — P. 4449–4458.
- [5] **Radisavljevic, B.** Mobility engineering and a metal–insulator transition in monolayer MoS_2 / B. Radisavljevic, A. Kis // *Nat. Mater.* — 2013. — Vol 12. — № 9. — P. 815–820.
- [6] **Manzeli, S.** 2D transition metal dichalcogenides / S. Manzeli, et al. // *Nat. Rev. Mater.* — 2017. — Vol 2. — № 8. — P. 17033.
- [7] **Yim, C.** Heterojunction Hybrid Devices from Vapor Phase Grown MoS_2 / C. Yim, et al. // *Sci. Rep.* — 2014. — Vol 4. — № 1. — P. 5458.
- [8] **Qiao, S.** A vertically layered MoS_2/Si heterojunction for an ultrahigh and ultrafast photoresponse photodetector / S. Qiao, et al. // *J. Mater. Chem. C.* — 2018. — Vol 6. — № 13. — P. 3233–3239.
- [9] **Zhang, X.** In-situ prepared WSe_2/Si 2D-3D vertical heterojunction for high performance self-driven photodetector / X. Zhang, et al. // *Ceram. Int.* — 2022. — Vol 48 — № 20. P. 29722–29729.
- [10] **Abbas, O. A.** Solution-Based Synthesis of Few-Layer WS_2 Large Area Continuous Films for Electronic Applications / O. A. Abbas, et al. // *Sci. Rep.* — 2020. — Vol 10. — № 1. — P. 1696.

Composition of paper for scientific - technical conference “HOLOEXPO” proceedings

E.V. Zharkova, A.V. Averchenko, O.A. Abbas, I.A. Salimon, A. Kalganova, D. Krasnikov, S. Mailis, P.G. Lagoudakis

¹ Skolkovo Institute of Science and technology, Moscow, Russia

Vertical 2D-3D heterojunctions based on transition metal dichalcogenides have recently attracted much attention for purposes of highly-sensitive ultrafast photodetection and energy harvesting. However, direct growth of 2D-MoS₂ films on conventional semiconducting substrates such as silicon or gallium nitride is complex due to the low quality of the interface between the substrate and the grown film. In this work, we demonstrate the successful growth of MoS₂ film on top of a highly doped p-type silicon substrate by thermal decomposition of ammonium tetrathiomolybdate. For investigation of the photoresponse of the MoS₂/p-Si heterojunctions, low-work function silver electrodes were used to form highly-conductive metal contacts. The fabricated heterojunction devices exhibit responsivity up to 120 mA/W in the visible spectral range.

Keywords: Electronics, Photodiodes, 2D materials

Рельефно-фазовые дифракционные микроstructures в слоях позитивного ESCAP фоторезиста на основе неионных фотогенераторов кислот

С. В. Деревяшкин^{1,2}, В. А. Конорев¹, А. М. Агафонцев¹, А. Д. Бухтоярова¹, Л. Ю. Гурская¹, А. С. Байраш¹,
Е. Ф. Пен², В. В. Шелковников¹, Е. В. Васильев¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследована запись дифракционных микроstructures в фоторезистах с химическим усилением, чувствительных к излучению с длиной волны 405 нм. По схеме интерферометра Ллойда в слоях фоторезистов были записаны рельефно-фазовые микроstructures и охарактеризованы методом электронной микроскопии. Показано, что фоторезисты обеспечивают запись микроstructures с периодом полос 0,8 мкм. Показано, что введение в качестве сенситизаторов фотогенераторов кислот на основе (гидроксимино)тиофен-3(2h)-иленил)-2-(арил)ацетонитрила обеспечивает чувствительность фоторезистных слоев до 0,4 мДж/см² в условиях голографической записи.

Ключевые слова: ESCAP фоторезист, Дифракционные оптические элементы, Неионные фотогенераторы кислот

В течение последних трех десятилетий активно развиваются фоторезистные системы с повышенной фоточувствительностью на основе процесса химического усиления. Процесс химического усиления основан на фотокаталитическом кислотно-инициируемом снятии защитных гидрофобных групп полимера и переводом его из нерастворимой формы в щелочных водных растворах в растворимую. Растворимая форма вымывается в ходе жидкостного проявления с образованием маски фоторезиста [1]. Фоторезисты с химическим усилением широко используются в технических процессах, использующих коротковолновое излучение (ArF — 193 нм и KrF — 248 нм) [2].

В системе химического усиления основным соединением, запускающим множественные химические реакции при поглощении света, является генератор фото кислоты, который может иметь как ионную, так и неионную природу [3].

Одним из наиболее изученных классов неионных фотогенераторов кислот с точки зрения их использования в фоторезистах с химическим усилением являются иминосульфонаты [4], которые обладают высоким поглощением, фоточувствительностью, растворимостью и приемлемой термостабильностью.

В работе был исследован ряд оригинальных неионных иминосульфонатных фотогенераторов. Помимо этого, был синтезирован фотогенератор, известный из литературы [5], структурная формула которого представлена на рис. 1.

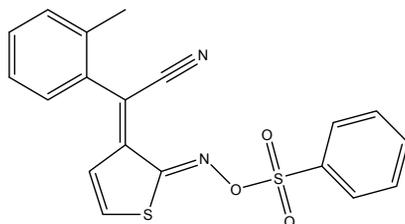


Рис. 1. Структурная формула иминосульфонатного фотогенератора кислоты

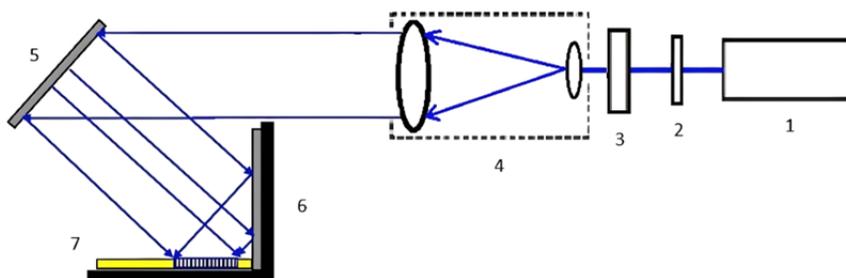


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки ИЛ:

1 — лазер с длиной волны излучения 405 нм; 2 — полуволновая пластина нулевого порядка; 3 — фотозатвор; 4 — пространственный фильтр; 5, 6 — зеркало; 7 — образец фоторезиста

Для записи голографических пропускающих дифракционных решеток была собрана установка по схеме интерферометра Ллойда. [6]. В ней интерференционная картина образуется путем наложения части пучка, падающего на образец фоторезиста и части пучка, отраженного от зеркала (рис. 2). Углы схождения отъюстированы таким образом, чтобы обеспечить период полос 0,8 мкм.

Синтезированные фотогенераторы кислоты были апробированы в фоторезистной композиции с химическим усилением в условиях записи микроструктур методом голографической интерферометрии. Пример записанных микро решеток представлен на рис. 3.

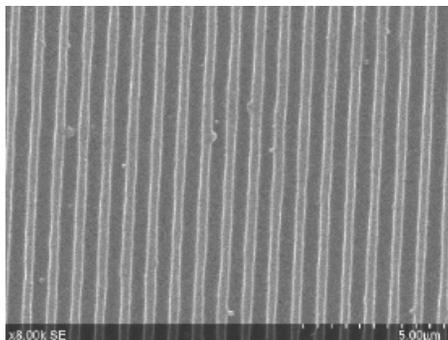


Рис. 3. Снимок микроструктур, записанных на фоторезисте содержащем иминосульфонатные фотогенераторы кислоты, полученные на электронном микроскопе (увеличение 8к, период полос 0,8 мкм)

Экспериментально было определено наиболее перспективное соединение —иминсульфонатный фотогенератор нафталин-2-сульфоновой кислоты, введение в фоторезист которого обеспечивает голографическую запись микроструктур при дозе 0,4 мДж/см².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Reichmanis, E. Chemically amplified resists: Chemistry and processes / E. Reichmanis, F. M. Houlihan, O. Nalamasu, T. X. Neenan // *Advanced Materials for Optics and Electronics*. — 1994. — Vol 4. — № 2. — P. 83–93.
- [2] Tang, Y. Advanced Photoresists: Development, Application and Market / Y. Tang // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. — 2023. — Vol 29. — P. 61–68.
- [3] Kuznetsova, N. Photoacid generators. Application and current state of development. / N. Kuznetsova, G. Malkov, B. Gribov // *Russian Chemical Reviews*. — 2019. — Vol 2. — № 89. — P. 173–190.
- [4] Wu, M. Facile photoinduced pH-adjusting synthesis of high amount framework Ti-containing meso-silica catalyst for cyclohexane oxidation / M. Wu, X. Li, W. Xu, Y. Wang, S. Li, H. Han, L. Ni, J. Jiang, J. Chen // *Catalysis Communication*. — 2020. — Vol 134. — P. 105851.
- [5] Патент № 996 648 48 B2 US. Positive-type photosensitive resin composition, and method for formation of cured film using the same / T. Satoshi — Оpubл. 08.05.2018.
- [6] Икجو, В. Cost-effective laser interference lithography using a 405 nm AlInGaN semiconductor laser / B. Ikjoo, K. Joonwon // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. — 2010. — Vol 20. — P. 055024.

Relief-phase diffraction microstructures in layers of positive ESCAP photoresist based on nonionic acid photogenerators

S.V. Derevyashkin^{1,2}, V.A. Konorev¹, A.M. Agafontsev¹, A.D. Bukhtoyarova¹, L.Yu. Gurskaya¹, A.S. Bayrash¹, E.F. Pen², V.V. Shelkovnikov¹, E.V. Vasiliev¹

¹ N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

The recording of diffraction microstructures in chemically amplified photoresists sensitive to radiation with a wavelength of 405 nm was investigated. Relief-phase microstructures were recorded in photoresist layers using the Lloyd interferometer scheme and characterized by electron microscopy. It is shown that photoresists provide recording of microstructures with a strip period of 0.8 µm. It has been demonstrated that the introduction of acid photoacid generators based on (hydroximino)thiophen-3(2h)-ylenyl)-2-(aryl) acetonitrile as sensitizers provides photoresist layer sensitivity up to 0.4 mJ/cm² under holographic recording conditions.

Keywords: ESCAP photoresist, Diffractive optical elements, Non-ionic photoacid generators

Двухфотонная голографическая запись микроструктур в позитивный ESCAP фоторезист

Е. В. Васильев¹, С.В. Деревяшкин^{1,2}, А.М. Агафонцев^{1,3}, В.А. Конорев^{1,3}, В.В. Шелковников^{1,4}, Е.Ф. Пен², А.Д. Бухтоярова¹, Л.Ю. Гурская¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В позитивном ESCAP фоторезисте были сформированы периодические микроструктуры в режиме двухфотонного возбуждения излучением с длиной волны 532 нм. Фоторезист чувствителен в спектральном диапазоне 248–436 нм. Используются фотогенераторы кислоты неионного типа.

Ключевые слова: Фоторезист, Двухфотонное поглощение, Голографические решетки

В 1982 г. были изобретены фоторезистивные системы с химическим усилением [1]. Принцип химического усиления основан на фотокаталитическом кислотном-инициируемом снятии защитных групп с солюбилизирующих групп полимера, с дальнейшим переводом полимера из нерастворимой формы в растворимую. В ходе жидкостного проявления растворимая форма вымывается с образованием маски фоторезиста [2]. Фоторезисты с химическим усилением широко используются в технологических процессах, использующих коротковолновое УФ излучение, например ArF лазера — 193 нм или KrF лазера — 248 нм [3].

В системе химического усиления фотогенератор кислоты (PAG) является светочувствительным иницирующим соединением. PAG могут иметь как ионную, так и неионную природу. В настоящее время широкое распространение получили ионные PAG, однако неионные PAG обладают более высокой растворимостью в органических растворителях, а также в проявителях фоторезистов. Кроме того, неионные PAG имеют более длинноволновую полосу поглощения и способны генерировать фото кислоту при сенсibilизации излучением видимого диапазона спектра, вплоть до 436 нм.

Одним из наиболее перспективных классов неионных PAG являются иминосульфонаты [4]. Нами был синтезирован ряд неионных PAG данного типа на базе орто-ксилола и нафталина. Синтезированные PAG способны генерировать фторированные и нефторированные, а также ароматические сульфокислоты.

Полученные PAG были протестированы в качестве компонент позитивного ESCAP фоторезиста в режиме записи микроструктур методом интерференционной литографии. По совокупности параметров работоспособными показали себя четыре неионных PAG ксилольного и нафталинового типа с ароматическими кислотными группами. Спектры поглощения четыре неионных PAG приведены на рис. 1.

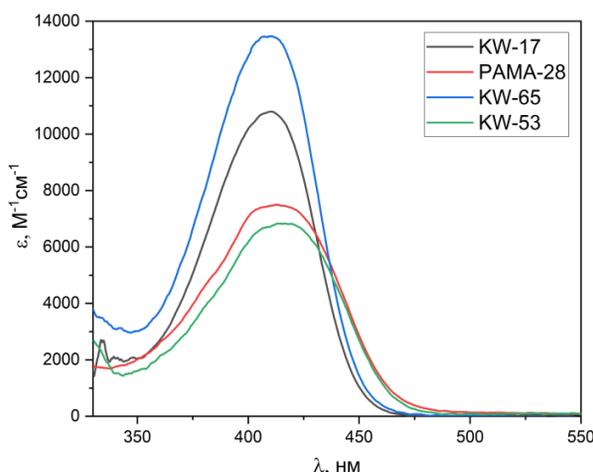


Рис. 1. Спектры поглощения растворов неионных PAG в ацетонитриле

Как правило, в оптических технологиях для формирования микроструктур в фоторезистах применяют однофотонное возбуждение, однако в настоящее время значительный интерес представляет метод двухфотонного возбуждения (ДФП). Метод ДФП позволяет обеспечить однородность записи микроструктур по глубине регистрирующей среды длинноволновым излучением. Вместе с тем,

с учетом порогового характера воздействия излучения, режим ДФП позволяет воздействовать на фоточувствительные слои «верхушкой» гауссова пучка. Пороговый характер фотоактивации РАГ позволяет обходить дифракционные ограничения и формировать микроstructures с характерными размерами менее половины длины волны [5].

Четыре отобранных неионных РАГ ксилольного и нафталинового типа с ароматическими кислотными группами были протестированы в режиме ДФП. В слоях позитивного ESCAP фоторезиста были сформированы периодические микроstructures при импульсном воздействии (18 нс) излучением с длиной волны 532 нм. Из четырех РАГ только в фоторезисте содержащем РАГ нафталинового типа с тозилльной кислотной группой (РАМА-28) удалось сформировать качественную микроstructure (рис. 2).

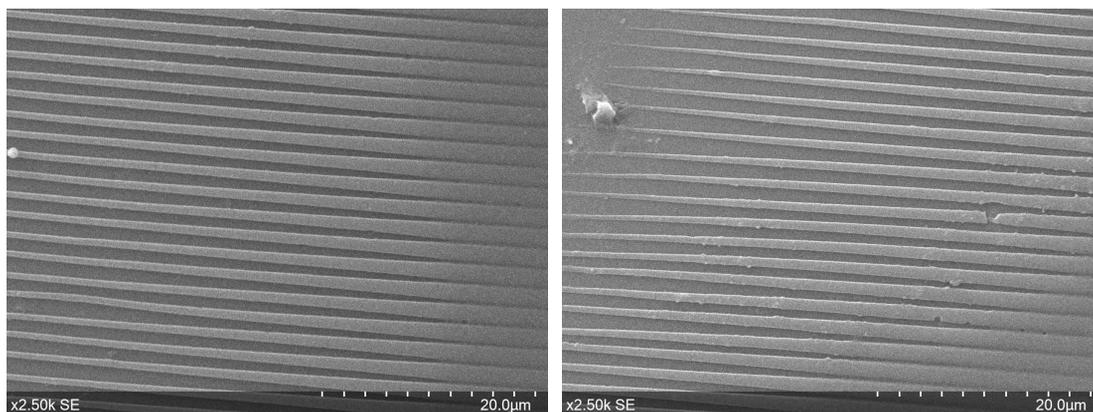


Рис. 2. Результаты СЭМ микроскопии микроstructures полученной в режиме ДФП

На рис. 2 видны периодические полосы переменной толщины. Полосы сформированы методом интерференционной литографии, причем интенсивность излучения уменьшалась слева на право. Минимальная ширина сформированной полосы составляла ~160 нм. Плотность энергии импульса в центре пучка составляла 0,5 Дж/см².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Ito, H. / H. Ito, C. G. Willson, J. M. J. Fréchet // Digest of Technical Papers of 1982 Symposium on VLSI Technology. — 1982. — P. 86–87.
- [2] Reichmanis, E. Chemically amplified resists: Chemistry and processes / E. Reichmanis, F. M. Houlihan, O. Nalamasu, T. X. Neenan // Adv. Mat. for Opt. and Electronics. — 1994. — Vol 4. — № 2. — P. 83–93.
- [3] Tang, Y. Advanced Photoresists: Development, Application and Market // Highlights in Sci., Engineering and Technology. — 2023. — Vol 29. — P. 61–68.
- [4] Mei, Wu Facile photoinduced pH-adjusting synthesis of high amount framework Ti-containing meso-silica catalyst for cyclohexane oxidation / W. Mei, X. Li, W. Xu, Y. Wang, Sh. Li, H. Haifeng, N. Lingli, J. Jinlong, Ch. Jing // Catal. Commun. — 2020. — Vol 134. — P. 105851.
- [5] Ovsianikov, A. Multiphoton Lithography: Techniques, Materials and Applications / J. Stampfl, R. Liska, A. Ovsianikov — Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017.

Two-photon holographic recording of microstructures into positive ESCAP photoresist

E. V. Vasiliev¹, S.V. Derevyashkin^{1,2}, A. M. Agafontsev^{1,3}, V. A. Konorev^{1,3}, V. V. Shelkovnikov^{1,4}, E. F. Pen², A. D. Bukhtoyarova¹, L. Y. Gurskaya¹

¹ Novosibirsk Institute of Organic Chemistry named after N. N. Vorozhtsov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

³ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁴ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In the positive ESCAP photoresist, periodic microstructures were formed in the two-photon excitation mode with radiation with a wavelength of 532 nm. The photoresist is sensitive in the spectral range of 248–436 nm. Non-ionic acid photogenerators are used.

Keywords: Photoresist, Two-photon absorption, Holographic gratings

Объединение технологий ионного обмена и фото-термо-индуцированной кристаллизации ФТР стекла для создания волноводных структур и дифракционных элементов ввода-вывода излучения

В. А. Попова, Н. В. Никоноров, Д. В. Марасанов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло — перспективный материал для записи объемных брэгговских решеток (ОБР). В основе записи лежит фото-термо-индуцированная (ФТИ) кристаллизация стекла, т. е. под действием УФ излучения и последующей термообработки ($T = 505\text{ }^\circ\text{C}$) в облученной области происходит рост нанокристаллов, показатель преломления которых отличается от матрицы стекла. Содержание в ФТР стекле натрия (15 мол. %) позволяет на втором этапе использовать технологию ионообменной диффузии для создания планарных волноводов, например, заменой ионов натрия в стекле на ионы серебра из расплава соли (AgNO_3). Этот процесс происходит при температуре $320\text{ }^\circ\text{C}$, что значительно ниже температуры ФТИ кристаллизации. Объединение ФТИ кристаллизации и ионного обмена позволяет реализовывать монолитную интеграцию ОБР для ввода-вывода излучения и волноводной структуры.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Брэгговская решетка, Ионный обмен, Планарный волновод

Введение

Актуальным направлением интегральной оптики является создание высокоэффективных элементов ввода-вывода излучения в оптические волноводы. Такие устройства представляют собой навесные объемные элементы (призмы, линзы, оптические волокна), которые крепятся к волноводу, или элементы, которые жестко связаны с волноводом (дифракционные решетки, сформированные на поверхности волновода). Второй вариант более предпочтителен, поскольку вписывается в концепцию интегрально-оптических элементов — малые габариты, вес, защищенность от механических и тепловых воздействий. Главный недостаток такого подхода — гибридная интеграция, допускающая соединение дифракционных элементов, волновода и подложки, изготовленных из разных материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). Например, на стеклянную подложку (один материал) наносится волноводный слой (второй материал), на который наносится слой (чаще всего полимер или фотополимер) для записи или импринтинга дифракционной решетки (третий материал). Разные ТКЛР могут негативно влиять на работу интегрально-оптических устройств. В настоящей работе предложен другой подход — монолитная интеграция, когда и дифракционные элементы ввода-вывода излучения, и волновод, и подложка сделаны из одного материала.

В качестве материала было выбрано фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло. ФТР стекло — перспективный материал для записи объемных брэгговских решеток (ОБР) [1]. В основе записи лежит фото-термо-индуцированная (ФТИ) кристаллизация стекла, т. е. изменение показателя преломления стекла под действием УФ излучения и последующей термообработки ($T = 505\text{ }^\circ\text{C}$).

Содержание в ФТР стекле натрия (15 мол. %) позволяет на втором этапе использовать технологию низкотемпературного ионного обмена (НИО) для создания планарных волноводов, например заменой ионов натрия в стекле на ионы серебра из расплава соли (AgNO_3). Этот процесс происходит при температуре ($T = 320\text{ }^\circ\text{C}$) значительно ниже температуры ФТИ кристаллизации. Это позволяет провести процессы записи ОБР и НИО последовательно, т. е. сначала записывается ОБР в ФТР стекле, а потом реализуется НИО $\text{Na}^+_{\text{стекло}} - \text{Ag}^+_{\text{расплав соли}}$. При этом искажение структуры (периода) ОБР в результате НИО не происходит, поскольку ОБР стабильны при циклическом нагреве до $505\text{ }^\circ\text{C}$ [1]. Целью настоящей работы являлось создание дифракционных элементов ввода-вывода излучения в планарном ионообменном волноводе на основе ФТР стекла.

2. Методы исследования

ФТР стекло синтезировано в научно-исследовательском центре оптического материаловедения Университета ИТМО. Стекло имеет матрицу $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{ZnO}-\text{SiO}_2-\text{NaF}-\text{NaBr}-\text{KBr}$ с добавлением CeO_2 (0,01 мол. %), Sb_2O_3 (0,05 мол. %), Ag_2O (0,15 мол. %). После синтеза стекло подверглось отжигу. Рабочие поверхности пластины стекла были отшлифованы и отполированы до оптического качества. Размеры образца составляли $18 \times 8 \times 2$ мм.

Для того чтобы знать, какими характеристиками (угол Брэгга и угол наклона решетки в пластине) должна обладать ОБР, выполняющая функцию элемента ввода-вывода излучения в волновод, на начальном этапе был сделан волновод и измерены эффективные показатели преломления волноводных мод. Для формирования волновода использован НИО в расплаве смеси солей AgNO_3 (5 мол. %) и NaNO_3 (95 мол. %). Температура НИО составляла 320°C , длительность процесса 15 минут.

Характеристики ОБР найдены из условия возбуждения волноводной моды:

$$n_1 \times \sin(\phi + \theta) + n_1 \times \sin(\phi - \theta) = n_m,$$

где n_1 — показателя преломления ФТР стекла на длине волны чтения 532 нм ; θ — угол Брэгга в стекле; ϕ — угол наклона решеток; n_m — эффективный показатель преломления волноводной моды с индексом m .

Запись ОБР происходила с помощью He–Cd лазера Kimmon с длиной волны излучения 325 нм . На рис. 1 изображена схема записи ОБР.

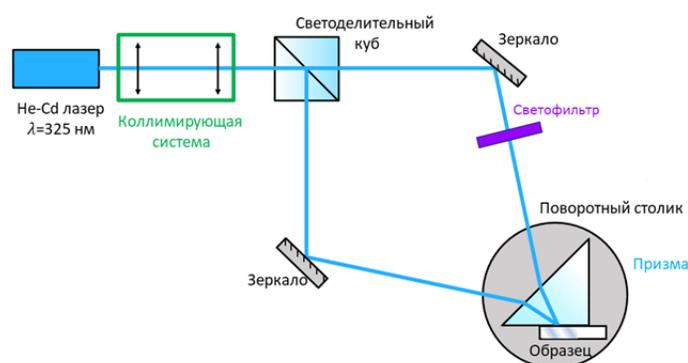


Рис. 1. Схема записи ОБР к под углом к поверхности пластины стекла

После записи проводилось проявление в печи в течении 10 часов при температуре 505°C , нагрев до указанной температуры происходит со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$. После термической обработки (ТО) образец проходил шлифовку ($\approx 10\text{ мкм}$) и полировку для того, чтобы частично устранить волноводы микрометровой толщины, возникшие в результате эффузии фтора с поверхности стекла. Далее проводился НИО по режимам, указанным выше. Очередность процессов создания ОБР и волновода на ФТР стекле состоит из 4-х этапов, проиллюстрированных на рис. 2.

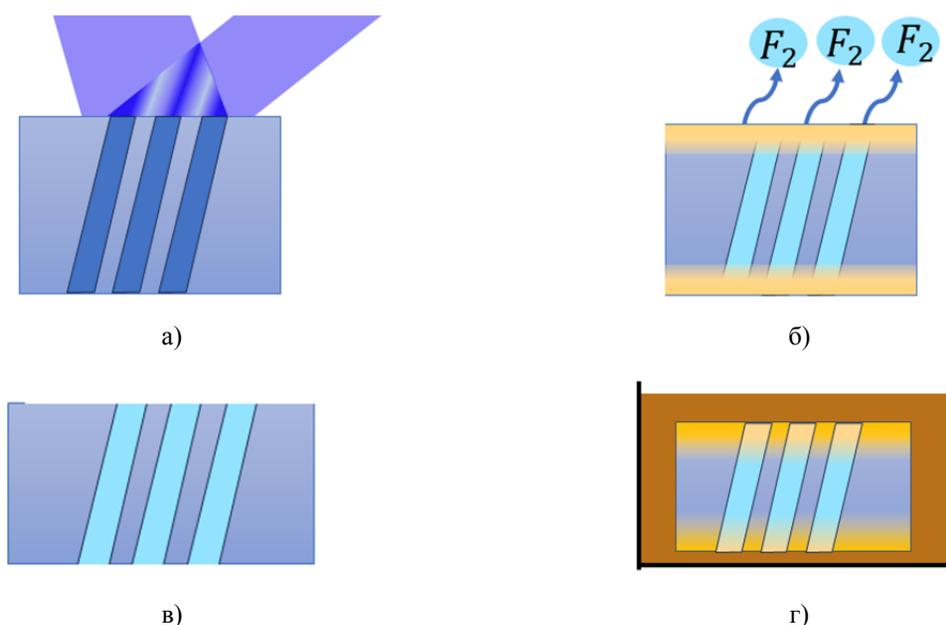


Рис. 2. Технология монолитной интеграции планарных оптических волноводов и ОБР:

а) запись ОБР; б) ТО при 505°C ; в) шлифовка и полировка после ТО; г) ионный обмен в расплаве соли при 320°C

3. Результаты

Был создан образец градиентного планарного оптического волновода с ОБР в качестве элемента ввода-вывода излучения для одной волноводной моды. Образец был протестирован с различными элементами ввода-вывода излучения. Результаты тестирования представлены на рис. 3. На рис. 3а показан образец ФТР стекла с записанной ОБР до НИО (т. е. не волноводный режим) и схематическое изображение распространения луча за счет полного внутреннего отражения по пластине-подложке. На рис. 3б показан образец с многомодовым волноводом после НИО, схематическое изображение распространения волноводного излучения и призмные элементы ввода и вывода излучения из волновода. На рис. 3в и 3г показан ввод излучения при помощи ОБР как в подложку, так и в волновод. При этом на рис. 3в и излучение, распространяющееся по подложке, и излучение, распространяющееся по волноводу, выводятся через торец, что крайне затрудняет их идентификацию. Установка призмы позволяет разделить эти световые потоки, т. е. излучение из подложки выводится через полированный торец, а волноводное излучение выводится призмой (рис. 3г).

Чтобы излучение распространялось только по волноводу, в качестве ввода излучения в волновод использовалась призма, а в качестве вывода волноводной моды — ОБР (рис. 3д). Этот пример наглядно показывает вывод волноводной моды с помощью ОБР.

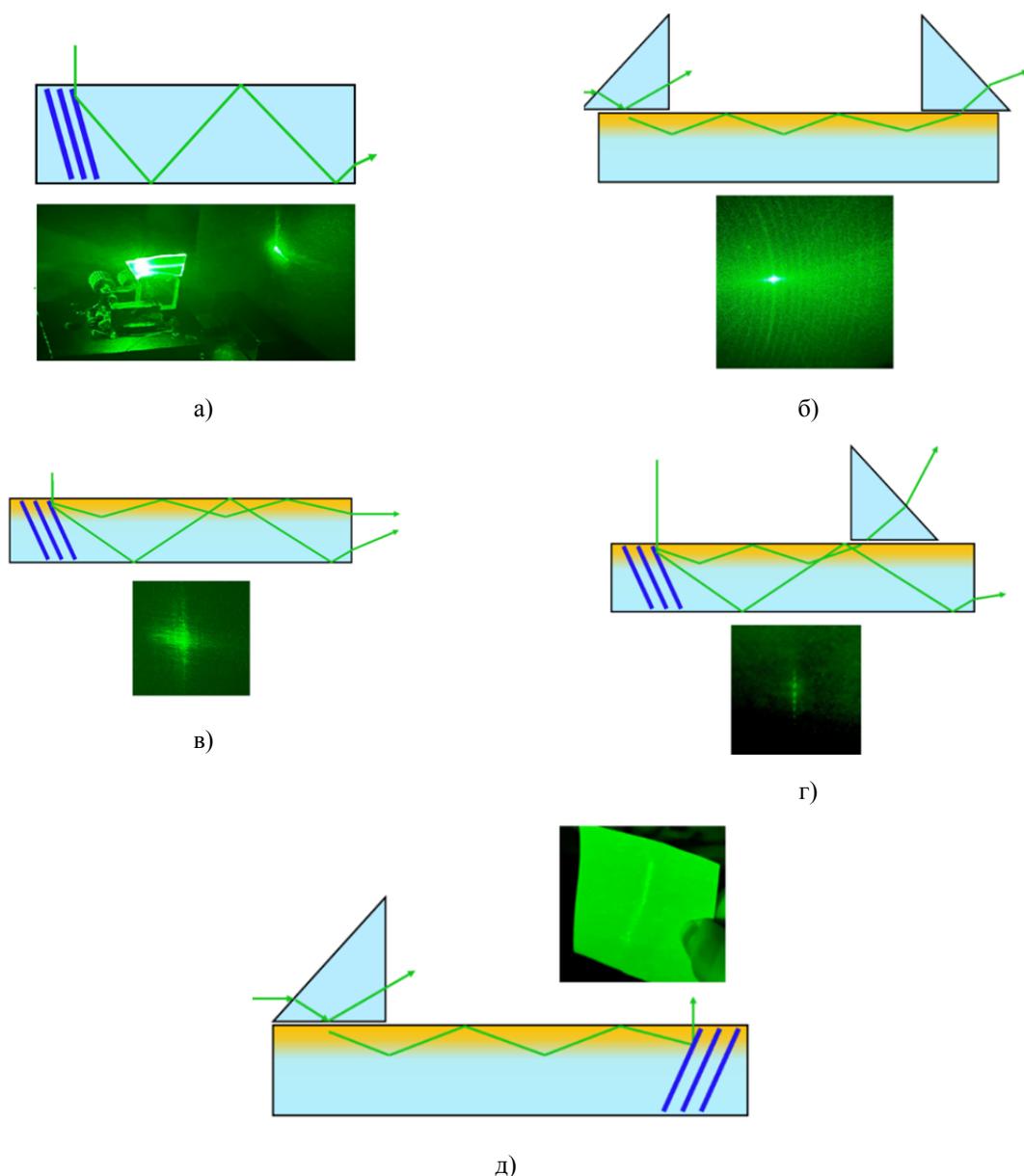


Рис. 3. Результаты тестирования образца:

- а) решетчатый ввод в пластину до НИО; б) призмный ввод и вывод из волновода; в) решетчатый ввод, вывод из торца; г) решетчатый ввод, призмный вывод моды волновода; д) призмный ввод, решетчатый вывод

Заключение

В работе показана возможность монолитной интеграции нескольких оптических элементов в едином материале — создание элементов ввода-вывода излучения и планарного оптического волновода в фото-термо-рефрактивном стекле.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Никоноров, Н. В.** Фототерморефрактивное стекло — перспективный материал фотоники (обзор) / Н. В. Никоноров, С. А. Иванов, Е. С. Мусихина // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 3. — С. 68–100.

Ion exchange and photo-thermo-induced crystallization technologies combination in PTR glass for waveguide structures and diffraction input-output elements creation

V. A. Popova, N. V. Nikonorov, D. V. Marasanov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Photo-thermo-refractive (PTR) glass is a promising material for recording volume Bragg gratings (VBG). The recording is based on photo-thermo-induced (PTI) crystallization of glass, i.e. under the action of UV radiation and subsequent heat treatment ($T=505\text{ }^{\circ}\text{C}$) nanocrystals grow in the irradiated area. The refractive index of crystals differs from the refractive index of the glass matrix. The sodium content in the PTR glass (15 mol%) allows the usage of ion-exchange diffusion technology at the second stage in order to create planar waveguides, for example, by replacing sodium ions in the glass with silver ions from a salt melt (AgNO_3). This process occurs at a temperature of $320\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is significantly lower than the crystallization temperature of the PTR glass. The combination of PTI crystallization and ion exchange allows the implementation of monolithic integration of the waveguide structure and the VBG for input-output of radiation.

Keywords: *Photo-thermo-refractive glass, Bragg grating, Ion exchange, Planar waveguide*

Влияние температуры на фотохромные свойства пленок бактериородопсина

Ю.Д. Лантух

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

В работе представлены результаты эксперимента по оценке влияния температуры на временные параметры фотохромного цикла пленочных образцов бактериородопсина. Время самопроизвольного восстановления окраски образца после экспонирования лазерным излучением при комнатной (20 °С) температуре составляет около 100 секунд. При повышении температуры время регенерации в исходную форму сокращается, что объясняется увеличением скорости темновых реакций восстановления исходной формы белка. На этой основе создана модель бесконтактного датчика температуры окружающей среды.

Ключевые слова: Бактериородопсин, Фотохромный цикл, Время регенерации, Датчик температуры

Введение

Молекулы бактериородопсина (БР) встроены в клеточные мембраны галофильных бактерий и осуществляют бесхлорофилльный фотосинтез в клетках таких бактерий, т. е. являются простейшими биологическими преобразователями световой энергии.

Структура, свойства и возможности модификации БР всесторонне исследованы [1, 2].

Замечательные физико-химические свойства бактериородопсина, в частности его фотохромные свойства, могут быть использованы для разработки различного рода практических устройств. Чаще всего исследуются применения в устройствах записи и обработки оптической информации [3].

В ответ на поглощение кванта света бактериородопсин BR(548) (форма А) обесцвечивается, вступая в цикл фотохимических превращений. При этом происходит обратимая изомеризация ретиналя BR(548) с последующим образованием формы В (412). Этот процесс обратим, и в темноте протекает в обратном направлении [1].

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния температуры на скорость восстановления исходной формы А пленочных образцов БР (пленка «Биохром») после обесцвечивания (перехода в форму В) пленки лазерным излучением.

Спектры поглощения пленок регистрировали на оптоволоконном спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes). Спектр поглощения (рис. 1) образца (светадаптированная форма) имеет максимум при 558 нм.

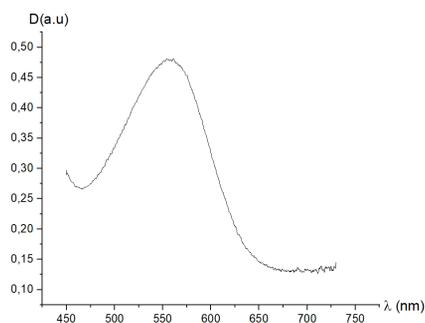


Рис. 1. Спектр поглощения образца пленки «Биохром-БМ»

Пленочный образец БР помещался в термостатируемую камеру с прозрачными оптическими окнами. Температура образца изменялась от комнатной (20 °С) до 50 °С. Импульсное обесцвечивание и непрерывное зондирование образца осуществлялось YAG-Nd лазером с $\lambda = 532$ нм (KLM-532, ФТИ Оптроник). Одна часть пучка излучения лазера мощностью 100 мВт в течение 5 с обесцвечивала образец. Другая часть (1 мВт) просвечивала образец постоянно. В момент обесцвечивания пленки БР интенсивность прошедшего образца пучка возрастала, а затем по мере восстановления окраски образца, возвращалась к исходному уровню.

Кинетические кривые $I = f(t)$ восстановления окраски пленки БР регистрировались прибором FieldMaster GS (Coherent), сопряженным с компьютером, I — интенсивность зондирующего пучка лазера (532 нм), прошедшего через образец.

Типичный вид кинетической кривой восстановления формы А образца, полученный при 25 °С приведен на рис. 2.

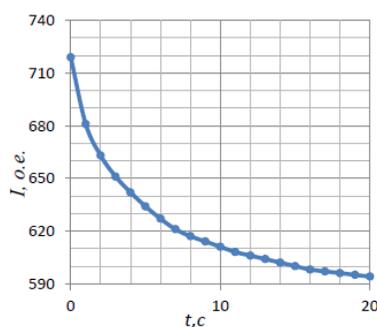


Рис. 2. Кинетическая кривая восстановления формы А образца

Кинетика релаксации пленки БР в исходную форму А удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией вида $I = I_0 \exp(-kt)$, где k — константа скорости релаксации.

С повышением температуры окружающей среды скорость релаксации возрастает, что объясняется увеличением скорости темновых реакций восстановления исходной формы белка. На этой основе создана модель датчика температуры окружающей среды.

К преимуществам такого датчика можно отнести:

- бесконтактность (датчик чисто оптический);
- компактность;
- широкий интервал температур (особенность сенсора в том, что молекулы БР в нем кристаллизованы в прочный двумерный слой, выдерживающий высокие температуры [2]);
- число фотохромных циклов более 10^5 и др.

Таким образом, в работе показано, что при повышении температуры время фотохромной регенерации пленок бактериородопсина в исходную форму сокращается. На этой основе создана модель бесконтактного датчика температуры окружающей среды.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, проект № FSGU-2023-0003.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Дружко, А. Б. Бактериородопсин: фундаментальные аспекты и возможности для практического применения / А. Б. Дружко — М.: РАН, 2022. — 92 с.
- [2] Всеволодов, Н. Н. Биопигменты – фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине / Н. Н. Всеволодов — М.: Наука, 1988. — 224 с.
- [3] Микаэлян, А. Л. Динамика дифракционной эффективности периодически регенерируемых голограмм в бактериородопсине / А. Л. Микаэлян, Е. А. Никанорова, В. К. Салахутдинов // Квантовая электроника. — 1994.— Том 21.— № 8.— С. 781–784.

Effect of temperature on the photochromic properties of bacteriorhodopsin films

Yu.D. Lantukh

Orenburg State University, Orenburg, Russia

The paper presents the results of assessing the influence of temperature on the time parameters of the photochromic cycle of film samples (“Biochrome”) of bacteriorhodopsin. The time for spontaneous restoration of sample color after exposure to laser radiation at room temperature (20°C) is about 100 seconds. As the temperature increases, the time for regeneration into the original form is reduced, which is explained by an increase in the rate of dark reactions to restore the original form of the protein. On this basis, a model of a non-contact ambient temperature sensor was created.

Keywords: Bacteriorhodopsin, Photochromic cycle, Regeneration time, Temperature sensor

Секция 11
Биофотоника

Анализ реакции клеток на фотодинамическое воздействие с использованием голографической микроскопии, SLIM и FLIM

И. В. Семенова, А. В. Белашов, А. А. Жихорева

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлен анализ реакции клеток HeLa на фотодинамическое воздействие с фотосенсибилизатором Радахлорин. Исследование проводилось с помощью методов цифровой голографической микроскопии, spatial light interference microscopy (SLIM) и fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM). Показано, что голографические методы позволяют проводить неинвазивный мониторинг реакции как отдельных клеток в образце, так и их популяции, на фотодинамическое воздействие. Определение динамики изменений вносимого клетками фазового набега дает информацию о пути и скорости гибели клеток. Использование низкокогерентного источника излучения в методе SLIM обеспечило уменьшение ошибки измерений вследствие отсутствия когерентного шума. Анализ изменения времени затухания и интенсивности флуоресценции Радахлорина в клетках методом FLIM показал, что эти изменения вызываются фотовыцветанием фотосенсибилизатора, а не процессами, происходящими в ходе клеточной гибели.

Ключевые слова: Внеосевая цифровая голография, SLIM, FLIM, Фотодинамическое воздействие, Типы клеточной гибели

Эффект фотодинамической терапии (ФДТ) на уровне организма, как известно, обусловлен тремя взаимосвязанными процессами — прямой гибелью опухолевых клеток, повреждением сосудов и активацией иммунного ответа. При этом реакция клеток на фотодинамическое воздействие пока исследована недостаточно. В частности, большой интерес представляет анализ того, каким образом изменение дозы, режима и времени облучения влияет на механизм гибели клеток. Кроме того, известно, что эффективность ФДТ для пациентов с одной и той же локализацией опухоли существенно различается, что может быть связано с различиями в запуске разных механизмов гибели (апоптоз, некроз) у разных клеток. Определение факторов, обеспечивающих гибель клеток преимущественно через апоптоз, крайне желательно для медицинских применений.

Идентификация апоптоза и некроза клеток обычно осуществляется путем оценки целостности клеточной мембраны с использованием стандартных тестов и анализом на конфокальном флуоресцентном микроскопе. Другие подходы основаны на определении морфологических изменений клеток с помощью проточной цитометрии или оптической или электронной микроскопии. Однако большинство используемых методов не позволяет контролировать изменения морфологии клеток в динамике, а предоставляют информацию о состоянии клетки в определенный момент времени. Флуоресцентные методы оперируют со специальными флуоресцентными зондами, которые могут изменять клеточные характеристики. Методы количественного фазового имиджинга, основанные на регистрации изменений фазы просвечивающего клетки излучения, будучи неразрушающими, позволяют контролировать изменения клеточной структуры в динамике. Значительный интерес представляет также анализ временных характеристик люминесценции фотосенсибилизатора в клетках с разной онкогенностью, а также в процессе фотодинамического воздействия и после него.

В настоящей работе проведено исследование изменений в клетках HeLa, индуцированных фотодинамическим воздействием с фотосенсибилизатором Радахлорин. Анализ изменений клеточной морфологии проводился с использованием внеосевой цифровой голографической микроскопии и низкокогерентного метода количественного фазового имиджинга — spatial light interference microscopy (SLIM) [1]. Также был проведен анализ изменений времени затухания флуоресценции фотосенсибилизатора в клетках методом время-разрешенной флуоресцентной микроскопии FLIM.

Экспериментальная реализация осуществлялась следующим образом.

1. Лабораторная установка голографического микроскопа была собрана по схеме Маха-Цандера с HeNe лазером в качестве источника излучения. При обработке зарегистрированных голограмм были получены пространственные распределения фазового набега в клетках и определен ряд параметров, в том числе средний фазовый набег, сухая масса, морфологические параметры [2], позволяющие идентифицировать механизм гибели клеток [3]. Мониторинг динамики изменения этих параметров в течение 1–2 часов после воздействия позволил определить скорость процесса гибели.

2. Регистрация методом SLIM была реализована на базе инвертированного микроскопа Nikon TI2-U с использованием пространственно-временного модулятора света (LCOS-SLM) PLUTO-2.1 NIR-133 (Holoeye), размещенного в плоскости, сопряженной плоскости изображения, что обеспечивало возможность создания фазово-контрастных картин с заданным фазовым сдвигом. Регистрация четырех осевых цифровых голограмм исследуемого объекта с разными значениями фазового сдви-

га, внесенного SLM в опорную, нерассеянную объектом волну $[0, \pi/2, \pi, 3\pi/2]$, а также использование метода фазовых шагов позволило восстанавливать пространственные распределения фазы, вносимые исследуемым объектом в волновой фронт. Для записи голограмм использовался низкокогерентный источник излучения, что позволило минимизировать ошибки, связанные с когерентным шумом.

3. Пространственные распределения интенсивности и времен затухания флуоресценции фотосенсибилизатора и динамика их изменения регистрировались системой FLIM на базе инвертированного микроскопа Nikon TI2-U со сканирующим конфокальным TCSPC модулем DCS 120 (Becker&Hickl) и регистрацией с помощью GaAsP фотодетектора HPM-100-40 (Becker&Hickl).

4. В качестве образцов использовались культуры клеток карциномы шейки матки HeLa, фотодинамическое воздействие осуществлялось с использованием фотосенсибилизатора хлороинового ряда Радахлорин (РадаФарма). Фотосенсибилизатор добавлялся в культуральную среду клеток в чашке Петри, клетки инкубировались в этой среде в течение 24 часов, после чего среда заменялась на чистую. Фотосенсибилизированные клетки облучались лазером на длине волны 405 нм, вблизи максимума полосы поглощения Радахлорина, что приводило к образованию активных форм кислорода, токсичных для клеток. Разные механизмы гибели клеток запускались при варьировании концентрации фотосенсибилизатора в культуральной среде и/или длительности облучения клеток.

В проведенных ранее исследованиях [3, 4] мы ограничивались анализом усредненной реакции всей популяции клеток на фотодинамическое воздействие. Однако голографические методы позволяют также получать информацию о динамике фазового набеге в индивидуальных клетках. При этом динамика изменений среднего фазового набеге по популяции позволяет определить преобладающий тип клеточной гибели: рост этого параметра указывает на апоптоз, а экспоненциальное уменьшение — на некроз. Определение этой динамики у отдельных клеток позволяет проанализировать разброс реакции отдельных клеток в популяции. На рис. 1а приведены характерные зависимости изменения среднего фазового набеге в популяциях клеток линии HeLa после фотодинамического воздействия с Радахлорином при разных дозах облучения. На рис. 1б и 1в приведены примеры зависимостей изменения среднего фазового набеге в отдельных клетках образца, характерные для апоптоза и некроза, соответственно. Эти зависимости получены при одной и той же дозе облучения образца и демонстрируют, насколько может различаться реакция индивидуальных клеток в образце, причем не только по типу клеточной гибели, но и по скорости процесса гибели.

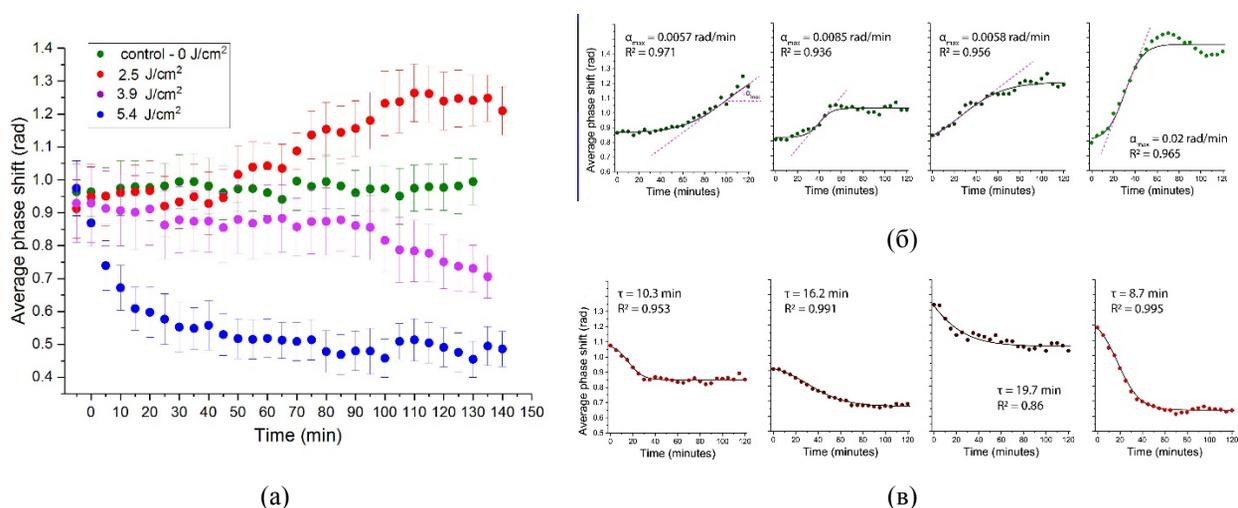


Рис. 1. Динамика среднего фазового набеге в популяциях клеток HeLa после фотодинамического воздействия при разных дозах облучения (а), характеризующие апоптоз (красные кружки), некроз (синие), вторичный некроз (фиолетовые) и контроль (зеленые); примеры динамики изменения среднего фазового набеге в индивидуальных клетках образца, полученные при одной и той же дозе облучения и характерные для апоптоза (б) и некроза (в)

С помощью метода FLIM было проанализировано изменение среднего времени затухания и интенсивности флуоресценции Радахлорина в клетках HeLa, вызванное фотодинамическим воздействием с разными дозами облучения. Проведенный анализ показал, что фотодинамическое воздействие приводило к уменьшению времени затухания и падению интенсивности флуоресценции фотосенсибилизатора. На рис. 2 приведены динамики изменения этих параметров при четырех до-

зах облучения. Как видно из полученных данных, увеличение дозы облучения приводило к более резкому уменьшению как интенсивности, так и времени затухания флуоресценции. При этом уменьшение интенсивности флуоресценции происходило только между точками, соответствующими клеткам до и сразу после облучения, а постепенное небольшое уменьшение времени затухания флуоресценции наблюдалось и позже, на протяжении почти часа после облучения, затем достигалось плато. При этом начальное резкое уменьшение времени затухания зависело от дозы облучения, а последующее плавное изменение было практически одинаковым при всех дозах. Интересно, что уменьшение времени затухания флуоресценции Радахлорина наблюдалось как при апоптозе, так и при некрозе клеток, что свидетельствует о том, что изменение этого параметра связано не с процессами, происходящими в клетке в целом, а скорее с изменением параметров локального микроокружения молекул фотосенсибилизатора или с их модификацией в ходе фотовыцветания. Заметим также, что фотовыцветание приводило к формированию двухэкспоненциального паттерна затухания сигнала флуоресценции, что также свидетельствует об образовании модифицированных структур молекул. Необходимо также отметить, как показано ранее [5], Радахлорин проникает в клетки путем эндоцитоза в виде комплексов с бычьим сывороточным альбумином и накапливается в основном в лизосомах, что приводит к неравномерным пространственным распределениям Радахлорина в клетках и к идентичности их микроокружения.

Таким образом, мы показали, что голографические методы позволяют проводить неинвазивный мониторинг реакции как отдельных клеток в образце, так и их популяции, на фотодинамическое воздействие. Определение динамики изменений вносимого клетками фазового набегает дает информацию о пути и скорости гибели клеток. Количественные данные, полученные методами внеосевой голографической микроскопии и SLIM, были достаточно близкими, при этом использование низкокогерентного источника излучения в методе SLIM обеспечило существенное уменьшение ошибки измерений вследствие отсутствия когерентного шума. Анализ изменения времени затухания и интенсивности флуоресценции Радахлорина в клетках при фотодинамическом воздействии показал, что эти изменения вызываются фотовыцветанием фотосенсибилизатора, а не процессами, происходящими в ходе клеточной гибели.

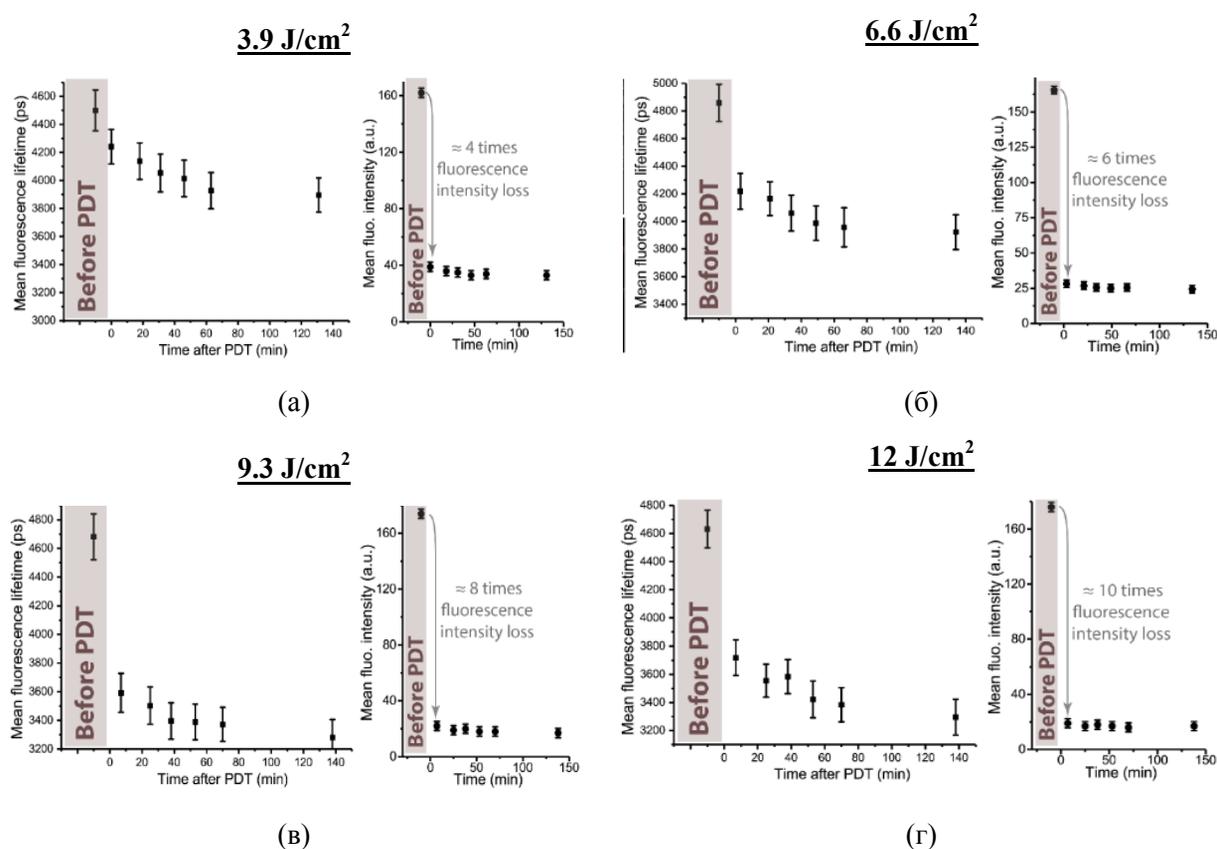


Рис. 2. Динамики среднего времени затухания и интенсивности флуоресценции Радахлорина в клетках линии HeLa в зависимости от времени после облучения при разных дозах

Благодарность

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 21-72-10044. Авторы благодарят коллег из института Цитологии РАН Т. Н. Беляеву, А. В. Салову, Т. К. Литвинову и Е. С. Корнилову за клеточные образцы и полезные обсуждения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Wang, Z. Spatial light interference microscopy (SLIM) / Z. Wang, L. Millet, M. Mir, H. Ding, S. Unarunotai, J. Rogers, M. U. Gillette, G. Popescu // Optics Express. — 2011. — Vol 19. — № 2. — P. 1016.
- [2] Girshovitz, P. Generalized cell morphological parameters based on interferometric phase microscopy and their application to cell life cycle characterization / P. Girshovitz, N. T. Shaked // Biomedical Optics Express. — 2012. — Vol 3. — № 8. — P. 1757.
- [3] Belashov, A.V. Quantitative assessment of changes in cellular morphology at photodynamic treatment in vitro by means of digital holographic microscopy / A.V. Belashov, A. A. Zhikhoreva, T. N. Belyaeva, N. N. Nikolsky, I. V. Semenova, E. S. Kornilova, O. S. Vasyutinskii // Biomedical Optics Express. — 2019. — Vol 10. — № 10. — P. 4975.
- [4] Belashov, A.V. Machine Learning Assisted Classification of Cell Lines and Cell States on Quantitative Phase Images / A. V. Belashov, A. A. Zhikhoreva, T. N. Belyaeva, A. V. Salova, E. S. Kornilova, I. V. Semenova, O. S. Vasyutinskii // Cells. — 2021. — Vol 10. — P. 2587.
- [5] Belashov, A.V. Automatic segmentation of lysosomes and analysis of intracellular pH with Radachlorin photosensitizer and FLIM / A. V. Belashov, A. A. Zhikhoreva, A. V. Salova, T. N. Belyaeva, I. K. Litvinov, E. S. Kornilova, I. V. Semenova, O. S. Vasyutinskii // Biochemical and Biophysical Research Communications. — 2024. — Vol 710. — P. 149835.

Analysis of cell response to photodynamic treatment using holographic microscopy, SLIM and FLIM

I. V. Semenova, A. V. Belashov, A. A. Zhikhoreva

Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

We present an analysis of the response of HeLa cells in vitro to photodynamic treatment with Radachlorin photosensitizer. The study was carried out using digital holographic microscopy, spatial light interference microscopy (SLIM) and fluorescence lifetime imaging microscopy (FLIM). It was shown that holographic methods provide non-invasive monitoring of the response of both individual cells in a sample and their population to photodynamic treatment. The dynamics of changes in average phase shift introduced by cells provide information on the pathway of cell death and death rate. Utilization of a low-coherence radiation source in the SLIM method provided significant reduction of the measurement error due to diminished coherent noise. The FLIM-assisted analysis of changes in Radachlorin fluorescence intensity and decay time in cells under photodynamic treatment showed that these changes were caused by photosensitizer photobleaching, rather than by processes occurring in the course of cell death.

Keywords: *Off-axis digital holographic microscopy, SLIM, FLIM, Photodynamic treatment, Cell death pathways*

Разработка сенсоров жидкостной/газовой биопсии на основе фотонных интегральных схем и микрофлюидики для биомедицинских применений

А. Ю. Кузин^{1,2,3}, В. С. Чернышёв⁴, И. Н. Флоря², В. В. Ковалюк^{2,3}, А. С. Голиков⁵, С. Н. Васильев^{1,2}, Г. Н. Гольцман^{3,6}, Д. А. Горин¹

¹ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

³ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии им. В. И. Кулакова, Москва, Россия

⁵ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁶ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Сегодня поиск биомаркеров заболеваний и методов их выявления является одним из важнейших направлений в современном здравоохранении. В свою очередь, микрожидкостная биопсия на основе детектирования концентрации специфичных внеклеточных везикул представляет собой передовой многообещающий подход в неинвазивной медицинской диагностике для онкологических, нейродегенеративных и сердечно-сосудистых заболеваний. В данной работе продемонстрировано применение комбинации фотонных интегральных схем с микрофлюидными каналами в качестве нового подхода в рамках реализации микрожидкостной и газовой биопсии. Работа имеет значительный потенциал для осуществления точного контроля модификации поверхности, а также диагностики и мониторинга эффективности выбранного лечения для биомедицинских целей.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, Микрофлюидика, Микрожидкостная биопсия, Лаборатория на чипе, Небольшие внеклеточные везикулы

Введение

Сегодня одна из самых актуальных проблем медицины — это поиск быстрых, компактных и доступных по стоимости методов диагностики состояния, выявления заболеваний и инфекций в организме человека на ранней стадии. Замена традиционной биопсии тканей на анализ биологических жидкостей или выдыхаемых газов может существенно снизить вероятность диссеминации и последующего метастазирования, обеспечить выявление заболевания на ранней стадии, оценить эффективность как химиотерапии, так и оперативного вмешательства, а также сохранить качество жизни пациентов. Микрожидкостная биопсия представляет собой новейший метод диагностики на основе образца крови. Известно, что внеклеточные везикулы (ВВ), содержащиеся во многих биологических жидкостях, связаны с патогенезом онкологических, нейродегенеративных и сердечно-сосудистых заболеваний [1]. Обнаружение специфичных ВВ и потенциальный контроль их количества в биологических жидкостях могут обеспечить успешную терапевтическую стратегию, которая включает снижение количества циркулирующих ВВ до нормального уровня для предотвращения прогрессирования заболеваний. Для определения концентрации специфичных ВВ одним из потенциально успешных направлений развития данной области является создание лаборатории на чипе (LOC, от англ. Lab-On-a-Chip) с использованием фотонных интегральных схем (ФИС). ФИС — это устройства, которые работают подобно электронным интегральным схемам, но используют фотоны вместо электронов. Взаимодействие света, распространяющегося внутри ФИС, с исследуемым аналитом меняет спектральную характеристику интегрально-оптических устройств, благодаря чему можно извлечь показатель преломления среды/исследуемого раствора с высокой точностью. При использовании комбинации ФИС с микрофлюидикой становится возможным исследование ультрамалых концентраций жидкостей и газов [2], создание универсального и устойчивого к производственным отклонениям сенсора [3], а также извлечение информации о комплексном показателе преломления (RI, от англ. Refractive Index) исследуемых аналитов [4]. Однако стоит отметить, что без функционализации поверхности чувствительных элементов ФИС, разрабатываемая лаборатория на чипе может быть использована только в целях детектирования концентрации двухкомпонентных растворов, а также одиночного присутствующего органического или неорганического аналита в буферном растворе или в газовой среде, окружающей чувствительную область сенсора, что для многих приложений недостаточно.

Результаты и методы

В данной работе исследуется комбинация оптических сенсоров на основе фотонных интегральных схем с микрофлюидикой для определения концентрации экзосомальных маркеров, перспективных для диагностики и оценки эффективности лечения онкологических заболеваний. Основное

внимание уделено изготовлению прототипа устройства и оценке чувствительности и специфичности предложенного подхода в рамках реализации жидкостной/газовой биопсии. На первом этапе работы была решена проблема с низкой специфичностью ФИС. Для этого была проведена послойная сборка (LBL, от англ. Layer-By-Layer) и установлено, что особенностью сенсора на основе ФИС является возможность точного контроля модификации поверхности с помощью измерений минимального сдвига положения резонанса [5]. Молекулы бычьего сывороточного альбумина (BSA) и дубильной кислоты (ТА) были выбраны для LBL-сборки, поскольку, с одной стороны, они образуют стабильную пленку LBL-сборки на основе водородных связей, а, с другой стороны, монослой ТА и BSA могут быть использованы для конъюгации с целевыми молекулами. На втором этапе после решения проблемы со специфичностью, впервые, была продемонстрирована комбинация ФИС в виде интерферометра Маха-Цендера с микрофлюидикой для контроля и отслеживания модификации нитрид кремниевой платформы для активации поверхности рецепторами в форме ДАРПинов в режиме реального времени. Это позволило использовать небольшие ВВ, содержащие выбранный мембранный белок (HER2) в качестве аналита [6]. Для экспериментального тестирования нами были использованы небольшие ВВ с концентрацией $4,2 \times 10^{10}$ частиц/мл, выделенные из культуральной среды клеток рака яичников (SKOV3), которые имеют высокую экспрессию HER2, и клеток рака молочной железы (MDA-MB-231) со значительно более низкой экспрессией HER2 [7]. Разница в экспрессии HER2 была подтверждена вестерн-блоттингом ВВ двух упомянутых клеточных линий. Анализ траекторий наночастиц и сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) позволили подтвердить успешное выделение небольших ВВ и определить их размер в диапазоне от 30 до 150 нм [8].

Заключение

Таким образом, разработанная платформа демонстрирует высокий потенциал для количественной оценки биологических маркеров, таких как ВВ, содержащие специфичный мембранный белок HER2. Разработанный биосенсор предоставляет результаты в режиме реального времени, используя микролитровые объемы тестируемого образца. Однако, определение максимальной чувствительности и предела обнаружения для специфичных ВВ еще предстоит исследовать. Представленный задел может быть использован в качестве первого шага к созданию высокочувствительных сенсоров жидкостной/газовой биопсии для точного контроля нанесения покрытий, с точки зрения химического применения, и диагностики/мониторинга эффективности лечения в медицине.

Благодарность

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-79-00056 (численный расчет ФИС), грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSME-2022-0008) (экспериментальное тестирование ФИС).

Список источников

- [1] **Kalluri, R.** The biology, function, and biomedical applications of exosomes / R. Kalluri, V. LeBleu // *Science*. — 2020. — Vol 367. — № 6478. — P. eaau6977. — DOI: 10.1126/science.aau6977.
- [2] **Kuzin, A.** Hybrid nanophotonic–microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses / A. Kuzin, V. Chernyshev, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, R. Ozhegov, D. Gorin, N. Gippius, G. Goltsman // *Optics Letters*. — 2022. — Vol 47. — № 9. — P. 2358–2361. — DOI: 10.1364/OL.457309.
- [3] **Kuzin, A.** Ultrasensitive nanophotonic random spectrometer with microfluidic channels as a sensor for biological applications / A. Kuzin, I. Fradkin, V. Chernyshev, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, I. Florya, N. Gippius, D. Gorin, G. Goltsman // *Nanomaterials*. — 2022. — Vol 13. — № 1. — P. 81. — DOI: 10.3390/nano13010081.
- [4] **Kuzin, A.** Microfluidic–nanophotonic sensor for on-chip analysis of complex refractive index / A. Kuzin, K. Panda, V. Chernyshev, I. Florya, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, G. Chulkova, D. Kolesov, D. Gorin, G. Goltsman // *Applied Physics Letters*. — 2024. — Vol 124. — № 6. — DOI: 10.1063/5.0190351
- [5] **Kuzin, A.** In situ monitoring of layer-by-layer assembly surface modification of nano-photonic-microfluidic sensor / A. Kuzin, V. Chernyshev, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, G. Goltsman, D. Gorin // *Analytical Chemistry*. — 2022. — T. 94. — № 42. — P. 14517–14521. — DOI: 10.1021/acs.analchem.2c03909.
- [6] **Kuzin, A.** Real-time surface functionalization of a nanophotonic sensor for liquid biopsy / A. Kuzin, V. Chernyshev, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, S.Svyatodukh, S. Perevoschikov, I. Florya, A. Shulga, S. Deyev, G. Goltsman, D. Gorin // *Applied Physics Letters*. — 2023. — Vol 123. — № 19. — DOI: 10.1063/5.0167631.
- [7] **Gall, V.** Trastuzumab increases HER2 uptake and cross-presentation by dendritic cells / V. Gall, A. Philips, N. Qiao, K. Clise-Dwyer, A. Perakis, M. Zhang, G. Clifton, P. Sukhumalchandra, Q. Ma, S. Reddy, D. Yu, J. Molldrem, G. Peoples, G. Alatrash, E. Mittendorf // *Cancer research*. — 2017. — Vol 77. — № 19. — P. 5374–5383. — DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-16-2774.

- [8] **Chernyshev, V.** Asymmetric depth-filtration: A versatile and scalable method for high-yield isolation of extracellular vesicles with low contamination / V. Chernyshev, R. Chuprov-Netochin, E. Tsydenzhapova, E. Svirshchevskaya, R. Poltavtseva, A. Merdalimova, A. Yashchenok, A. Keshelava, K. Sorokin, V. Keshelava, G. Sukhikh, D. Gorin, S. Leonov, M. Skliar // *Journal of Extracellular Vesicles*. — 2022. — Vol 11. — № 8. — P. e12256. — DOI: 10.1002/jev2.12256.

Photonic integrated circuits liquid/gas biopsy sensors for biomedical applications

A. Yu. Kuzin^{1,2,3}, V. S. Chernyshev⁴, I. N. Florya², V. V. Kovalyuk^{2,3}, A. S. Golikov⁵, S. N. Vasilev^{1,2}, G. N. Goltsman^{3,6}, D. A. Gorin¹

¹ Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

² University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia.

³ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia.

⁴ National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology named after Academician V.I. Kulakov, Moscow, Russia

⁵ Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia.

⁶ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

Today, the search for biomarkers of diseases and methods for their detection is one of the most important directions in modern healthcare. In turn, microfluidic biopsy based on the detection of the concentration of specific extracellular vesicles represents an advanced promising approach in non-invasive medical diagnostics for oncological, neurodegenerative and cardiovascular diseases. This work demonstrates the use of a combination of photonic integrated circuits with microfluidic channels as a proposed approach in the implementation of microfluidic and gas biopsy. This work has significant potential to enable precise control of surface modification, as well as diagnosis and monitoring of the effectiveness of selected treatments for biomedical applications.

Keywords: Photonic integrated circuits, Microfluidics, Microfluidic biopsy, Lab-on-a-chip, Small extracellular vesicles

Инкапсуляция полупроводниковых квантовых точек AgInS_2 в биологические наночастицы для увеличения эффективности терапии онкологических заболеваний

В.И. Горбачева¹, И.А. Резник², Е.П. Колесова¹

¹ НТУ «Сириус», ФТ «Сириус», Сочи, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе предложен протокол синтеза квантовых точек AIS и их инкапсуляции в альбуминовые наночастицы. Фотофизические свойства квантовых точек обеспечивают высокий квантовый выход флуоресценции и генерации активных форм кислорода, что делает их перспективными фотосенсибилизаторами для ФДТ. Инкапсуляция КТ в альбуминовые наночастицы является перспективной стратегией для увеличения клеточной интернализации за счет увеличения размера системы и их поверхностной модификации. В работе проведена оценка эффективности инкапсуляции КТ, анализ их флуоресцентных свойств и способности генерировать активные формы кислорода.

Ключевые слова: Квантовые точки, Флуоресценция, Супероксид, Фотосенсибилизатор

Введение

Уникальные фотофизические свойства, квантоворазмерные эффекты обеспечили широкое применение квантовых точек (КТ) в электронике, сенсорике, экологии и биологии [1]. В терапии КТ в основном применяются в качестве доноров энергии или заряда для существующих лекарственных средств [2]. КТ AgInS_2 являются альтернативой Cd-содержащим КТ, в одной из наших работ было продемонстрировано, что AgInS_2 КТ способны генерировать супероксид [3], что делает их перспективным сенсибилизатором для ФДТ. Для эффективной ФДТ необходимо накопление КТ в опухоли, что может обеспечить инкапсуляция КТ в альбуминовые НЧ, что приведет к увлечению времени циркуляции системы в крови и интернализации КТ в клетки за счет увеличения размера системы

Результаты

Сначала в течение 30 минут синтезировались AgInS_2 КТ, после чего на них наращивалась оболочка ZnS [4]. Альбуминовые НЧ были получены методом десольватации с последующей стабилизацией [5]. К 200 мкг НЧ было добавлено 50 мкл КТ ($\sim 10^{-4}$ М), смесь инкубировалась в течение 48 часов. Эффективность инкапсуляции составила 64 % для AgInS_2 КТ и 35% для $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ КТ. На рис. 1 представлены спектры флуоресценции полученных систем.

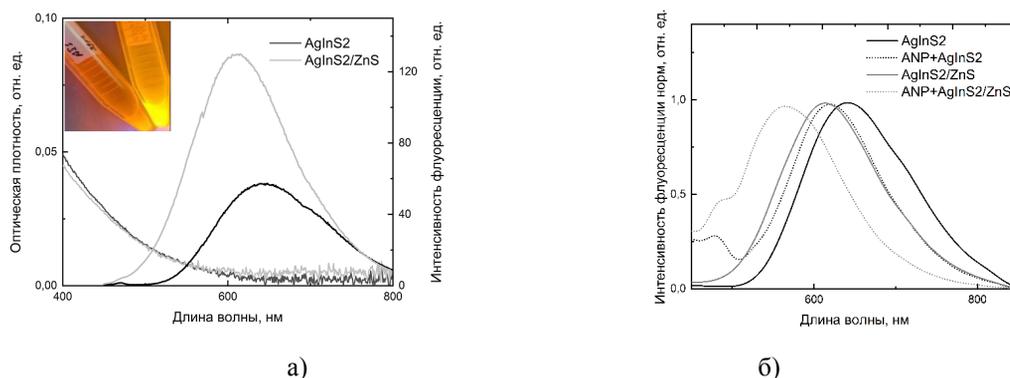


Рис. 1. Спектры поглощения и флуоресценции КТ (а); нормированные спектры флуоресценции КТ, инкапсулированных в альбуминовые НЧ (б)

В результате наращивания оболочки квантовый выход флуоресценции увеличился с 9 до 21 %, пик флуоресценции сместился с 645 до 615 нм. Инкапсуляция в НЧ приводит к изменению их оптических свойств и сдвигу пиков флуоресценции на 28 и 50 нм для КТ AgInS_2 и $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$.

Оценка генерации супероксида осуществлялась с помощью сенсора RNO, что является общепризнанным методом для подобного анализа (рис. 2). Наращивание оболочки приводит к увеличению эффективности генерации супероксида в 3 раза. В результате инкапсуляции КТ эффективность уменьшилась для AgInS_2 КТ в 2,9 раза, а для $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в 2,1 раза за счет пространственных затруднений для взаимодействия КТ и молекул кислорода.

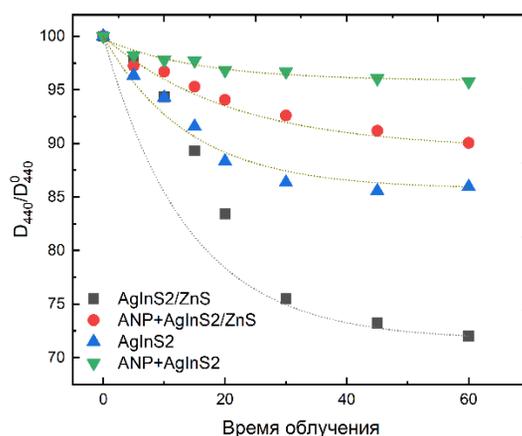


Рис. 2. Зависимость обесцвечивания сенсора RNO на 440 нм в результате облучения образцов. Концентрация КТ соответствует концентрации КТ, инкапсулированных в альбуминовые НЧ

Было продемонстрировано, что AgInS₂ КТ в альбуминовых НЧ являются перспективной системой для тераностики онкологических заболеваний. Нарращивание оболочки ZnS приводит к увеличению как флуоресцентных свойств, так и генерации супероксида. Однако отрицательно сказывается на эффективности инкапсуляции КТ в НЧ.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и федеральной территории «Сириус» № 24-24-20102.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Wegner, K. D. Quantum dots: bright and versatile in vitro and in vivo fluorescence imaging biosensors / K. D. Wegner, N. Hildebrandt // *Chemical Society Reviews*. — 2015. — Т. 44. — №. 14. — P. 4792–4834. — DOI: 10.1039/c4cs00532e.
- [2] Kolesova, E. Bactericidal activity of multilayered hybrid structures comprising titania nanoparticles and CdSe quantum dots under visible light / E. Kolesova, A. Bulgakova, V. Maslov, A. Veniaminov, A. Dubavik, Y. Gun'ko, O. Efremenkova, V. Oleinikov, A. Orlova // *Nanomaterials*. — 2021. — Т. 11. — №. 12. — P. 3331. — DOI: 10.3390/nano11123331.
- [3] Baranov, K. N. Generation of Reactive Oxygen Species by AgInS₂/TiO₂ Nanocomposites upon Exposure to UV and Visible Radiation / K. N. Baranov, E. P. Kolesova, M. A. Baranov, A. O. Orlova // *Optics and Spectroscopy*. — 2022. — Т. 130. — № 5. — P. 336–343. — DOI:10.1134/S0030400X22060017.
- [4] Raevskaya, A. A fine size selection of brightly luminescent water-soluble Ag–In–S and Ag–In–S/ZnS quantum dots / A. Raevskaya, V. Lesnyak, D. Haubold, V. M. Dzhagan, O. L. Stroyuk, N. Gaponik, D. R. Zahn, A. Eychmüller // *The Journal of Physical Chemistry C*. — 2017. — Т. 121. — № 16. — С. 9032–9042. — DOI:10.1021/acs.jpcc.7b00849.
- [5] Kolesova, E. P. Proteolytic resistance determines albumin nanoparticle drug delivery properties and increases cathepsin B, D, and G expression / E. P. Kolesova, V. S. Egorova, A. O. Syrocheva, A. S. Frolova, D. Kostyushev, A. Kostyusheva, S. Brezgin, D. B. Trushina, L. Fatkhutdinova, M. Zyuzin, P. A. Demina, E. V. Khaydukov, A. A. Zamyatnin Jr, A. Parodi // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2023. — Т. 24. — № 12. — С. 10245. — DOI: 10.3390/ijms241210245.

Encapsulation of AgInS₂ semiconductor quantum dots into biological nanoparticles to increase the effectiveness of cancer therapy

V. I. Gorbacheva¹, I. A. Reznik², E. P. Kolesova¹

¹ Sirius University of Science and Technology, Federal territory Sirius, Russia

² ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

This work proposes a protocol for the synthesis of AIS quantum dots and their encapsulation in albumin nanoparticles. QDs provide a high quantum yield of fluorescence and generation of reactive oxygen species, which makes them promising photosensitizers for PDT. Encapsulation of QDs in albumin nanocarriers is a promising strategy to increase cellular internalization by increasing the size of the system and their surface modification. The work assessed the efficiency of QDs encapsulation, analyzed their fluorescent properties and ability to generate reactive oxygen species.

Keywords: Quantum dots, Fluorescence, Superoxide, Photosensitizer

Формирование дифракционных оптических элементов на торцевой поверхности волоконных световодов

В. Е. Федяй^{1,2}, В. С. Терентьев¹, В. А. Симонов¹, В. П. Корольков¹, К. А. Бронников^{1,3}, С. А. Бабин^{1,2}, А. А. Кучмижак^{4,5}, А. В. Достовалов¹

¹ Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

⁵ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Представлены результаты по созданию дифракционных оптических элементов на торцевой поверхности волоконных световодов на основе эффекта образования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур при воздействии фемтосекундных ИК лазерных импульсов. Продемонстрированы одномерные и двумерные дифракционные решетки с периодом ≈ 700 нм. Максимальная дифракционная эффективность составила 10 % при длине волны 670 нм. Кроме того, была продемонстрирована возможность заведения излучения в сердцевину оптического волокна под большим углом ($>45^\circ$) падения излучения на сформированную структуру.

Ключевые слова: Дифракционные оптические элементы, Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры, Фемтосекундное лазерное излучение

Введение

Разработка и создание различных структур на торцевой поверхности волоконных световодов актуально для многих задач биофотоники, сенсорики и малоинвазивной лазерной хирургии, где требуется вывести лазерное излучение из транспортного волокна под определенными углами или наоборот осуществить заведение излучения из интересующей области измерений [1]. В настоящий момент для решения данных задач применяются различные технологии фотолитографии, которые являются многостадийными процессами, требующих использования дорогостоящего оборудования и специальных условий (высокий вакуум) [2].

Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры (ЛИППС) являются привлекательной альтернативой создания периодических структур на поверхности различных материалов [3]. Данные структуры формируются в области воздействия лазерного излучения и представляют собой периодическую модуляцию рельефа поверхности в виде регулярной решетки, морфология и параметры которой зависят от параметров падающего лазерного излучения. Так, в частности, ориентация определяется направлением поляризации падающего излучения, период структур зависит от длины волны лазерного излучения (примерно равен, либо меньше длины волны лазерного излучения), а диаметр воздействующего лазерного пучка может существенно (на несколько порядков) превосходить данную величину, открывая возможность для одновременного формирования большого числа периодов структуры [4].

В данной работе представлены результаты по применению ЛИППС, сформированных на торцевой поверхности оптического волокна с напыленными тонкими пленками металлов, для создания дифракционных оптических элементов (одномерных и двумерных дифракционных решеток), позволяющих выводить излучения, распространяющиеся по сердцевине оптического волокна, или наоборот осуществлять заведение излучения из окружающего пространства.

Результаты

В работе использовалось одномодовое оптическое волокно SMF-28 с диаметром сердцевины и оболочки 8,5 и 125 мкм соответственно. Торцевая поверхность оптического волокна была полирована под углом 90° с последующими напылением пленки титана толщиной 50 нм. Периодические структуры с периодом 680 нм были сформированы при воздействии фемтосекундных ($\tau = 230$ фс) ИК ($\lambda = 1026$ нм) лазерных импульсов с энергией 1,38 мкДж, сфокусированных на торец оптического волокна в фокальной пятно размером 15×150 мкм при скорости сканирования 3 мкм/с. При этом дифракционная эффективность, измеренная на длине волны 670 нм, составила 3 %.

Для повышения дифракционной эффективности был увеличен диаметр пучка, падающего на структуру. Для этой цели использовалось одномодовое волокно, на конце которого была приварена вставка из бессердцевинного волокна длиной 0,7 мм. В данном случае излучение, выходящее из одномодовой сердцевины, расходится в бессердцевинной вставке, и уже гауссов пучок с диаметром

60–70 мкм падает на решетку, сформированную на торце волокна. На рисунке 1а представлены результаты дифракции (1-ый порядок дифракции) широкополосного света лазерного источника суперконтинуума FYLASCT 1000 с шириной спектра от 400 до 2400 нм от такой структуры, сформированной при воздействии фс лазерных импульсов с энергией 1,38 мкДж при скорости сканирования 3 мкм/с, СЭМ изображение которой представлен на рисунке 1б. Максимальная дифракционная эффективность составила 10 % при длине волны 670 нм.

Кроме того, были сформированы двумерные структуры (рис. 1г) на торце волокна при скорости записи 3 мкм/с и энергии импульсов 1,38 мкДж. На рис. 1в представлен результат дифракции широкополосного света. При этом для 1 и –1 порядков дифракция наблюдалась в одной плоскости и аналогично в плоскости, расположенной ортогонально первой (рис. 1в). Максимальная дифракционная эффективность составила 8 % при длине волны 670 нм.

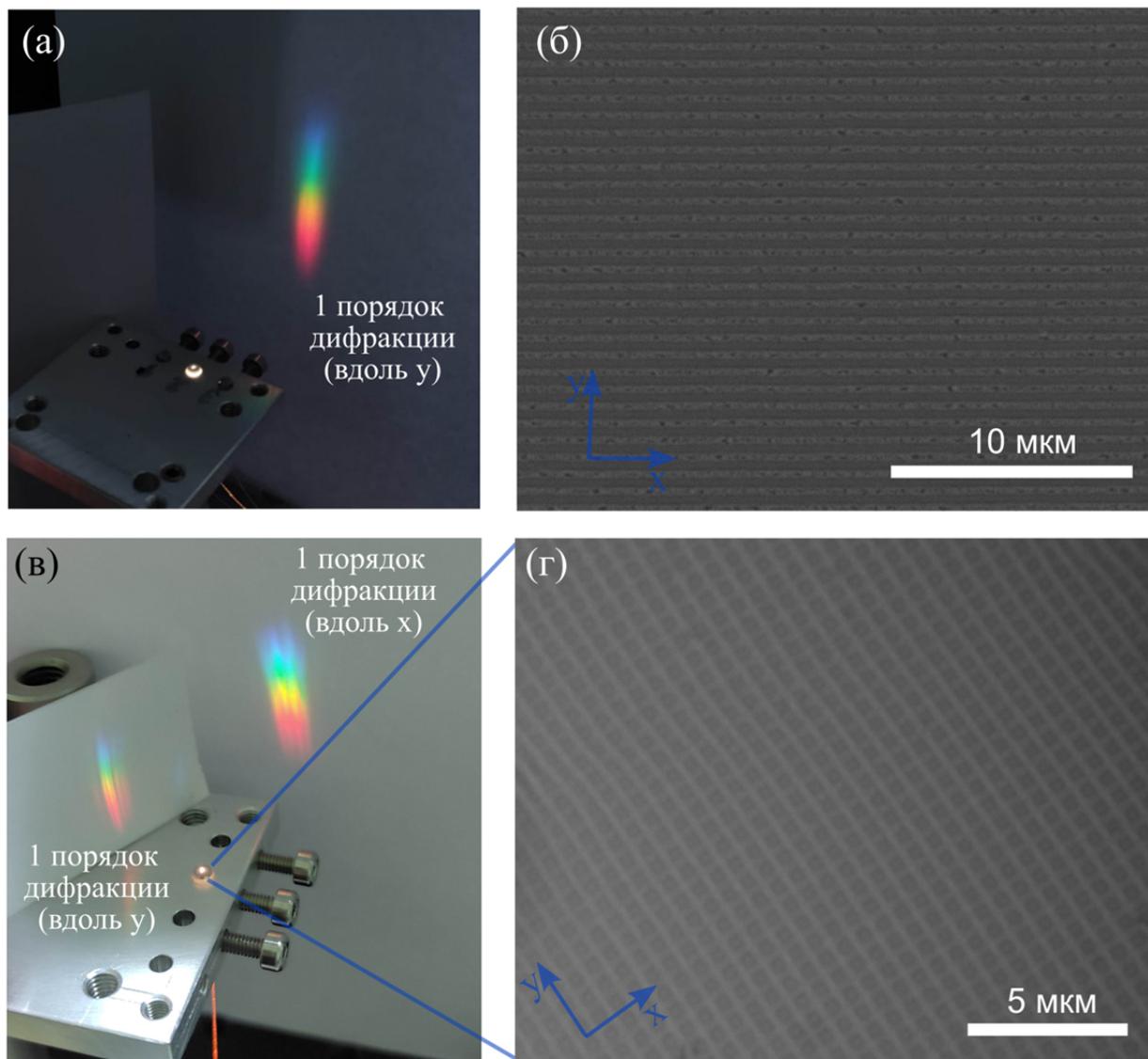


Рис. 1. Результат дифракции белого света на сформированной одномерной ЛИППС (а); СЭМ изображение одномерной ЛИППС на торце волокна (б); результат дифракции белого света на сформированной двумерной ЛИППС (в); СЭМ изображение двумерной ЛИППС на торце волокна (г)

Заключение

В данной работе представлены результаты по формированию одномерных и двумерных ЛИППС с периодом ≈ 700 нм на торцевой поверхности оптического волокна с напыленными тонкими пленками металлов для создания волоконно-оптических дифракционных элементов. Продемонстрирована возможность использования данных элементов как для вывода излучения, распространяющегося по сердцевине оптического волокна, так и наоборот для заведения излучения из

окружающего пространства. Максимальная дифракционная эффективность составила 10 % при длине волны 670 нм. Показана возможность заведения излучения в сердцевину оптического волокна под большим углом падения ($>45^\circ$) излучения на сформированную структуру. Полученные результаты могут найти применение в биофотонике, сенсорике и малоинвазивной лазерной хирургии.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-72-20162 с использованием оборудования ЦКП: ДВФУ, «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН, «Высокие технологии и аналитика наносистем» НГУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Vaiano, P.** Lab on Fiber Technology for biological sensing applications / B. Carotenuto, M. Pisco, A. Ricciardi, G. Quero, M. Consales, A. Crescitelli, E. Esposito, A. Cusano // *Laser & Photonics Reviews*. — 2016. — Vol 10. — № 6. — P. 922–961. — DOI:10.1002/lpor.201600111.
- [2] **Naulleau, P.** Optical Lithography // *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology*. — 2019. — Vol 2. — P. 387–398. — DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.10433-3.
- [3] **Bonse, J.** Laser-induced periodic surface structures — a scientific evergreen / S. Höhm, S. V. Kirner, A. Rosenfeld, and J. Krüger // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2017. — Vol 23. — № 3. — P. 109–123. — DOI:10.1109/JSTQE.2016.2614183.
- [4] **Dostovalov, A V.** Influence of femtosecond laser pulse repetition rate on thermochemical laser-induced periodic surface structures formation by focused astigmatic Gaussian beam / K. A. Okotrub, K. A. Bronnikov, V. S. Terentyev, V. P. Korolkov, S. A. Babin // *Laser Physics Letters*. — 2019. — Vol 16. — № 2. — P. 109–123. — DOI: 10.1088/1612-202X/aaf78f.

Diffraction optical elements formation on optical fibers tip

V. E. Fedya^{1,2}, V. S. Terentiev¹, B. A. Simonov¹, V. P. Korolkov¹, K. A. Bronnikov^{1,3}, S. A. Babin^{1,2}, A. A. Kuchmizhak^{4,5}, A. V. Dostovalov¹

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³ ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

⁵ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

We present the results of the creation of diffraction optical elements on optical fibers tip based on the effect of the formation of laser-induced periodic surface structures upon irradiation of femtosecond IR laser pulses. One-dimensional and two-dimensional diffraction gratings with a period of ≈ 700 nm are demonstrated. The maximum diffraction efficiency was 10% at a wavelength of 670 nm. In addition, the possibility of introducing radiation into the core of an optical fiber at a high angle of incidence of radiation onto the formed structure was demonstrated.

Keywords: Diffraction optical elements, Laser-induced periodic surface structures, Femtosecond laser radiation

Рефрактометрические свойства коллагена, измеренные на выделенных длинах волн видимого и ближнего ИК-диапазонов (в содержании этот доклад был выделен желтым)

Лазарева Е.Н.^{1,2}, Тучин В. В.^{1,2,3}

¹ Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия

В настоящее время актуальной задачей биофотоники является пополнение базы данных показателям преломления биотканей и их компонентов. Так как показатель преломления является важной оптической характеристикой, то его точные значения требуются для решения многих оптических задач. В данной работе представлены данные для показателей преломления водных растворов коллагена и сухожилия хвоста крысы. По экспериментальным данным вычислен показатель преломления чистого (сухого) гемоглобина, который на длине волны 589 нм равен $1,5466 \pm 0,0045$. Показатель преломления измерялся на 12 выделенных длинах волн видимого и ближнего ИК-диапазонов (480–1550 нм) при комнатной температуре. Полученные дисперсионные зависимости аппроксимировались по формуле Зельмейера, для которой были определены коэффициенты для восстановления показателя преломления в диапазоне 480–1550 нм.

Ключевые слова: Показатель преломления, Коллаген, Дисперсия, Водные растворы коллагена, Сухожилие хвоста крысы

Коллаген является одним из важнейших структурообразующих белков многих биологических тканей, таких как кожа или сухожилия, и его оптические свойства во многом определяют оптические свойства данных тканей. Поскольку показатель преломления играет жизненно важную роль в качестве неинвазивного индикатора некоторых заболеваний, его знание имеет большое значение [1–3]. Кроме того, многие белки, например основной белок крови — гемоглобин, являются биологическим маркером для клинической диагностики различных заболеваний [4–6]. Таким образом, оптические свойства коллагена могут предоставить нам ценную информацию, чрезвычайно полезную для разработки малоинвазивных оптических методов медицинской диагностики и терапии.

Изучение оптических свойств коллагена важно для разработки методов диагностики и лазерного лечения, где учет оптических свойств биологических тканей имеет решающее значение. Различные оптические методы, широко используемые для характеристики тканей, такие как видимая и БИК спектроскопия, оптическая когерентная томография и флуоресцентная спектроскопия, требуют точных данных для показателей преломления ткани и их компонентов для правильной количественной оценки экспериментальных данных [7–11]. Также в настоящее время многими научными группами активно ведется разработка различных биосенсоров, для которых важно точное значение показателя преломления окружающей среды, в частности биотканей с высоким содержанием коллагеновых волокон [12–13].

Показатель преломления растворов коллагена с концентрациями 200, 400, 600 и 1000 г/л был измерен при комнатной температуре (+24 °С). Для измерений лиофилизированный порошок коллагена (Sigma Aldrich, Россия) разводился водой до нужной концентрации.

Для измерения показателя преломления сухожилия хвоста крысы были подготовлены 6 образцов от разных лабораторных животных. При измерениях сухожилия располагали волокнами вдоль наибольшей стороны измерительной призмы.

Измерения выполнялись на многоволновом рефрактометре Аббе DR-M2/1550 (Атаго, Япония) использованием 12 интерференционных фильтров. Показатель преломления измерялся для следующих длин волн: 480 (± 2) нм, 486 (± 2) нм, 546 (± 2) нм, 589 (± 2) нм, 644 (± 2) нм, 656 (± 2) нм, 680 (± 5) нм, 800 (± 6) нм, 930 (± 6) нм, 1100 (± 26) нм, 1300 (± 25) нм и 1550 (± 25) нм. Температура измерений поддерживалась постоянной, равной +24 °С, при помощи циркуляционного термостата DCW-0506 (Scientz, КНР).

Зависимость показателя преломления растворов коллагена от длины волны и концентрации представлена на рисунках 1 и 2 соответственно.

Для аппроксимации дисперсионной зависимости показателя преломления водных растворов коллагена была использована формула Зельмейера.

Для аппроксимации зависимости показателя преломления на длине волны 589 нм от концентрации (С) альбумина была использована формула линейной зависимости:

$$n(C) = 1,3324 + 0,0021C. \quad (2)$$

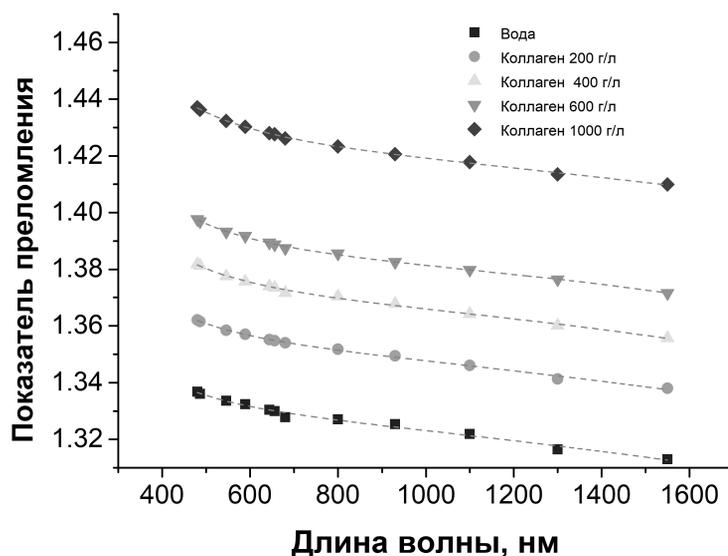


Рис. 1. Дисперсионная зависимость показателя преломления водных растворов коллагена концентрацией 200, 400, 600 и 1000 г/л (символ — экспериментальные данные, пунктирные линии — данные аппроксимации)

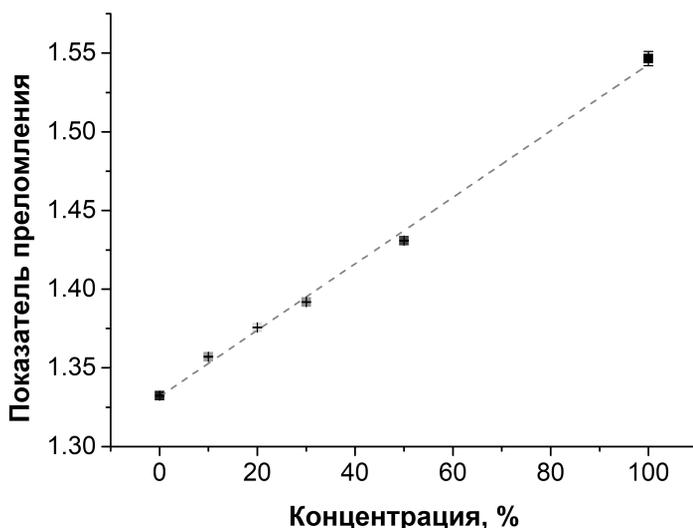


Рис. 2. Зависимость показателя преломления водных растворов коллагена от концентрации на длине волны 589 нм при температуре +24 °С. ($R^2 \geq 0,999$; средняя ошибка измерений $\pm 0,0003$)

По экспериментальным данным был рассчитан показатель преломления чистого (сухого) коллагена по закону Глэдстона-Дейла, согласно которому, если компоненты среды не взаимодействуют химически между собой, то результирующий показатель преломления есть среднее от показателя преломления компонентов с их объемными долями в качестве весовых множителей.

Водные растворы коллагена можно представить, как двухкомпонентную среду, состоящую из молекул коллагена в воде, тогда закон Глэдстона-Дейла можно применить к экспериментальным растворам, записав в виде:

$$n_{\text{Раствора}} = n_{\text{Коллагена}} f_{\text{Коллагена}} + n_{\text{Воды}} f_{\text{Воды}}, \quad (3)$$

где $n_{\text{Раствора}}$ — показатель преломления водного раствора коллагена; $n_{\text{Коллагена}}$ — показатель преломления чистого (сухого) коллагена; $f_{\text{Коллагена}}$ — объемная доля чистого (сухого) коллагена; $n_{\text{Воды}}$ — показатель преломления воды; $f_{\text{Воды}}$ — объемная доля воды.

По результатам вычислений показатель преломления чистого (сухого) коллагена равен $1,5466 \pm 0,0045$. Показатель преломления сухожилия хвоста крысы на длине волны 589 был равен $1,4531 \pm 0,0032$. Полученные в ходе исследования результаты хорошо согласуются с известными литературными данными, а небольшие различия могут объясняться особенностями метода измерения показателя преломления и пробоподготовкой образца.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-14-00287.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Khan, R.** Refractive index of biological tissues: Review, measurement techniques, and applications / R. Khan, B. Gul, S. Khan, H. Nisar, I. Ahmad // Photodiagnosis and Photodynamic Therapy. — 2021. — Vol 33. — P. 102192.
- [2] **Martins, I. S.** Measurement of tissue optical properties in a wide spectral range: a review [Invited] / I. S. Martins, H. F. Silva, E. N. Lazareva, N. V. Chernomyrdin, K. I. Zaytsev, L. M. Oliveira, V. V. Tuchin // Biomedical Optics Express. — 2022. — Vol. 14. — № 1. — P. 249–298. — DOI:10.1364/BOE.479320.
- [3] **Khan, B.** Refractive index of human articular cartilage varies with tissue structure and composition / B. Khan, E. Nippolainen, F. Shahini, J. Tornaiainen, S. Mikkonen, Nonappa, A. Popov, J. Töyräs, I.O. Afara, // Journal of the Optical Society of America A. — 2023. — Vol 40. — № 12. — P. 2205–2214.
- [4] **Leonard, D. W.** Refractive indices of the collagen fibrils and extrafibrillar material of the corneal stroma / D. W. Leonard, K. M. Meek // Biophys J. — 1997. — Vol 72. — № 3. — P. 1382. DOI: 10.1016/S0006-3495(97)78784-8.
- [5] **Lazareva, E.** Optical properties of glycated and non-glycated hemoglobin—Raman/fluorescence spectroscopy and refractometry / E. Lazareva, A. Zyubin, N. Dikht, A. Bucharskaya, I. Samusev, V. Slezhkin, V. Kochubey, V. Tuchin // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. — 2022. — Vol 8. — № 2. — P. 020303–9.
- [6] **Iannucci, L. E.** Optical imaging of dynamic collagen processes in health and disease / L. E. Iannucci, C. S. Dranoff, M. A. David, S. P. Lake // Frontiers in Mechanical Engineering. — 2022. — Vol. 8 — P. 855271.
- [7] **Shvachkina, M. E.** Average refractive index of tendon as a function of water content / M. E. Shvachkina, D. D. Yakovlev, A. B. Pravdin, D. A. Yakovlev // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. — 2018. — Vol 4. — № 1. — P. 010302–7.
- [8] **Bashkatov, A. N.** Estimation of wavelength dependence of refractive index of collagen fibers of scleral tissue / A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. I. Kochubey, V. V. Tuchin // Proc. of SPIE. — 2000. — Vol 4162. — P. 265–268.
- [9] **Zyuryukina, O. A.** Testing the adequacy of a simple theoretical model of dehydration optical clearing of collagen bundles: OCT measurements. / O. A. Zyuryukina, M. E. Shvachkina, V. I. Kochubey, Y. P. Sinichkin, D. A. Yakovlev // Quantum Electronics. — 2022. — Vol 52. — № 1. — P. 48.
- [10] **Bailey, M.** Predicting the refractive index of tissue models using light scattering spectroscopy / M. Bailey, B. Gardner, M. Alunni-Cardinali, S. Caponi, D. Fioretto, N. Stone, F. Palombo // Applied Spectroscopy. — 2021. — Vol 75. — № 5. — P. 574–580.
- [11] **Wu, X.** Light-scattering-induced retardation as a high-sensitivity image contrast revealing collagen fibers / X. Wu, C. Wang, W. Gao, R. Li // Optics Letters. — 2024. — Vol 49. — № 13. — P. 3560–3563.
- [12] **Singh, L.** Development of collagen-IV sensor using optical fiber-based Mach-Zehnder interferometer structure / L. Singh, R. Singh, S. Kumar, B. Zhang, B. K. Kaushik // IEEE Journal of Quantum Electronics. — 2020. — Vol 56. — № 4. — P. 1–8.
- [13] **Noskov R. E.**, Enabling magnetic resonance imaging of hollow-core microstructured optical fibers via nanocomposite coating / R. E. Noskov, A. A. Zanishevskaya, A. A. Shuvalov, Sergei V. German, O. A. Inozemtseva, T. P. Kochergin, E. N. Lazareva, V. V. Tuchin, P. Ginzburg, J. S. Skibina, D. A. Gorin // Opt. Express. — 2019. — Vol 27. — P. 9868–9878.

Refractometric properties of collagen measured at selected wavelengths of the visible and near IR ranges

E. N. Lazareva^{1,2}, V. V. Tuchin^{1,2,3}

¹ Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ Institute of Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

Currently, an urgent task of biophotonics is to replenish the database of refractive indices of biotissues and their components. Since the refractive index is an important optical characteristic, its exact values are required to solve many optical problems. This paper presents data on the refractive indices of aqueous solutions of collagen and rat tail tendon. Based on experimental data, the refractive index of pure (dry) hemoglobin was calculated, which is 1.5466 ± 0.0045 at a wavelength of 589 nm. The refractive index was measured at 12 selected wavelengths of the visible and near IR ranges (480–1550 nm) at room temperature. The obtained dispersion dependences were approximated by the Sellmeier formula, for which the coefficients for restoring the refractive index in the range of 480–1550 nm were determined.

Keywords: Refractive index, Collagen, dispersion, Aqueous solutions of collagen, Rat tail tendon

Разработка мультимодальных подходов на основе МРТ и флуоресцентного имиджинга для мониторинга резорбции имплантируемых композитных сополимерных материалов

В. В. Жердева¹, А. Р. Лихов¹, У. А. Апухтина¹, В. Н. Володина¹, В. В. Тучин^{2,3}

¹Институт биохимии им. А. Н. Баха Российской академии наук, Москва, Россия

²Саратовский государственный университет, Саратов, Россия

³Лаборатория лазерной молекулярной визуализации и машинного обучения, Томский государственный университет, Томск, Россия

В работе предложен комплексный метод оценки деградации in vitro и in vivo полиэфирных сополимеров, меченных индоцианином зеленым и комплексом гадолиний-цитрат, с помощью флуоресцентной визуализации и магнитно-резонансной томографии (МРТ). Эти результаты включают моделирование деградации in vitro с последующей визуализацией имплантированных сополимеров in vivo у мышей. Продемонстрировано, что изменение флуоресцентной и МР-интенсивности in vivo коррелирует с изменением площади имплантированных образцов. Механизм резорбции сополимеров in vivo объясняется не только гидролизом, но и участием клеток иммунной системы. Полученные результаты подтверждают возможность применения данного подхода для наблюдения и контроля за процессами деградации полимерных имплантатов, что важно для разработки новых медицинских и биотехнологических продуктов с контролируемыми свойствами резорбции и безопасной резорбцией в организме.

Ключевые слова: Биоразлагаемые материалы, Полиэфирные сополимерные импланты, Резорбция, Флуоресцентная визуализация, Оптическое просветление, Магнитно-резонансная томография, Гадолиния цитрат, Индоцианин зеленый, Мультимодальная визуализация in vivo

Материалы на основе сополимеров широко используются в медицине и биотехнологии для производства различных медицинских изделий, таких как имплантаты, протезы, системы доставки лекарств, сенсоры. Непредсказуемые эффекты при резорбции полимеров, с одной стороны, и сложные математические модели деградации имплантатов на полимерной основе, с другой, стимулируют разработку методов in vivo для мониторинга деградации (резорбции) полимерных имплантатов [1–3]. Целью исследования является разработка неинвазивных методов мониторинга резорбции имплантируемых сополимерных материалов на основе магнитно-резонансной томографии (МРТ) и флуоресцентного имиджинга, что поможет улучшить контроль за динамикой их распада и оптимизировать применение в медицинских и биотехнологических приложениях.

Образцы сополимеров были получены ранее Деминым Д. Ю. [1, 2] и были подготовлены согласно [1–3]. Оценка деградации сополимеров проводили in vitro по высвобождению флуоресцентной и парамагнитной меток. Цитотоксичность оценивали с использованием МТТ-анализа на клеточных линиях A9 и C2C12. Имплантацию производили мышам линии Balb/c подкожно субдорзально. Оценка резорбции производили на протяжении 60 дней, используя методы флуоресцентного имиджинга и магнитно-резонансной томографии (МРТ) [4, 5]. Полученные изображения анализировали с использованием программы Image Fijji. Анализ гистологических срезов выполняли с использованием световой микроскопии. Статистический анализ результатов проводили с помощью ANOVA и других тестов.

Образцы сополимеров показали высокую биосовместимость и отсутствие токсичности для клеток мышей при физиологическом pH. Деградация сополимеров in vitro была быстрее в буферных растворах по сравнению с сывороткой без ферментов. При этом наблюдалось также сходство с моделью двухфазной деградации in vitro. Флуоресценция ICG и МР-сигнал гадолиния сохранялись до 43 дней in vivo, а профиль интенсивности флуоресценции и МР-интенсивности резорбции сополимеров in vivo коррелировал с изменением площади корональных флуоресцентных проекций и сагиттальных T2w МР-проекций соответственно. Особенности деградации сополимеров in vivo можно объяснить как выявленными in vitro механизмами, такими как набухание и гидролиз, так и вовлечением клеток иммунной системы, участвующих в резорбции in vivo, по результатам гистологического исследования. Использование оптического просветления на основе 70 % просветляющей смеси глицерина [6] приводило к улучшению контраста и флуоресцентных характеристик ICG.

Исследование показало возможность маркировки и визуализации сложноэфирных сополимеров с помощью флуоресцентной визуализации и МРТ, что в перспективе может повысить предсказуемость и эффективность биомедицинских имплантируемых устройств. Результаты исследования показывают, что предложенные методы могут помочь в оценке индивидуальной реакции на имплантаты, такие как скорость деградации, воспаление и развитие фиброза, что важно для разработки медицинских устройств на основе полимерных материалов.

Благодарность

Работа поддержана из средств гранта МОН № №13.2251.21.0009 (Соглашение № 075-15-2021-942).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Лихов, А. Р.** Визуализация имплантов на основе полиэфирных сополимеров методом МРТ / Д. Ю. Демин, В. Н. Володина, В. В. Жердева // Научный аспект. — 2023. — № 4.
- [2] **Likhov, A. R.** Complex Approach to in vitro and in vivo Monitoring of the Degradation of Implants Based on Ester Copolymers Using MR and Fluorescence Imaging / A. Likhov, A. N. Saydasheva, N. I. Kazachkina // Proceedings of Chinese-Russian Workshop Chinese-Russian Workshop on Biophotonics and Biomedical Optics-2023. — 2023. — P. 9–14.
- [3] **Smith, J.** Advances in Biodegradable Polymers for Medical Applications / J. Smith et al. // Journal of Biomedical Materials Research. — 2022.
- [4] **Brown, R.** MRI Techniques in Biomedical Research / R. Brown et al. Imaging Science. — 2021.
- [5] **Thompson, K.** Fluorescent Imaging in Medical Diagnostics / K. Thompson et al // Medical Imaging Journal. — 2023.
- [6] **Bogdanov, A. A.** Magnetic resonance imaging study of diamagnetic and paramagnetic agents for optical clearing of tumor-specific fluorescent signal in vivo / A. Bogdanov et al. // Chapter 15 In: Tissue optical clearing: new prospects in optical imaging / V. Tuchin et al. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2022.

Development of multimodal approaches based on MRI and fluorescent imaging for monitoring the resorption of implanted composite copolymer materials

V. V. Zherdeva¹, A. R. Likhov¹, U.A Apukhtina¹, V. N. Volodina¹, V. V. Tuchin^{2,3}

¹ *Bach Institute of Biochemistry, Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Saratov State University, Saratov, Russia*

³ *Laboratory of Laser Molecular Imaging and Machine Learning, Tomsk State University, Tomsk, Russia*

This work proposes a comprehensive method for assessing the in vitro and in vivo degradation of polyester copolymers labeled with indocyanine green and gadolinium citrate complex using fluorescence imaging and magnetic resonance imaging (MRI). These results include in vitro degradation modeling followed by in vivo imaging of implanted copolymers in mice. We demonstrate that changes in fluorescence and MR intensities in vivo correlate with changes in the area of implanted samples. The mechanism of resorption of copolymers in vivo is explained not only by hydrolysis, but also by the participation of immune cells. Our results confirm the possibility of using this approach to monitor and control the degradation processes of polymer implants, which is important for the development of new medical and biotechnological products with controlled resorption properties and safe resorption in the body.

Keywords: *Biodegradable materials, Polyester copolymer implants, Resorption, Fluorescence imaging, Optical clearing, Magnetic resonance imaging, Gadolinium citrate, Indocyanine green, Multimodal in vivo imaging*

Высококочувствительная сенсорная платформа на основе комбинации ФИС с микрофлюидными каналами для анализа комплексного показателя преломления двухкомпонентных жидкостей

И. Н. Флоря¹, А. Ю. Кузин^{1,2}, В. С. Чернышев³, В. В. Ковалюк^{1,4}, А. Д. Голиков⁵, С. Н. Васильев^{1,2}, Д. А. Горин², Г. Н. Гольцман^{4,6}

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

² Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии им. академика В. И. Кулакова, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁵ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁶ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Оптические сенсоры на основе фотонных интегральных схем, интегрированные с микрофлюидными каналами (МФИС), стали предметом интенсивных исследований для приложений биофотоники и медицины. В представленной работе проведено экспериментальное и численное исследование чувствительности и предела детектирования МФИС для различной ширины микрофлюидных каналов. В качестве аналита в работе использовался изопропанол в деионизированной воде. Наши результаты показывают, что действительная и мнимая части показателя преломления для двухкомпонентных жидкостей могут быть легко получены из спектральных характеристик ФИС, а оптимизация ширины микрофлюидных каналов позволяет увеличить чувствительность сенсора. Эта работа открывает широкие возможности для определения присутствия и концентрации исследуемых аналитов в биологических жидкостях малоинвазивным методом с помощью разрабатываемых сенсоров для клинических исследований.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, Микрофлюидные каналы, Комплексный показатель преломления

Введение

В современной медицине большое влияние на лечение заболеваний оказывают ранняя диагностика и мониторинг. В связи с этим растет спрос на методы, использующие более точные, быстрые и доступные устройства [1]. Разработка биосенсорных систем направлена на повышение специфичности, чувствительности (S), добротности (Q) и предела обнаружения (LOD) сенсора [2]. Сенсоры на основе нитрида кремния (Si_3N_4) являются одной из наиболее перспективных технологий благодаря низкому LOD и способности создавать компактные, надежные, высокопроизводительные и недорогие фотонные интегральные схемы (ФИС) [3]. Уже сегодня микрокольцевые резонаторы (МКР) широко используются в качестве сенсоров для анализа жидкостей [4, 5]. Селективность этих сенсоров по отношению к биомаркерам достигается путем правильной функционализации поверхности [4, 6]. Комбинация МКР с микрофлюидными каналами (МФК) позволяет уменьшить объем вещества для анализа до единиц микролитра. Например, в недавней работе [5] был показан LOD $4,46 \times 10^{-6}$ RIU изопропанола (ИПС) в деионизированной воде. В другой работе с той же конструкцией и топологией сенсора было продемонстрировано полностью оптическое бесконтактное определение характеристик нанопокрyтия в реальном времени и высокая чувствительность к одному монoслою BSA, нанесенному на поверхность датчика [7].

Несмотря на все преимущества этой платформы, зависимость S и LOD от ширины МФК не изучена. Кроме того, все характеристики были получены только для фиксированной центральной длины волны и не учитывали дисперсию аналита. Настоящее исследование посвящено исследованию зависимости характеристик изготовленного МФИС от ширины МФК, а также возможности извлечения комплексного исследования показателя преломления для двухкомпонентных жидкостей.

1. Дизайн ФИС и аналит

Фотонный чип выполнен на коммерческой платформе Si с толщиной подслоя SiO_2 2,6 мкм и верхнего слоя Si_3N_4 толщиной 450 нм и состоял из массива МКР с различной шириной зазора (w_g) между подводящим и кольцевым волноводами ($w_g = 0,5, 0,625, 0,8$ и 1 мкм) и радиусом кольца $R=150$ мкм. Ширина подводящего и кольцевого волноводов составляла 1,15 и 1,8 мкм, соответственно. Для ввода/вывода оптического излучения в ФИС использовались фокусирующие решетки (FGC), оптимизированные на длину волны 1550 нм. МФК были выполнены из ПДМС (полидиметилсилоксан) и имели ширину 113, 232 и 400 мкм.

Для исследования LOD были приготовлены 17 растворов ИПС в деионизированной воде с различной концентрацией. Эти компоненты раствора были выбраны из-за их однородного смешивания и очищающих свойств ИПС для микрофлюидики [8].

2. Экспериментальная установка

МФИС собран на металлическом держателе и располагался на 3D-механическом столике с пьезодвигателями для точного геометрического выравнивания FGC и массива одномодовых волокон, а также возможности управления температурой. Все измерения проводились при температуре 25°C. Исследуемый анализ прокачивался перистальтическим насосом через МФК со скоростью 20 мкл/мин. Во избежание образования пузырьков воздуха из-за изменения температуры и давления к выходу перистальтического насоса подключался пузырькоулавливающий фильтр. Излучение перестраиваемого лазера через контроллер поляризации подавалось на FGC фотонного чипа и на выходе из ФИС измерялось быстрым фотодетектором. При каждом измерении проводилась развертка длин волн в диапазоне от 1480 до 1620 нм с последующей записью спектров пропускания.

3. Методы и результаты

На первом этапе работы было проведено численное моделирование влияния различной ширины МФК на чувствительность ФИС в пакете COMSOL Multiphysics. Был выполнен двумерный анализ поперечного сечения кольцевого волновода с известными показателями преломления всех слоев. На втором этапе работы измерялись спектры пропускания МФИС при разных концентрациях ИПС для всех конфигураций МФК. Полученные зависимости сдвига резонансной длины волны, коррелирующие с изменениями показателя преломления жидкости, сравнивались с данными моделирования, как показано на рис. 1. Тренд экспериментальных кривых и численно рассчитанных хорошо соответствует, особенно вблизи меньших концентраций. Отметим, что для ширины канала более $1,5R$ при концентрациях более 30 % резонансы в спектре пропускания смещаются более чем на 1 нм, превышая свободный спектральный диапазон (FSR).

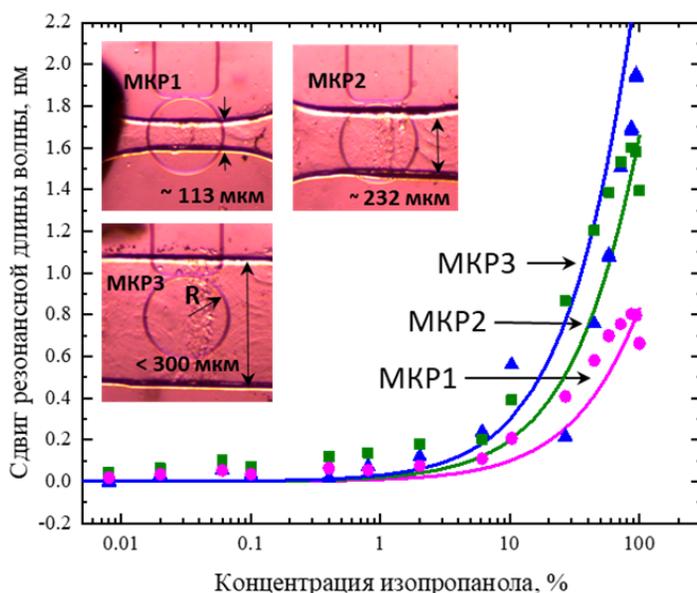


Рис. 1. Зависимости сдвига резонансной длины волны от концентрации и геометрии каналов: символы — экспериментальные данные, линии — моделирование (на вставках фотографии МКР интегрированные с микрофлюидными каналами разной геометрии)

Из спектров были найдены основные параметры МКР, включая резонансную длину волны (λ_0), свободный спектральный диапазон (FSR), ширину резонансного пика на полувысоте (FWHM). На основе найденных параметров нами были получены спектральная зависимость нагруженной добротности (Q_{loaded}) и константы затухания (α) в диапазоне длин волн 1480–1620 нм, чувствительность и LOD сенсора (рис. 2). С увеличением ширины МФК с 113 до 400 нм увеличивается чувствительность сенсора с 0,8 до $3,1 \cdot 10^{-2}$ нм/‰, при этом LOD уменьшается с 13,4 до $3,5 \cdot 10^{-2}$ ‰.

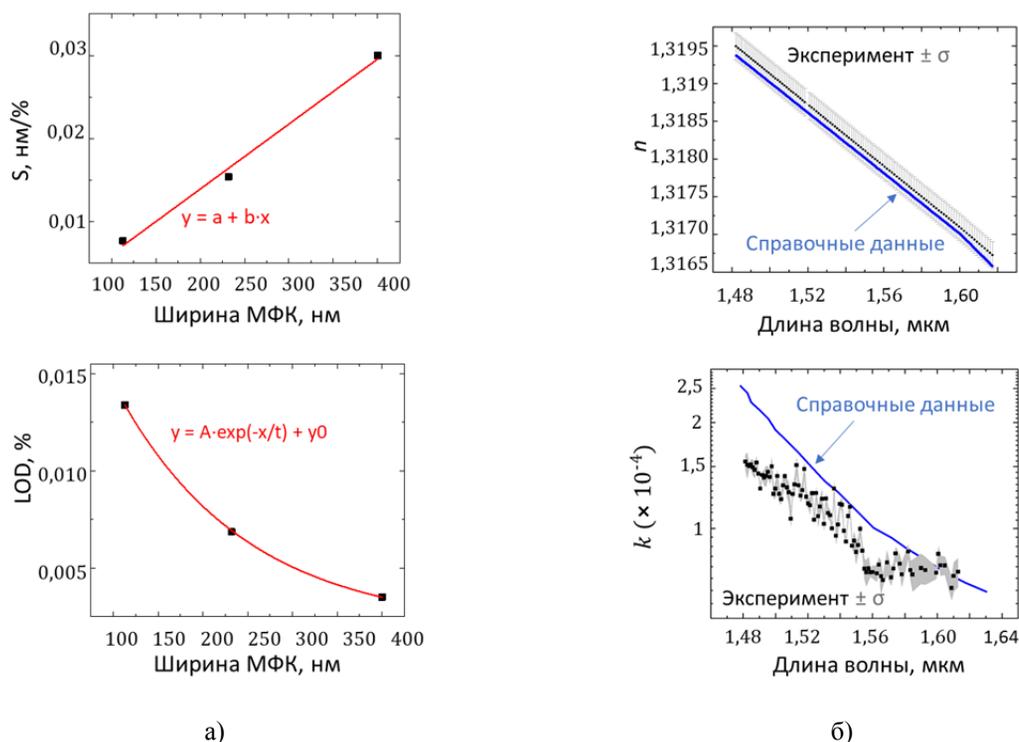


Рис. 2. Экспериментальные данные:

а) зависимость S и LOD от ширины микрофлюидного канала; б) зависимость действительной и мнимой части показателя преломления деионизированной воды в сравнении со справочными данными

Заключение

В работе изучена зависимость S и LOD от ширины МФК и изменении концентрации ИПС в деионизированной воде. Начиная с ширины канала 200 мкм, резонансный сдвиг МКР смещается на величину, превышающую FSR. Получено, что с увеличением ширины МФК увеличивается чувствительность сенсора и уменьшается LOD. Кроме того, из экспериментальных данных получена зависимость действительной и мнимой части показателя преломления.

Благодарность

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-79-00056 (экспериментальное исследование МФИС), грантом Министерства науки и высшего образования РФ (FSME-2022-0008) (численный расчет и изготовление МФИС).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Nayak S.** Point-of-care diagnostics: recent developments in a connected age / S. Nayak, N. R. Blumenfeld, T. Laksanasopin, and S. K. Sia // *Analytical chemistry*. – 2017. – Vol 89. – №. 1. – С. 102-123.
- [2] **Wang J.** Trends in Nanophotonics-Enabled Optofluidic Biosensors / J. Wang, S. A. Maier, A. Tittl // *Advanced Optical Materials*. – 2022. – Vol 10. – №. 7. – С. 2102366.
- [3] **Blumenthal D. J.** Silicon nitride in silicon photonics / D. J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, C. Roeloffzen // *Proceedings of the IEEE*. – 2018. – Vol 106. – №. 12. – С. 2209-2231.
- [4] **Kindt J. T.** Biomolecular analysis with microring resonators: applications in multiplexed diagnostics and interaction screening / J. T. Kindt, R. C. Bailey // *Current opinion in chemical biology*. – 2013. – Vol 17. – №. 5. – С. 818-826.
- [5] **Kuzin A.** Hybrid nanophotonic-microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses / A. Kuzin, V. Chernyshev, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, R. Ozhegov, D. Gorin, N. Gippius, G. Goltsman // *Optics Letters*. – 2022. – Vol 47. – №. 9. – С. 2358-2361.
- [6] **Arnfinnsdottir N. B.** Impact of silanization parameters and antibody immobilization strategy on binding capacity of photonic ring resonators / N. B. Arnfinnsdottir, C. A. Chapman, R. C. Bailey, A. Aksnes, B. T. Stokke // *Sensors*. – 2020. – Vol 20. – №. 11. – С. 3163.
- [7] **Kuzin A.** In situ monitoring of layer-by-layer assembly surface modification of nanophotonic-microfluidic sensor / A. Kuzin, V. Chernyshev, V. Kovalyuk, P. An, A. Golikov, G. Goltsman, D. Gorin // *Analytical Chemistry*. – 2022. – Vol 94. – №. 42. – С. 14517-14521.
- [8] Refractive index database / URL: <https://refractiveindex.info>

Highly sensitive sensor platform based on a combination of PIC with microfluidic channels for complex refractive index analysis of two-component liquids

I. N. Florya¹, A. Y. Kuzin^{1,2}, V. S. Chernyshev³, V. V. Kovalyuk^{1,4}, A. D. Golikov⁵, S. N. Vasilev^{1,2}, D. A. Gorin², G. N. Goltsman^{4,6}

¹ University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

² Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

³ National Medical Research Center for Obstetrics, Gynecology and Perinatology named after Academician V.I. Kulakov, Moscow, Russia

⁴ National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

⁵ Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia

⁶ Russian Quantum Center, Moscow, Russia

Photonic integrated circuit-based optical sensors integrated with microfluidic channels (MPICs) have become the subject of intensive research for biophotonics and medical applications. In the presented work, an experimental and numerical study of the sensitivity and detection limit of MPIC for various widths of microfluidic channels was carried out. The analyte used in this work was isopropanol in de-ionized water. Our results show that the real and imaginary parts of the refractive index for two-component liquids can be easily obtained from the spectral characteristics of the PIC, and optimization of the width of the microfluidic channels can increase the sensitivity of the sensor. This work opens up broad opportunities for determining the presence and concentration of the studied analytes in biological fluids using a minimally invasive method using sensors developed for clinical research.

Keywords: Photonic integrated circuits, Microfluidic channels, Complex refractive index

Изучение биоинтеграции углеродных имплантируемых материалов с различными покрытиями с использованием магнитно-резонансной томографии

П. Е. Зайцев¹, А. С. Скрыбин², А. В. Шакуров², В. В. Жердева¹

¹Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Россия

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Исследование направлено на изучение биоинтеграции имплантируемых материалов и их биосовместимости с окружающими имплантаты тканями с использованием методов МРТ. Объектом исследования являлись образцы биопсии, содержащие углеродные скаффолды без покрытия и с покрытием на основе синтетического гидроксиапатита на сроке 12 недель после подкожной имплантации их мышам линии BDF1.

В результате исследования были предложены критерии оценки процессов биоинтеграции и резорбции углеродных скаффолдов *ex vivo* с использованием режима T1w и с использованием импульсов жироподавления 100 мс TI-T1w. Использование МР-критериев для оценки плотности и однородности окружающей имплантат фиброзной капсулы может помочь в дальнейшем в разработке инструментальных неинвазивных методов оценки биосовместимости имплантируемых материалов.

Ключевые слова: Углерод–углеродные медицинские композиты, Гидроксиапатитовые покрытия, Магнитно-резонансная томография

1. Методы

На данный момент разрабатывают скаффолды на основе углерода [1, 3]. Целью нашего исследования является разработка неинвазивных методов на основе магнитно-резонансной томографии (МРТ) изучения биоинтеграции углеродных скаффолдов (имплантатов) и отслеживания тканевых реакций на имплантаты. Объектом исследования являлись биоптаты рецезированного на 12-ой недели после имплантации мышам линии BDF1 углерод-углеродных скаффолдов без покрытия и с покрытием на основе синтетического гидроксиапатита. МР-исследования биоптатов проводили на 1 Т МРТ-системе. Полученные изображения анализировали путем отбора минимум 3- 4 центральных томографических среза толщиной 1 мм (рис. 1).

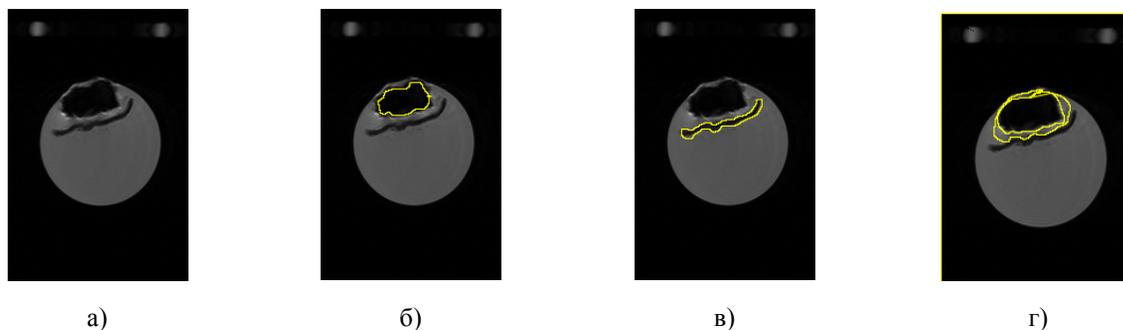


Рис. 1. Выделение участков для обсчета значений МР-интенсивности на примере T2w изображения: а) исходный скан; б) скаффолд; в) кожа; г) соединительно-тканная капсула

2. Результаты

Образцы *ex vivo* были отсканированы в двух режимах — T1w и T2w. На изображениях T1 w скаффолды выглядят резко гипоинтенсивными (черными), в то время как пространство между кожей и скаффолдом — соединительно-тканная капсула определяется как умеренно гипоинтенсивная. Кожа определяется как резко гиперинтенсивная (белая) (рис. 2а). Импульс инверсии в режиме с жироподавлением приводит к подавлению сигнала от подкожной жировой клетчатки и на скане определяется фиброзная капсула в различной степени умеренно гиперинтенсивная (рис. 2б).

Из рисунка 2б видно, что значение нормированной МР-интенсивности сигнала фиброзной капсулы в режиме жироподавления варьирует в пределах одного изображения. Сравнение расчетных средних значений интенсивности сигнала в режиме T1w и в T1 w в режиме жироподавления (TI-T1w) для двух образцов — скаффолд без покрытия (рис. 2в) и с покрытием на основе электрофореза и деионизации (рис. 2г) демонстрирует увеличение сигнала TI-T1w от капсулы для образцов без покрытия в 1,3 раза.

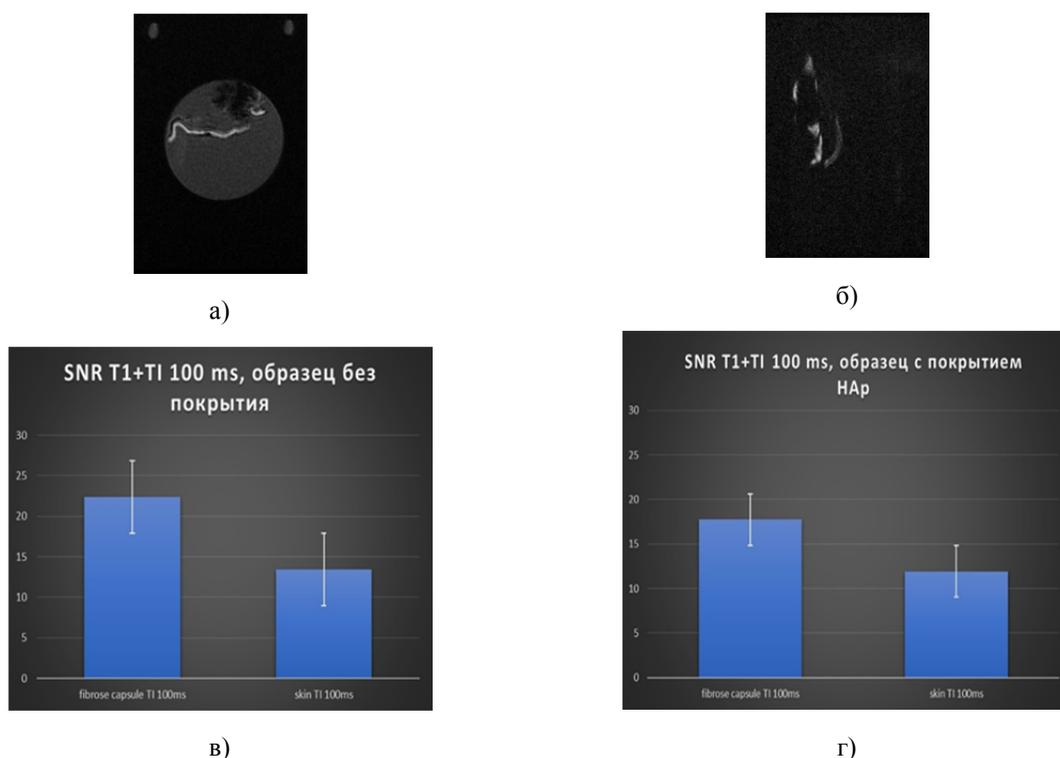


Рис. 2. T1w режим получения МР-изображений скаффолдов ex vivo:

а) центральный МР-срез; б) центральный МР-срез в режиме жироподавления; в) диаграмма соотношения сигнал /шум (SNR) для кожи, соединительно-тканной капсулы для скаффолда без покрытия; г) диаграмма соотношения сигнал/шум (SNR) для кожи, соединительно-тканной капсулы для скаффолда с покрытием (HAр)

Заключение

Данный критерий может быть взят за основу оценки плотности и однородности соединительно-тканной капсулы [4, 5]. В ряде работ указано, что более рыхлая структура фиброзной капсулы указывает на лучшую биосовместимость имплантируемых материалов [5], что может помочь в дальнейшем в разработке инструментальных неинвазивных методов оценки биосовместимости имплантируемых материалов.

Благодарность

Работа Шакурова А. В. и Скрябина А. С. выполнена за счет гранта РФФ № 20-79-10190. Авторы благодарят сотрудников МНИОИ им. П. А. Герцена Свиридову И. К. и Сергееву Н. С. за предоставление образцов биоптата.

Список источников

- [1] **Drevet, R.** Bioactive Calcium Phosphate Coatings for Bone Implant Applications: A Review / R. Drevet, J. Fauré, H. Benhayoune // *Coatings*. — 2023. — Vol 13. — P. 1091.
- [2] **Teixeira-Santos, R.** Graphene-Based Composites for Biomedical Applications: Surface Modification for Enhanced Antimicrobial Activity and Biocompatibility / R. Teixeira-Santos, S. Belo, R. Vieira, F. J. M. Mergulhão, L. C. Gomes // *Biomolecules*. — 2023. — Vol 13. — P. 1571.
- [3] **Amini, A. R.** Bone tissue engineering: recent advances and challenges / A. R. Amini, C. T. Laurencin, S. P. Nukavarapu // *Crit Rev Biomed Eng*. — 2012. — Vol 40(5). P. 63–408.
- [4] **Skriabin, A. S.** Electrophoretic Deposition of Calcium Phosphates on Carbon–Carbon Composite Implants: Morphology, Phase/Chemical Composition and Biological Reactions / A. S. Skriabin, P. A. Tsygankov, V. R. Vesnin, A. V. Shakurov, E. S. Skriabina, I. K. Sviridova, N. S. Sergeeva, V. A. Kirsanova, S. A. Akhmedova, V. V. Zherdeva // *Int. J. Mol. Sci.* — 2024. — Vol 25. P. 3375.
- [5] **Nuss, K. M.** Biocompatibility issues with modern implants in bone — A review for clinical orthopedics / K. M. Nuss // *Open J. Orthop.* — 2008. — Vol 2. — P. 66–78.

Study of the biointegration of carbon implantable materials with various coatings using magnetic resonance imaging

Zaitsev P. E.¹, Skryabin A. S.², Shakurov A. V.², Zherdeva V. V.¹

¹*Institute of Biochemistry named after. A.N. Bach, Federal Research Center "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Department of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

The study is aimed at studying the biointegration of implanted materials and their biocompatibility with the tissues surrounding the implants using MRI techniques. The object of the study was biopsy samples containing carbon scaffolds without coating and with a coating based on synthetic hydroxyapatite at a period of 12 weeks after subcutaneous implantation into BDF1 mice. As a result of the study, criteria were proposed for assessing the processes of biointegration and resorption of carbon scaffolds ex vivo using the T1w mode and using 100 ms TI-T1w fat suppression pulses. The use of MRI criteria to assess the density and homogeneity of the fibrous capsule surrounding the implant can help in the future in the development of instrumental non-invasive methods for assessing the biocompatibility of implanted materials.

Keywords: *Carbon-carbon medical composites, Hydroxyapatite coatings, Magnetic resonance imaging*

Изучение биологического и терапевтического эффекта виндебурнола на мышинных моделях рассеянного склероза

В. Н. Володина, П. Е. Зайцев, В. А. Струкова, Л. С. Борец, В. А. Макаров, В. В. Жердева

Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Россия

Целью данного исследования был выбор оптимальной мышинной модели для изучения рассеянного склероза, изучение развития МРТ-признаков энцефаломиелимита на купризоновой модели и результатов отклика на лекарственную терапию виндебурнолом. В качестве инструментальных методов использовалось МРТ-сканирование с контрастом под газовой анестезией. В ходе исследования были созданы алгоритмы МРТ-сканирования для детекции поражений при энцефаломиелите у мышей, а также доказана эффективность виндебурнола при хроническом течении заболевания.

Ключевые слова: МРТ, Купризоновая модель, Рассеянный склероз, Виндебурнол

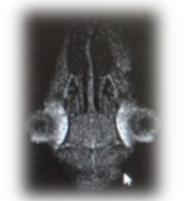
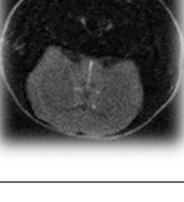
Цель исследования — выбор оптимальной для исследования рассеянного склероза мышинной модели, изучение развития МРТ-признаков энцефаломиелимита на купризоновой модели и результатов отклика на лекарственную терапию виндебурнолом.

Мыши линии C57/BL6 в течение 90 дней получали 400 мг купризона с кормом, затем проводили МРТ-сканирование. В это время животные оценивались по клиническим признакам, поведенческим и инструментальными методами (МРТ). Сканирование проводилось раз в 3 дня под газовой анестезией, анестетиком являлся изофлюран, минимальная объемная концентрация составляла 1,5–2 %. Далее результаты обрабатывались в программе ImageJ Fiji.

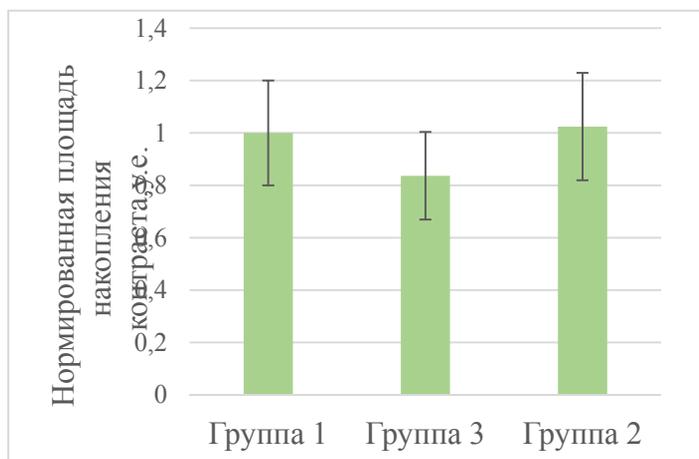
С 60-го дня наблюдались признаки нарушения поведения животных. Также с помощью МРТ фиксировали накопление контраста в ликворе при нарушении гематоэнцефалического барьера (ГЭБ), размытые границы желудочков мозга, т. е. «млечный путь», по сравнению с контролем (табл.). С 90-го дня мыши были разделены на 3 группы: 1 группа перестала получать купризон (естественное восстановление); 2 группа продолжала получать купризон и стала получать виндебурнол; 3 группа перестала получать купризон и стала получать виндебурнол. Препарат вводился внутрибрюшинно, раз в 3 дня, в количестве 20 мг/кг [4].

К 60-го дню применения виндебурнола мыши из группы 3 полностью восстановились, но на МРТ все еще наблюдались патологические изменения. Мыши группы 2 по клиническим признакам не уступали мышам группы 3, но на МРТ сохранилось больше патологических очагов. Площадь накопления контраста в группах 2 и 3 нормирована на группу 1 (см. рисунок).

Таблица 1. МРТ-признаки нарушения ГЭБ

Вид изображения	Название	Описание
	МРТ снимок в режиме T2w, корональный срез	Накопление контраста в системе ликвора при нарушении ГЭБ в виде креста
	МРТ снимок в режиме T2, аксиальный срез, наличие «млечного пути»	Размытая картина желудочков мозга на аксиальном срезе
	МРТ снимок в режиме T2, аксиальный срез, отсутствие «млечного пути»	Контроль, отсутствие накопления контраста и «млечного пути»

Как видно из рисунка, площадь поражения накопления контраста в группе 3 после лечения виндебурнолом снизилась в 1,22 раза по сравнению с группой 1, что подтверждает эффективность действия виндебурнола при хроническом течении энцефаломиелита в купризоновой модели. В группе 2 введение виндебурнола усугубляло патологическую симптоматику острого периода заболевания. Данный подход может быть использован в дальнейшем для тестирования различных производных виндебурнола и других перспективных фармакологических субстанций.



Площадь накопления контраста по трем экспериментальным группам

Была получена купризоновая модель рассеянного склероза на мышах линии C57/B16. Предложены МР-критерии оценки степени поражения головного мозга у мышей C57/B16 и алгоритм их обсчета. Действие виндебурнола проявляется в виде снижения площади накопления контраста в головном мозге животных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Marín-Prida, J.** Anti-inflammatory mechanisms and pharmacological actions of phycocyanobilin in a mouse model of experimental autoimmune encephalomyelitis: A therapeutic promise for multiple sclerosis / J. Marín-Prida, et al. // *Frontiers in Immunology*. — 2022. — Vol 13. — P. 1036200.
- [2] **Polak, P. E.** The vincamine derivative vindeburnol provides benefit in a mouse model of multiple sclerosis: effects on the Locus coeruleus / P. E. Polak, et al. // *Journal of neurochemistry*. — 2012. — Vol 121. — № 2. — С. 206–216.
- [3] **Praet, J.** Cellular and molecular neuropathology of the cuprizone mouse model: clinical relevance for multiple sclerosis / J. Praet, et al. // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. — 2014. — Vol 47. — С. 485–505.
- [4] **Zubkov, E.** et al. Antidepressant-like Effect of the Eburnamine-Type Molecule Vindeburnol in Rat and Mouse Models of Ultrasound-Induced Depression / E. Zubkov // *ACS Chemical Neuroscience*. — 2024. — Vol 15. — № 3. — С. 560–571.

Study of the biological and therapeutic effect of vindeburnol on mouse models of multiple sclerosis

V.N. Volodina, P.E. Zaitsev, V.A. Strukova, L.S. Borets, V.A. Makarov, V.V. Zherdeva

Bach Institute of Biochemistry, Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The purpose of this study was to select the optimal mouse model for studying multiple sclerosis, to study the development of MRI signs of encephalomyelitis in the cuprizone model and the results of the response to drug therapy with vindeburnol. MRI scanning with contrast under gas anesthesia was used as instrumental methods. During the study, MRI scanning algorithms were created to detect lesions in encephalomyelitis in mice, and the effectiveness of vindeburnol in the chronic course of the disease was proven.

Keywords: MRI, Cuprizone model, Multiple sclerosis, Vindeburnol

Метод прижизненной визуализации локусов генома флуоресцентными сенсорами на основе семейства эндонуклеаз dCas9

Г. А. Абушинова^{1,2}, В. В. Жердева¹, Л. Г. Малошенко^{1,2}

¹ Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук», Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей генетики им. Н. И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Россия

В настоящее время системы визуализации in vivo широко используются в диагностике различных заболеваний, разрабатываются новые молекулярные флуоресцентные метки, стратегии транспорта их в клетку. Каталитически неактивные мутанты Cas9 (dCas9) могут быть задействованы в специфическом связывании с ДНК и без ее расщепления, в том числе для образования гибридных белков с флуоресцентными молекулами для визуализации одного или нескольких специфических локусов генома. Основной проблемой данного направления является локализация всех инженерных компонентов систем CRISPR-Cas9, необходимая для эффективного многофункционального воздействия на геном клеток. В данной работе были созданы конструкции на основе ортологов dCas9 с различными по физико-химическим свойствам флуоресцентными белками (FP). Показана динамика экспрессии dCas9-FP и накопление интенсивности флуоресцентного сигнала в опухолевых клетках и на опухолевых моделях. Показано специфическое мечение последовательности ДНК комплексами sgRNA/dCas9-FP на уровне клетки.

Ключевые слова: Ортологи dCas9, Имиджинг, Флуоресцентные белки, Прижизненная визуализация, sgRNA

В данной работе был использован способ регулируемой экспрессии dCas9-FP [1], что позволило нивелировать такие эффекты, как цито- и фототоксичность, которые при постоянной экспрессии конструкции, внесенной в геном, могут вызывать стресс эндоплазматического ретикулума в эукариотических клетках, ограничивая тем самым, возможности проведения долгосрочных экспериментов на живых клетках и тканях вследствие токсичности. При конститутивной экспрессии накопление флуоресцентно-меченных нуклеаз dCas9 в цитоплазме затрудняет визуализацию мечения геномных локусов из-за высокого уровня фоновой флуоресценции.

С целью поиска флуоресцентных молекул dCas9 с преимущественной локализацией флуоресцентного сигнала в ядре нами были проведены работы по получению набора генно-инженерных конструкций, несущих различные сочетания ортологов dCas9 (из *St. pyogenes*, *N. meningitidis*, *S. thermophilus*) с флуоресцентными белками (mRuby3, mScarlet, mClover3, mNeonGreen, mCherry, EGFP), выбор которых был основан с учетом их биофизических характеристик и спектральных свойств в качестве компонентов пары акцептор/донор для FRET.

Исследование стабильных линий клеток MNNG/HOS, полученных в результате трансдукции соответствующими лентивирусными векторами и последующего отбора клонов, показало, что исследуемые флуоресцентно-меченные dCas9 различаются способностью к образованию химерных флуоресцентных продуктов, транспорту в ядро и накоплению в органеллах клеток. Показана динамика экспрессии dCas9-FP и накопление интенсивности флуоресцентного сигнала в опухолевых клетках и на опухолевых моделях.

Исследование динамики накопления флуоресцентного сигнала в опухолевых клетках MNNG/HOS показало, что появление флуоресцирующего продукта в клетках наблюдалось через сутки после добавления доксицилина. В случае двойных клеточных линий, экспрессирующих конструкции с EGFP/mCherry, NeonGreen/mCherry и mClover3/mCherry наблюдалось практически одновременное появление флуоресцентных сигналов донора-FP и акцептора-FP через сутки после добавления доксицилина, максимальное значение флуоресцентных сигналов на третьи сутки после добавления доксицилина, и в дальнейшем практически не снижался до удаления доксицилина из раствора, в то время, как в случае двойных клеточных линий, экспрессирующих конструкции с сочетанием используемых флуоресцентных белков с красным mRuby3, накопление красного сигнала наблюдается только на вторые сутки после добавления доксицилина, а пик красного и зеленого сигналов также на третьи сутки после добавления доксицилина. Высокая эффективность внутриядерного транспорта флуоресцентных сенсоров наблюдается при индуцибельной экспрессии пар SpdCas9-mCherry/ NmdCas9-EGFP или St1dCas9-mCherry/ NmdCas9-EGFP, NmdCas9-mClover3/StdCas9-mRuby3. NmdCas9mNeonGreen/StdCas9mCherry или NmdCas9mNeonGreen/ SpdCas9mCherry. В случае пар флуоресцентных белков EGFP/mCherry, разница между временем созревания донора-FP и акцептора-FP не существенна, что позволяет в течение суток после добавления индуктора выявить одновременно два флуоресцентных продукта. Полученные стабильные клеточные линии, экспрессиру-

ющие пары химер SpdCas9-mCherry/ NmdCas9-EGFP, StdCas9-mCherry/ NmdCas9-EGFP, NmdCas9-mClover3/ StdCas9-mRuby3. NmdCas9mNeonGreen/StdCas9mCherry, NmdCas9mNeonGreen/SpdCas9mCherry показывали высокую эффективность при мечении теломер.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-14-00205).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Maloshenok, L.** Tet-regulated expression and in vivo visualization of genetically encoded chimeric dCas9-FP/ L. Maloshenok, G. Abushinova, A. Bogdanov, V. Zherdeva // *Materials*. — 2023. — Vol 16. — P. 940.

Method of intravital imaging with fluorescent sensors based on the dCas9 family of endonucleases

Gerel Abushinova ^{1,2}, Victoria Zherdeva ², Liliya Maloshenok ^{1,2}

¹ Vavilov Institute of General Genetics of the Russian Academy of Sciences, 117971 Moscow, Russia

² Bach Institute of Biochemistry, Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, 33, Moscow, Russia

Currently, in vivo imaging systems are widely used in the diagnosis of various diseases; new molecular fluorescent labels and strategies for their transport into the cell are being developed. Catalytically inactive Cas9 (dCas9) mutants can be used to specifically bind to DNA without cleaving it, including the formation of fusion proteins with fluorescent molecules for visualization of one or more specific genomic loci. The main problem in this area is the localization of all engineering components of the CRISPR-Cas9 system, which is necessary for an effective multifunctional effect on the cell genome. In this work, constructs were engineered based on dCas9 orthologues with fluorescent proteins (FPs) differed in their physicochemical properties. The dynamics of dCas9-FP expression and the accumulation of fluorescent signal intensity in tumor cells and tumor models are shown. Specific DNA sequence labeling by sgRNA/dCas9-FP complexes at the cellular level has been demonstrated.

Keywords: dCas9 orthologs, Fluorescence imaging, Fluorescent proteins, Intravital imaging, sgRNA

Секция 12

***Новые прикладные
оптические технологии***

Исследование погрешности оптико-электронной системы контроля величины хорды рабочих лопаток паровых турбин на закрытом цилиндре при валоповороте

В. В. Кортаев, Л. С. Родикова, А. Н. Тимофеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Входные кромки рабочих лопаток цилиндров низкого давления паровых турбин подвергаются сильному эрозионному износу, что ведет к сокращению ресурса их работы, необходимости периодического осмотра и замены поврежденных лопаток с целью предотвращения аварий. Перспективными средствами контроля являются оптико-электронные системы, которые позволяют бесконтактно в режиме валоповорота ротора на закрытом цилиндре контролировать степень износа лопатки паровой турбины по величине ее хорды. Специфика размещения и условий применения элементов оптико-электронной системы в ограниченном пространстве цилиндра турбины обуславливает возникновение различных составляющих суммарной погрешности контроля. На основе полученных функций преобразования информативных сигналов, создана компьютерная модель и показано, что в основную погрешность наибольший вклад по степени убывания вносят следующие составляющие: погрешность фокусного расстояния объектива видеокамеры, изменение углов наклона хорды, температурная деформация корпуса зонда, погрешность от задания радиуса сечения рабочей лопатки, погрешность расстояния от объектива видеокамеры до оси рабочей лопатки, нестабильность вращения ротора, шумовая погрешность матричного приемника. Экспериментальные исследования макета системы показали, что с учетом юстировки и калибровки величину погрешности контроля хорды рабочей лопатки можно уменьшить до 0,21 мм.

Ключевые слова: Паровая турбина, Хорда рабочей лопатки, Контроль эрозийного износа, Составляющие погрешности, Суммарная погрешность, Матричный приемник оптического излучения

Введение

Для оценки погрешности оптико-электронной системы контроля величины хорды (ОЭСКВХ) рабочих лопаток (РЛ) паровых турбин на закрытом цилиндре при валоповороте проведен многосторонний анализ процесса регистрации, преобразования и передачи измерительной информации. Состав рассматриваемой ОЭСКВХ лишь частично совпадает с ранее рассмотренным в системах бесконтактного измерения линейных перемещений [1–3] в силу того, что циклические перемещения РЛ при контроле их с помощью ОЭСКВХ рассматривался достаточно ограниченно [4, 5].

Работа ОЭСКВХ в режиме валоповорота ротора турбины заключается в том, что по сигналам синхродатчика импульсные источники излучения подсвечивают кромки РЛ, а изображение РЛ захватывается матричным приемником оптического излучения (МПОИ) видеокамеры зонда, которое затем обрабатывается компьютером с целью получения величины размера хорды РЛ, по которой и принимается решение о величине износа [5, 6].

Существующие системы позволяют контролировать величину хорды РЛ с погрешностью, не превышающей 0,9 мм, что не в полной мере удовлетворяет требованиям эксплуатации паровых турбин большой единичной мощности.

Условия контроля величины хорды существенно отличаются для различных сечений контролируемых РЛ и определяют погрешность оценки величины проекции хорды в изображении. Целью работы является уменьшение величины погрешности ОЭСКВХ на закрытом цилиндре при валоповороте, для чего необходимо провести исследование ее составляющих и определить способы уменьшения наиболее сильно влияющих.

Оценка степени влияния составляющих суммарной погрешности определения величины хорды РЛ

Выполнен анализ ОЭСКВХ, построенной по схеме аналогичной рассмотренной в работе [5], который показал, что на суммарную погрешность контроля величины хорды оказывают влияние следующие составляющие основной погрешности: фокусного расстояния объектива; расстояния от объектива видеокамеры до оси рабочей лопатки; задания радиуса контролируемого сечения РЛ; изменения углов наклона хорды; времени экспозиции МПОИ; нестабильности вращения ротора; шумовая погрешность МПОИ, а также дополнительные погрешности, обусловленные, в первую очередь, изменениями температуры видеокамеры и температурными деформациями корпуса зонда.

Анализ существующих паровых турбин показал, что наибольшие значения погрешности возникают при контроле параметров РЛ 5 ступени ЦНД турбины К 1200, которые характеризуются следу-

ющими параметрами: расстояние от оси ротора до контролируемого сечения РЛ $R_i = 1750$ мм, угол наклона хорды $\alpha_i = 45^\circ$, величина хорды РЛ $b_i = 200$ мм, частота вращения ротора $\nu = 1,1$ об/мин.

В процессе исследований в среде Mathcad была создана модель обработки видеоизображений в системе, которая позволяет численным образом оценить степень влияния анализируемых факторов.

Анализ погрешности ОЭСКВХ выполнен при следующих параметрах ее основных элементов: фокусное расстояние объектива видеокамеры $f = 3,5$ мм, размер пикселя МПОИ $2,25 \times 2,25$ мкм, частота кадров 30 Гц, время экспозиции МПОИ $t_{exp} = 0,8 t_{кадр}$, отношение сигнал/шум 300.

Для технологического уровня точности изготовления деталей и элементов ОЭСКВХ: погрешности фокусного расстояния $\delta f = 1\%$, нестабильности частоты вращения ротора при валоповороте $\delta \nu = 1\%$, погрешности расстояния от объектива видеокамеры до оси рабочей лопатки $\delta z_0 = 10$ мм, погрешности расстояния от оси ротора до контролируемого сечения РЛ $\delta R_i = 10$ мм получено, что величина суммарной погрешности ОЭСКВХ изменяется от 0,42 до 0,21 мм при изменении расстояния от видеокамеры до РЛ от 60 до 200 мм.

При этом наибольший вклад по степени убывания оказывают погрешность фокусного расстояния объектива видеокамеры δb_i^f (рис. 1), изменение углов наклона хорды δ_i^α , температурная деформация корпуса зонда $\delta b_i^{\Delta T}$, погрешность от задания радиуса сечения РЛ δ_i^R , погрешность расстояния от объектива видеокамеры до оси рабочей лопатки $\delta b_i^{z_0}$, нестабильность вращения ротора δ_i^ν , шумовая погрешность МПОИ $\delta b_i^{МПОИ}$. Наименьший вклад вносят изменения времени экспозиции МПОИ $\delta b_i^{t_{exp}}$.

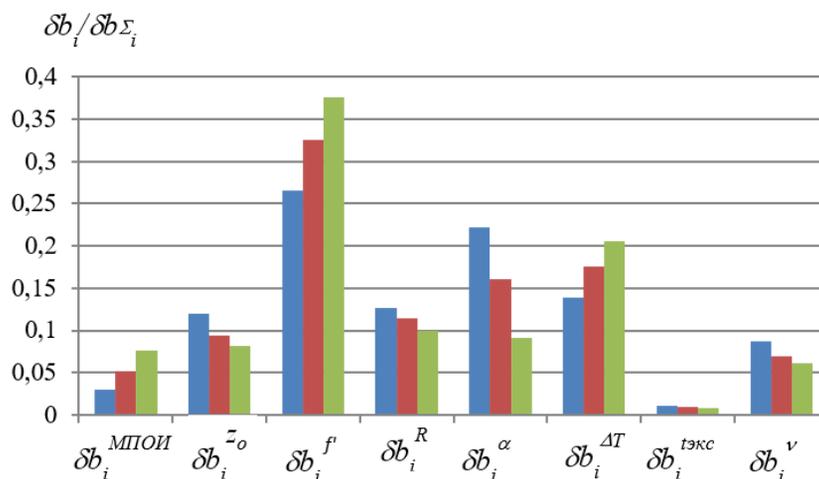


Рис. 1. Диаграмма степени влияния составляющих на суммарную погрешность δb_i^Σ на расстояниях до РЛ равными 70, 115, 150 мм для ЦНД турбины

Наиболее сильно влияющая составляющая погрешности вызванная отклонением фокусного расстояния объектива видеокамеры может быть уменьшена при юстировке и калибровке ОЭСКВХ.

Экспериментальные исследования макета системы показали, что с учетом юстировки и калибровки минимальная суммарная величина погрешности контроля хорды РЛ δb_i^Σ на рабочих дистанциях до 115 мм уменьшилась до величины 0,21 мм, что удовлетворяет требованиям к величине погрешности контроля величины хорды РЛ.

Заключение

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование погрешности опико-электронной системы контроля величины хорды рабочих лопаток паровых турбин на закрытом цилиндре при валоповороте. Разработана компьютерная модель, которая позволила численным образом оценить степень влияния составляющих основной и дополнительной погрешности.

Список источников

- [1] Якушенков, Ю. Г. Теория и расчет опико-электронных приборов: учебник / Ю. Г. Якушенков. — 6-е изд., доп. и перераб. — Москва: Логос, 2020. — 568 с.

- [2] **Turgalieva, T. V.** Potential Accuracy of Measuring Spatial Coordinates Methods for Active Optical Mark in the SEMS/ Turgalieva T. V., Vasilev A. S., Timofeev A. N., Yakovlev A. I., Gorbachev A., Gorbachev A. A., Konyakhin I. A., Vasil'eva A. V. // *Studies in Systems, Decision and Control.* — 2022. — Vol 419. — P. 157–167.
- [3] **Мачихин, А. С.** Измерительные возможности современных видеоэндоскопов / А. С. Мачихин // *Двигатель.* — 2009. — № 3. — С. 8–10.
- [4] **Ханмов, В. А.** Внедрение системы оперативного контроля и диагностики эрозионного износа рабочих лопаток мощных паровых турбин / В. А. Ханмов, Е. Ш. Кокин, Е. И. Пузырев // *Электрические станции.* — 2006. — № 12. — С. 32–36.
- [5] **Шуть, Г.А.** Видеоэндоскопирование рабочих лопаток паровых турбин и контроль их геометрических параметров / Г.А. Шуть, В. В. Коротаев, Е. И. Пузырев, В. А. Рыжова, А. Н. Тимофеев, А. Х. Ахмеров, Л. С. Родикова // *Оптический журнал.* — 2020. — Том 87. — № 11. — С. 58–67. — DOI: 10.17586/1023-5086-2020-87-11-58-67.
- [6] **Rodikova, L. S.** Digital image processing during video endoscopy of steam turbine blades / L. S. Rodikova, V. V. Korotaev, A. K. Akhmerov, A. N. Timofeev, A. S. Vasilev, V. A. Ryzhova, G. A. Shut // *VI IEEE International Conference Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies.* — 2021. — P. 220–232.

Study of the error of the optical - electronic system for monitoring the chord value of the working blades of steam turbines on a closed cylinder during barring

V. V. Korotaev, L. S. Rodikova, A. N. Timofeev

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The leading edges of the working blades of low-pressure cylinders of steam turbines are subject to severe erosive wear, which has the effect of reducing their service life. This, in turn, gives rise to the necessity for periodic inspection and replacement of damaged blades in order to prevent accidents. Promising means of control are optical-electronic systems that permit contactless monitoring of the degree of wear of a steam turbine blade by the value of its chord in the rotor barring mode on a closed cylinder. The specifics of the placement and conditions of application of the elements of the optical-electronic system in the limited space of the turbine cylinder result in the occurrence of various components of the total control error. A computer model was created based on the obtained functions for converting information signals. This model demonstrated that the following components contribute the most to the main error, in descending order: an error in the focal length of the video camera lens, a change in the chord inclination angles, temperature deformation of the probe body, an error in setting the radius of the working blade section, an error in the distance from the video camera lens to the axis of the working blade, rotor rotation instability, and noise error of the matrix receiver. The experimental studies of the system model demonstrated that, with consideration of the adjustments and calibrations, the error in monitoring the chord of the working blade can be reduced to 0.21 mm.

Keywords: *Steam turbine, Chord of working blade, Erosive wear control, Error components, Total error, Matrix field optical radiation receiver*

Формирование и релаксация голограмм и люминесцирующих структур в результате фотопревращений и движения наночастиц

А. В. Вениаминов, Л. Н. Бородина, В. Н. Борисов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе обсуждается роль диффузии наночастиц и молекул и их фототрансформации в формировании и разрушении голографических и люминесцирующих систем и использование релаксации фотоиндуцированных структур для изучения микроскопического движения и фотопревращений. Изучение диффузии наночастиц и молекул проведено методами люминесцентной лазерной сканирующей микроскопии и голографической релаксометрии для измерения размеров, обнаружения разрушения и объединения частиц и молекул, выявления микронеоднородности их окружения. Микроскопия и голография использованы для исследования множественных диффузионных процессов, изменения диффузионных и оптических свойств частиц при воздействии света. Приведено описание трансформации голографической решетки и люминесцентной картины, записанной сфокусированным пучком лазерного сканирующего микроскопа и последующей диффузионной релаксации, отслеживаемых по дифракционному и люминесцентному отклику.

Ключевые слова: Голографическая релаксометрия, Фотоиндуцированная решетка, Восстановление люминесценции, Конфокальная микроскопия, Квантовые точки, Фотополимеризация

Роль диффузии в естествознании и технике многообразна: наблюдение диффузионного размывания искусственно созданной неоднородности концентрации, а следовательно, и оптических свойств композиции, позволяет судить о размерах входящих в нее частиц, их взаимодействии с окружением, степени ее пространственной однородности; различия в скорости взаимного диффузионного перемещения компонент системы позволяет создавать и усиливать оптические свойства периодических дифракционных структур, кроме того модуляция концентрации каждого компонента в отдельности затухает.

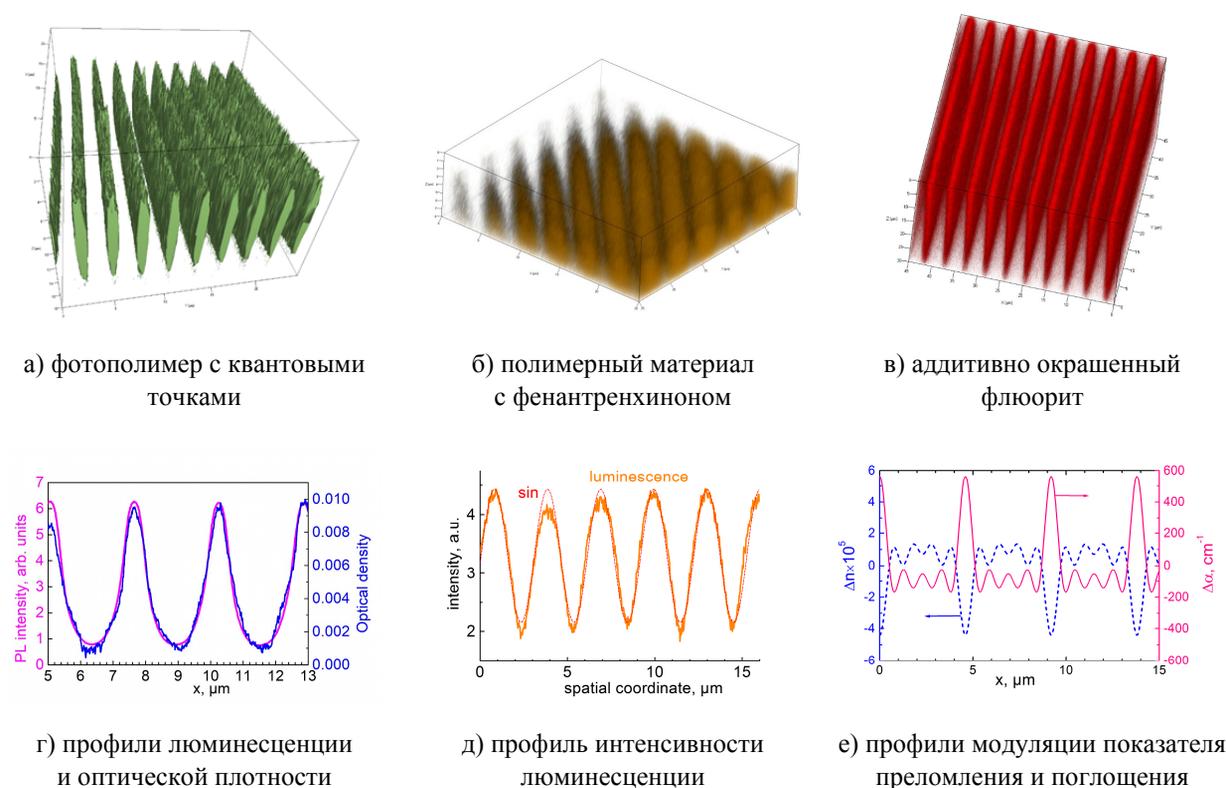


Рис. 1. Объемные люминесцентные микроснимки голограммных решеток, записанных в мономерной композиции с квантовыми точками, стеклообразном полимере с фенантренхиноном и аддитивно окрашенном кристалле флюорита, сделанные с помощью конфокального микроскопа при сканировании по трем координатам, и пространственные профили в направлении вектора решетки

Наиболее известен механизм построения голограмм в фотополимеризующихся композициях [1], основанный на фотоиндуцированной диффузии наночастиц в сочетании с пространственно неоднородной полимеризацией и противодиффузией мономера, но подобным образом — за счет микро-масштабной диффузии проявляются голограммы в материалах с фотоприсоединением фенантренхинона к полимерным цепям [2], и даже в аддитивно окрашенных щелочно-галоидных кристаллах и кристаллах флюорита голограммы образуются благодаря именно диффузионной трансформации центров окраски [3]. На рисунке 1 показаны полученные с помощью лазерной микроскопии в отраженном свете и люминесцентные изображения участков голографических решеток, записанных с участием диффузии в перечисленных материалах. Таким путем формируются не только рефрактивные, но и люминесцирующие структуры, которые могут войти в состав сенсоров и лазеров с распределенной обратной связью. Механизмы, основанные на конкуренции диффузии и присоединения (агрегации), приводят, как правило (кроме случая фенантренхинона), к нелинейной записи, о чем свидетельствуют несинусоидальные профили решеток, записанных в синусоидальном поле интерференции двух плоских волн.

Взаимосвязи диффузии и люминесценции, микроскопии и голографии проявляются и в том, что пространственное перераспределение интенсивности люминесценции в окрестности фотоиндуцированной неоднородности концентрации служит также инструментом исследования диффузии (усовершенствованный метод восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания) [4], подобно тому, как меняющаяся амплитуда периодического распределения рефракции или поглощения, обнаруживаемая через интенсивность дифрагирующего на нем света, работает в методе голографической релаксометрии [5].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Tomita, Y. Photopolymerizable nanocomposite photonic materials and their holographic applications in light and neutron optics / Y. Tomita, et al. // *Journal of Modern Optics*. — 2016. — Vol 63. — № 3. — P. 1-31.
- [2] Вениаминов, А.В. Голографические полимерные материалы с диффузионным проявлением: принципы, компоновка, исследования и применения / А. В. Вениаминов, В. В. Могильный // *Оптика и спектроскопия*. — 2013. — Том 115. — № 6. — С. 1014–1038.
- [3] Ryskin, A. I. Fluorite crystals with color centers: a medium for recording extremely stable but broadly transformable holograms / A. I. Ryskin, A. E. Angervaks, A. V. Veniaminov // *Holographic Materials and Optical Systems*. — 2017. — P. 405–433. DOI: 10.5772/63255.
- [4] Schärtl, W. Forced Rayleigh Scattering – Principles and Application (Self Diffusion of Spherical Nanoparticles and Copolymer Micelles) / W. Schärtl // *Soft Matter Characterization*. — 2008. — P. 677.
- [5] Russo, P. S. Fluorescence photobleaching recovery / P. S. Russo, et al. // *Soft Matter Characterization*. — 2008. — P. 605.

Formation and relaxation of holograms and luminescent structures resulting from phototransformations and motion of nanoparticles

A. V. Veniaminov, L. N. Borodina, V. N. Borisov

ITMO University, St. Petersburg, Russia

We discuss the role of diffusion of nanoparticles and molecules and their phototransformations in the formation and destruction of holographic and luminescent systems and the use of relaxation of photoinduced structures to study microscopic motion and phototransformations. The study of the diffusion of nanoparticles and molecules was carried out using luminescent laser scanning microscopy and holographic relaxometry to measure sizes, detect destruction and aggregation of particles and molecules, and identify micro-heterogeneity of their environment. Microscopy and holography are used to study multiple diffusion processes, changes in the diffusion and optical properties of particles undergone by light exposure. A description is provided for the transformation of a holographic grating and a luminescent pattern recorded by a focused laser beam and subsequent diffusion relaxation, monitored by either diffraction or luminescence response.

Keywords: *Holographic relaxometry, Photoinduced grating, Luminescence recovery, Confocal microscopy, Quantum dots, Photopolymerization*

Адресные комбинированные волоконно-оптические структуры как универсальная платформа для создания сенсорных систем

Т. А. Аглиуллин, А. Ж. Сахабутдинов, О. Г. Морозов, Б. И. Валеев

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, КАИ, Казань, Россия

Представлена концепция создания комбинированных волоконно-оптических структур (КВОС), включающих в себя волоконные брэгговские структуры и интерферометры Фабри-Перо в различных конфигурациях, которые могут быть использованы в качестве чувствительных элементов для измерения различных параметров материалов и веществ. Дана классификация КВОС, представлены результаты исследований различных их конфигураций. Рассмотрены радиофотонные методы их опроса.

Ключевые слова: Волоконная брэгговская решетка, Адресная волоконная брэгговская структура, Комбинированные волоконно-оптические датчики, Радиофотоника

Введение

В последние годы разработке волоконно-оптических датчиков уделяется значительное внимание из-за их уникальных свойств, таких как устойчивость к электромагнитным помехам, малые габариты и вес, высокая чувствительность и отсутствие питания датчика. На данный момент предложен широкий спектр технических решений в разработке интерферометрических волоконно-оптических датчиков, которые используются для измерения температуры, деформации, давления, показателя преломления, акустических волн, вибрации, напряжения и т. д. Наиболее распространенными типами интерферометрических волоконно-оптических датчиков являются: оптические датчики на основе интерферометров Фабри-Перо, Майкельсона, Маха-Цендера, Саньяка и т. д. По сравнению с другими типами волоконно-оптических интерферометров датчики на основе интерферометра Фабри-Перо (ИФП) [1] в целом обладают такими преимуществами, как компактность, простота конструкции и изготовления. Существуют две основные категории волоконно-оптических интерферометров Фабри-Перо: внутренние и внешние, обе из которых могут быть реализованы в различных конфигурациях. ИФП первой категории формируются внутри оптического волокна между двумя соосными волоконными отражателями [2]. Внешний резонатор Фабри-Перо формируется между концом скелетного волокна и внешним отражателем. Внешний резонатор ИФП может быть сплошным, заполненным воздухом (газом) или жидкостью, с внешним отражателем из тонкой пленки или выполненным в виде интерфейса между средой резонатора и окружающей средой [3]. Оба типа ИФП могут использоваться в качестве чувствительных элементов для измерения различных физических параметров, включая давление, акустические волны, температуру, смещение, деформацию, наклон, ускорение, вибрацию [4], концентрацию газа [5] и т. д. В данной работе мы сосредоточимся на разработке датчиков для измерения первых трех физических параметров. В любом из случаев физическое воздействие, действующее на датчик, приводит к изменению длины полости ИФП или изменению показателя преломления среды полости или внешнего отражателя.

Особый интерес представляют датчики температуры на основе ИФП с чувствительным элементом, размещенным на торце оптического волокна. Работа таких датчиков осуществляется за счет изменения оптического пути при изменении показателя преломления материала интерферометра Фабри-Перо (ИФП) под воздействием температуры, а также за счет его теплового расширения (изменения длины интерферометра). Следует отметить, что сравнительно небольшое значение термооптического коэффициента и коэффициента теплового расширения кварцевого стекла, из которого изготовлено оптическое волокно, ограничивает чувствительность технических решений, использующих для формирования ИФП исключительно кварцевое стекло. Чувствительность таких элементов, как правило, не превышает ~ 14 пм/°С [6]. Для повышения чувствительности предлагается использовать различные материалы с повышенным термооптическим коэффициентом и/или коэффициентом теплового расширения [7, 8]. На метрологические характеристики датчиков давления на основе интерферометров Фабри-Перо (ИФП) влияют различные факторы, среди которых особое значение имеют свойства диафрагмы. В контексте материалов диафрагмы кварцевое стекло представляет интерес из-за своей химической стойкости и близкого к оптоволокну коэффициента теплового расширения [9]. Однако создание сверхтонких мембран (субмикронных) создает технологические проблемы, которые ограничивают их чувствительность. Помимо кварцевого стекла, для изготовления волоконно-оптических мембран FPI используются различные полимерные материалы, такие как полиуретан и полистирол [10]. Недостатком полимерных материалов является необходи-

мость предварительной стабилизации. Существуют альтернативные подходы к изготовлению гибких мембран ИФП из таких материалов, как серебро [11], графен [12], фиброин [13], PDMS [14], силиконовый каучук [15], двухкомпонентная эпоксидная клеевая пленка [16] и сталь [17]. Спектральная чувствительность этих образцов ИФП составляет от 0,2 до нескольких нм/кПа. Однако максимальная рабочая температура для датчиков, изготовленных с использованием этих технологий, не превышает 100 °С из-за различий в коэффициентах теплового расширения между мембраной и оптоволоконном. Таким образом, для датчиков давления, работающих при более высоких температурах, предпочтительнее создавать полностью стеклянные чувствительные элементы [18]. Изготовление резонаторов ИФП включает в себя различные методы, такие как сварка волокна с полым сердечником и расщепление одномодового оптического волокна. Также применяется жидкостное травление расщепленного многомодового волокна [10], наряду с такими методами, как трехмерная микропечать [19] и микрообработка сфокусированным ионным пучком [20].

Другой подход заключается в использовании эффекта катастрофического разрушения (плавления) одномодового волокна с мощным источником [21]. Это приводит к периодическим пустотам в сердцевине волокна, и путем расщепления и сращивания такого волокна с неповрежденным одномодовым волокном образуется каплевидная полость, создавая интерферометр Фабри-Перо. В этом случае граница раздела жидкость-газ действует как внешний отражатель. ИФП [21] имеет чувствительность около 0,5 нм/кПа, что сопоставимо с чувствительными элементами на основе мембран. Эти разнообразные подходы и материалы способствуют разработке датчиков давления с различными характеристиками для различных применений.

При проектировании и эксплуатации датчиков давления на основе интерферометров Фабри-Перо крайне важно учитывать их перекрестную чувствительность к температуре, которая возникает из-за теплового расширения компонентов ИФП. Для компенсации влияния температуры на спектральные характеристики ИФП было предложено решение, включающее интеграцию изолированной волоконной брэгговской решетки (ВБР), расположенной вблизи ИФП. Данная ВБР действует как датчик температуры [22]. В этой конфигурации сдвиг центральной длины волны ВБР может использоваться для компенсации спектрального сдвига ИФП, вызванного температурой. Такой подход позволяет проводить точные измерения давления, учитывая при этом изменения температуры, которые в противном случае могли бы привести к ошибкам в показаниях датчика.

1. Классификация комбинированных волоконно-оптических структур

В данной работе рассматривается комбинация двух основных резонансных волоконно-оптических структур: интерферометра Фабри-Перо и волоконной структуры Брэгга, которая может служить датчиком для обнаружения различных физических параметров, как обсуждалось выше. На рисунке 1 представлена обобщенная классификация комбинированных волоконно-оптических структур. Как уже упоминалось ранее, ИФП может быть либо внешним, либо собственным, причем первый использует внешний отражатель и сколотый конец волокна, открытую полость внутри волокна, эластичную диафрагму или сплошную полость (пленку) на торце оптического волокна. Собственный ИФП может быть реализован либо с полой полостью внутри оптического волокна, либо со сплошной полостью. Основным требованием к конструкции ИФП является определенная разница в показателях преломления трех слоев, составляющих ИФП (оптическое волокно, полость ИФП и третья среда — либо оптическое волокно, либо внешний отражатель), что позволяет интерфейсам слоев действовать как частично отражающие зеркала, тем самым обеспечивая резонансы оптического излучения внутри датчика. Вторым базовым элементом комбинированной волоконно-оптической сенсорной структуры является волоконная брэгговская структура, которая может быть реализована в виде обычной («безадресной») ВБР, как однородной (λ -ВБР), так и с фазовым π -сдвигом в своей структуре (π -ВБР). Представленная классификация включает также введенные авторами специальные типы ВБР, которые в целом называются адресными волоконно-оптическими брэгговскими структурами (АВБС) [23, 24]. Спектральный отклик такой структуры включает две или более сверхузкополосных компоненты, частотный интервал между которыми лежит в радиочастотном диапазоне (обычно несколько ГГц) и остается неизменным под воздействием физического воздействия. Частотный интервал между спектральными компонентами уникален для каждой ВБРС в системе и называется адресной частотой АВБС.

АВБС можно разделить на одноадресные (имеющие два спектральных адресных компонента) и многоадресные [25] (имеющие три и более спектральных компонента). Использование последних позволяет увеличить количество одновременно опрашиваемых датчиков в системе за счет большего количества возможных уникальных комбинаций адресных частот. Как одноадресные, так и много-

адресные волоконные брэгговские структуры могут быть реализованы либо путем последовательной записи нескольких обычных однородных ВБР ($N\lambda$ -ВБР) [24], либо путем введения двух и более π -фазовых сдвигов в структуру ВБР [23]. Кроме того, многоадресные волоконные брэгговские структуры могут включать комбинацию обоих подходов к формированию АВБС, включая несколько разделенных по длине волны ВБР с фазовыми π -сдвигами (гибридные АВБС, или ГАВБС). Гибридные структуры, включающие только разделенные по длине волны ВБР с фазовыми π -сдвигами, называются однотипными гибридными АВБС ($N\lambda/\pi$ -ВБР), а структуры, включающие как однородные ВБР без фазовых сдвигов, так и со сдвигами, называются разнотипными гибридными АВБС ($N\lambda+M\lambda/\pi$ -ВБР). Такое сочетание позволяет опрашивать АВБС как отраженным, так и проходящим светом, и формирует в отраженном спектре дополнительные адресные частоты, которые могут быть на порядок ниже основной адресной частоты.

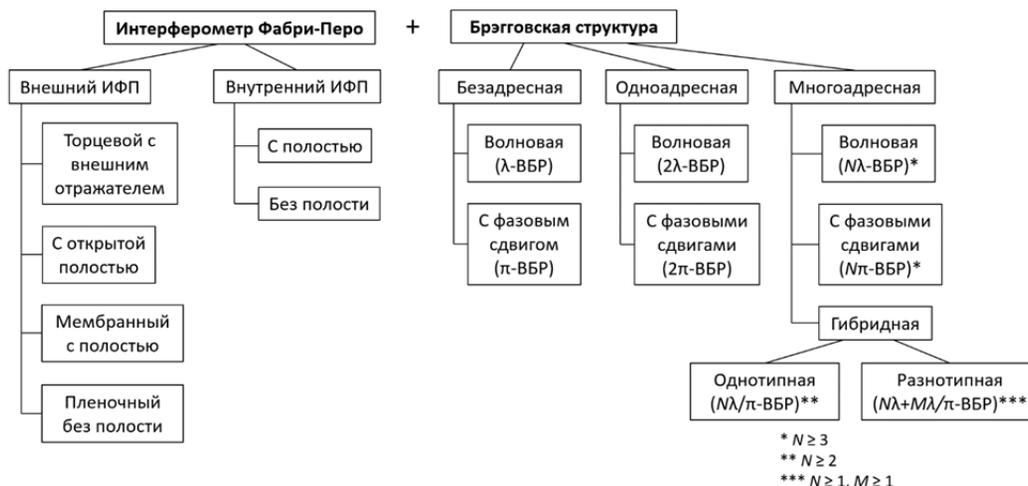


Рис. 1. Обобщенная классификация чувствительных комбинированных волоконно-оптических резонансных структур

2. Акустический датчик на основе интерферометра Фабри-Перо

Рассмотрим первый пример базового элемента комбинированных волоконно-оптических датчиков — интерферометра Фабри-Перо на основе открытой каплевидной полости, образованной внутри оптического волокна (рис. 2а) [26].

Изготовление открытой полости в форме капли на торце оптического волокна включает несколько отдельных этапов. На начальном этапе внутри оптического волокна (в частности, SMF-28) в результате эффекта катастрофического плазменного плавления формируется квазипериодическая последовательность микрополостей. Это явление одновременно с самоиндуцированным разрушением активной зоны, вызванным локализованным нагревом плазмы. Этот локализованный нагрев плазмы создает область повышенной температуры, распространяющуюся к источнику излучения и в конечном итоге испаряющую ядро. На втором этапе изготовления участок оптического волокна SMF-28, содержащий концевую часть последовательности микрополостей, точно разрезается и соединяется с неповрежденным одномодовым волокном SMF-28. Этот процесс плавления включает использование электрической дуги для смятия кварцевого стекла, позволяя газу внутри микрополостей расширяться. В результате это приводит к объединению нескольких микрополостей в одну камеру диаметром от 30 до 100 мкм.

Погружение конца оптического волокна, снабженного макрополостью, в жидкость приводит к созданию замкнутой области, заполненной газом (рис. 2а). В этом ограниченном пространстве межфазные поверхности функционируют как зеркала Фабри-Перо. При направлении на такую структуру широкополосного оптического излучения возникает спектр отражения, напоминающий гребенчатую структуру. Периодичность и контрастность этого спектра зависят от ряда геометрических и физических факторов. К этим факторам относятся показатель преломления сердцевины оптического волокна внутри газонаполненной полости и окружающей жидкости, а также длина интерферометра, как показано на рисунке 2б.

Данные на рисунке 2б представляют собой спектр отражения, полученный при двух условиях: во-первых, когда конец волокна подвергался воздействию воздуха (обозначено черной линией),

и, во-вторых, когда полость была погружена в соответствующие испытательные жидкости (обозначены красной линией для изопропанола и синей линией для воды) в течение первой минуты контакта датчика со средой [26]. Как видно из графика, интерференционный сигнал имел более короткий период при погружении в изопропанол по сравнению со спектром, записанным в воде.

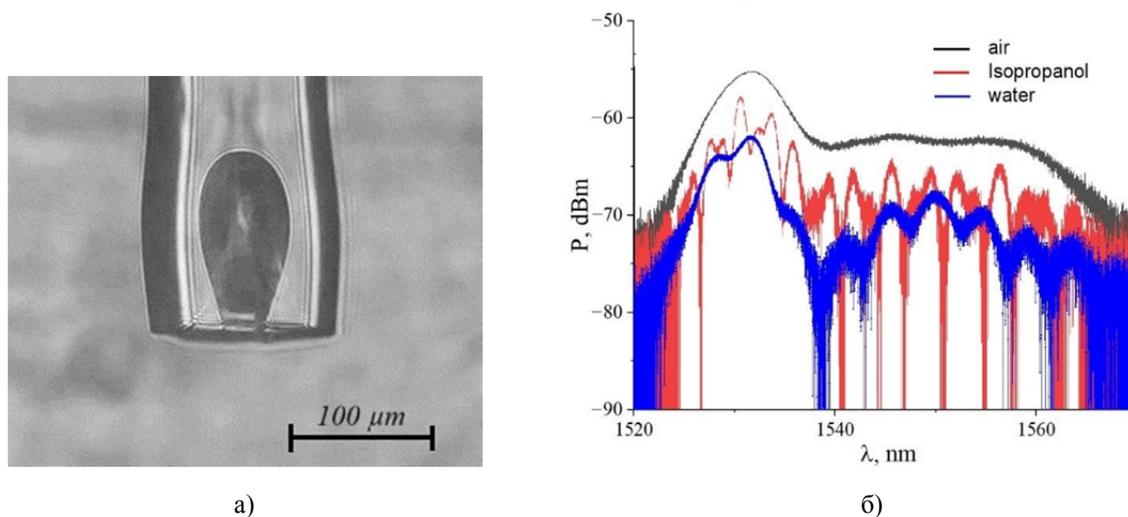


Рис. 2. Полость каплевидной формы на торце оптического волокна, погруженного в жидкость: а) внешний вид; б) спектр отражения (черный — торец волокна в воздухе; красный — торец волокна погружен в изопропанол; синий — торец волокна погружен в воду)

Высокая чувствительность созданного интерферометра Фабри-Перо (ИФП), имеющего открытый макрорезонатор, погруженный в жидкость, позволяет использовать его для обнаружения акустических волн. Для оценки работы датчика была собрана экспериментальная установка, функционирующая следующим образом. Лазерное излучение от перестраиваемого узкополосного лазерного источника (диапазон длин волн: 1525–1570 нм, полуширина: 0,16 нм) вводилось через порты циркулятора. Он направлял лазерное излучение в оптическое волокно, на торце которого был сформирован ИФП. Эксперименты проводились на длине волны 1550 нм при мощности излучения до 10 дБм. Конец световода погружался в кювету размерами 5×5×5 см, заполненную водой. На дне кюветы располагался динамик, ориентированный на интерферометр Фабри-Перо. С помощью генератора ГСПФ-053, позволяющего контролировать форму, частоту и амплитуду сигнала, и подводного динамика генерировалась акустическая волна, влияющая на резонансные характеристики интерферометра. Фотоприемник Avesta OD-007BFC использовался для детектирования, изменяющегося во времени амплитудно-модулированного сигнала, исходящего от ИФП через циркулятор. Впоследствии записанный сигнал подвергался анализу быстрого преобразования Фурье на ПК и конвертировался в аудиофайл для дальнейшего анализа. Эксперименты показали, что исследованный интерферометр Фабри-Перо (ИФП) обладает способностью улавливать сигналы в диапазоне частот от 1 Гц до 100 кГц. Основные факторы, обеспечивающие такой широкий спектр рабочих частот, — геометрия полости, включая ее отверстие, и характеристики окружающей среды, в данном случае воды.

3. Микротермометр на основе интерферометра Фабри-Перо

Другой пример интерферометра Фабри-Перо как базового элемента комбинированных волоконно-оптических резонансных структур представляет собой слой УФ-отверждаемой эпоксидной смолы, нанесенной на сколотый торец стандартного телекоммуникационного одномодового оптического волокна (рис. 3). Процесс формирования сенсора основан на технологии формирования полимерного «моста» [27] между торцами двух оптических волокон. Сначала концы двух одномодовых волоконно-оптических пигтейлов зачищают от защитно-упрочняющего покрытия, с волокон удаляют остатки акрилатного покрытия и скалывают концы волокон под прямым углом. Подготовленные волокна помещают в держатели, установленные на микропозиционерах друг напротив друга. К одному из пигтейлов подключен источник излучения (1550 нм), а к другому — измеритель оптической мощности. Под микроскопом и с помощью измерителя оптической мощности оптические волокна точно регулируются так, чтобы расположить их соосно и напротив друг друга.

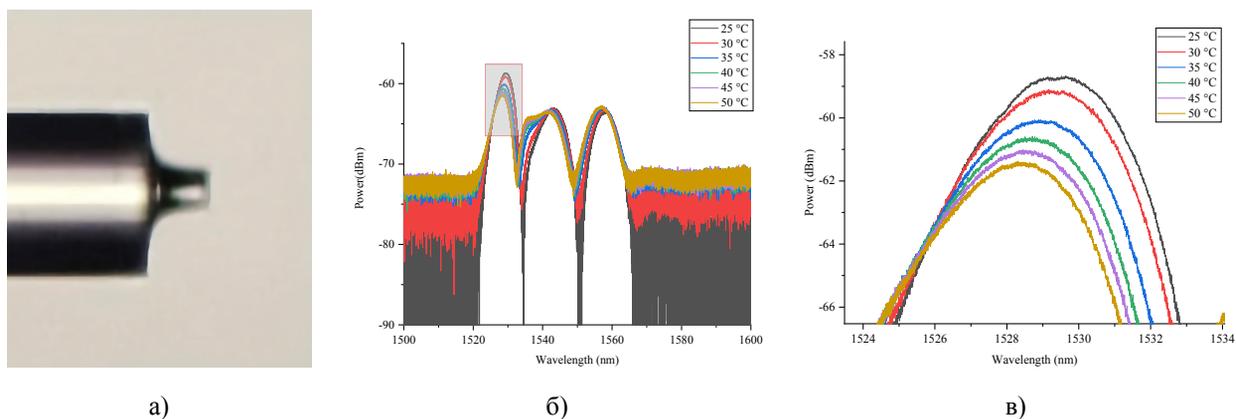


Рис. 3. ИФП на основе эпоксидной смолы: внешний вид (а), спектр отражения при различных значениях температуры в диапазоне от 25 до 50 °С (б), пик спектра отражения при изменении температуры (в)

После выравнивания оптические волокна разводятся на определенное расстояние (~ 3 мм) и на конец одного из пигтейлов с помощью системы дозирования жидкости Longer-Pump TS-2A наносится капля фотополимерного материала. При приближении к противоположному световоду за счет смачиваемости волокна и сил поверхностного натяжения полимер растягивается между концами световодов, в результате чего между торцами волокон образуется «мостик» из полимерного материала. Процесс полимеризации происходит путем поэтапного попеременного облучения УФ-источником FUWO (FUV-6L) и раздвижения оптических волокон. Контроль скорости и расстояния раздвижения, продолжительности и мощности излучения на каждом этапе позволяет управлять длиной, толщиной и формой получаемой структуры. Скол образовавшегося полимерного мостика вблизи одного из концов обеспечивает формирование «столбика» с перпендикулярным торцом. Таким образом, две границы раздела – оптическое волокно/полимер и полимер/воздух вместе образуют интерферометр Фабри-Перо на конце волокна (рис. 3а).

Объектом температурных испытаний являлся чувствительный элемент в виде полимерного «столбика», изготовленного из УФ-отверждаемой эпоксидной смолы AC545 и имеющего следующие размеры: диаметр 32 мкм, длина 51,2 мкм. Датчик размещался внутри климатической камеры 60/150-80 КТХ, температура внутри климатической камеры изменялась линейно от 25 до 50 °С с шагом 5 °С со скоростью нагрева 4 °С/мин и временем выдержки 5 минут на каждом шаге. Спектры отражения датчика при различных температурах представлены на рис. 3б и в. При изменении температуры форма спектра отражения сохраняется, но сам спектр смещается по длине волны. Полученные экспериментальные данные позволяют с высокой точностью определить сдвиг спектра отражения, а, следовательно, и температуру, действующую на чувствительный элемент. Монотонный сдвиг спектра при изменении внешней температуры позволяет использовать предлагаемый чувствительный элемент в качестве прецизионного датчика температуры, чувствительность которого составляет $\sim 44,1$ пм/°С, что превышает чувствительность классических волоконно-оптических датчиков (~ 11 пм/°С), изготовленных на основе кварцевого стекла.

4. Радиофотонный метод опроса

Опрос предлагаемых датчиков может осуществляться радиофотонным методом, включающим генерацию гребенки оптических частот, которая в общем случае состоит из двух и более сверхузкополосных спектральных составляющих с разном частоты порядка нескольких ГГц и используется для зондирования спектра интерферометра Фабри-Перо. Гребенку оптических частот можно сформировать путем модуляции лазерного излучения радиочастотным сигналом или путем пропускания широкополосного оптического излучения через специально структурированную волоконную брэгговскую решетку [28].

На фотоприемнике возникают перекрестные биения всех компонент излучения гребенки оптических частот. Смещение спектра ИФП, вызванное изменением температуры, влечет за собой изменение амплитуд отраженных спектральных составляющих гребенки оптических частот, спектральное положение которой предполагается стабилизированным в середине линейного участка спектра интерферометра. Это, в свою очередь, приводит к изменению амплитуд сигнала биений на выходе фотодетектора. Как было показано в работе [28], использование искусственных нейронных сетей для анализа амплитуд сигнала биений на фотодетекторе позволяет проводить измерения температу-

ры с точностью $0,018\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью волоконно-оптического ИФП. При этом частота измерений ограничивается лишь производительностью аналого-цифрового преобразователя и процессора, вычисляющего положение спектра ИФП, и может достигать десятков и сотен кГц.

Заключение

В качестве многопараметрического чувствительного элемента волоконно-оптических сенсорных систем могут быть использованы комбинированные волоконно-оптические резонансные структуры, включающие интерферометр Фабри-Перо и волоконную брэгговскую структуру, объединяющие преимущества обоих типов резонансных структур. Представленная классификация комбинированных структур включает как внешние, так и внутренние ИФП, а также различные типы волоконных брэгговских структур (традиционные и адресные). Использование гибридной АВБС дает дополнительные преимущества, такие как опрос с использованием как отраженного, так и прошедшего света, генерация дополнительных адресных частот в отраженном спектре, которые могут быть на порядок ниже основной адресной частоты.

Рассмотренный пример внешнего ИФП на основе открытого резонатора на конце световода обладает способностью детектировать акустические сигналы в жидкостях в диапазоне частот от 1 Гц до 100 кГц. Другой пример чувствительного элемента на основе ИФП, сформированный в виде «столбика» из УФ-отверждаемой эпоксидной смолы на торце оптического волокна, имеет повышенную температурную чувствительность порядка $44\text{ пм}/^{\circ}\text{C}$.

Также был предложен радиофотонный подход к высокоскоростному опросу датчиков, который, по данным предыдущих исследований, обеспечивает точность измерений $\sim 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ с использованием аппарата искусственных нейронных сетей. Многообещающие характеристики разработанного миниатюрного чувствительного элемента на конце волокна открывают перспективы его использования в медицинских и биологических приложениях.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10059.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Fabry, C.** Sur les franges des lames minces argentées et leur application à la mesure de petites épaisseurs d'air / C. Fabry, A. Pérot // *Ann. Chim. Phys.* — 1897. — Т. 12. — С. 459–501.
- [2] **Gong, Y.-J.R.** Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors: An Introduction. *Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors* / Y.-J. R. Gong, Z.-L. Ran Yuan. — Boca Raton: CRC Press, 2017. — 204 с.
- [3] **Islam, Md. R.** Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review / Md.R. Islam, et al. // *Sensors.* — 2014. — Vol 14. — № 4. — P. 7451–7488.
- [4] High-Temperature Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer in Microfiber Tip / Z. Chen [et al.] // *Sensors.* — 2018. — Vol 18. — № 1. — P. 202.
- [5] **Zhu, C.** Advances in Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Physical and Mechanical Sensors: A Review / C. Zhu // *IEEE Sensors Journal.* — 2023. — Т. 23. — № 7. — С. 6406–6426.
- [6] **Kanawade, R.** Fiber optic Fabry-Perot interferometer sensor: an efficient and fast approach for ammonia gas sensing / R. Kanawade // *JOSA B.* — 2019. — Т. 36. — № 3. — С. 684–689.
- [7] **Liu, G.** High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity / G. Liu, M. Han, W. Hou // *Optics Express.* — 2015. — Т. 23. — № 6. — С. 7237–7247.
- [8] Highly sensitive PDMS-filled Fabry-Perot interferometer temperature sensor based on the Vernier effect / L. Hou // *Applied Optics.* — 2019. — Т. 58. — № 18. — С. 4858–4865.
- [9] **Totsu, K.** Ultra-Miniature Fiber-Optic Pressure Sensor Using White Light Interferometry. *J. Micromech. Microeng.* — 2004. — Vol 15. DOI:10.1088/0960-1317/15/1/011.
- [10] **Cibula, E.** Miniature fiber-optic pressure sensor with a polymer diaphragm / E. Cibula, D. Đonlagić // *Applied Optics.* — 2005. — Т. 44. — № 14. — С. 2736–2744.
- [11] **Xu, F.** High-sensitivity Fabry-Perot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm / F. Xu // *Optics Letters.* — 2012. — Т. 37. — № 2. — С. 133–135.
- [12] **Ma, J.** High-sensitivity fiber-tip pressure sensor with graphene diaphragm / J. Ma // *Optics Letters.* — 2012. — Т. 37. — № 13. — С. 2493–2495.
- [13] **Cheng, L.** Silk fibroin diaphragm-based fiber-tip Fabry-Perot pressure sensor / L. Cheng // *Optics Express.* — 2016. — Т. 24. — № 17. — С. 19600–19606.
- [14] **Wei, X.** Optical Fiber Gas Pressure Sensor Based on Polydimethylsiloxane Microcavity / X. Wei // *Journal of Lightwave Technology.* — 2021. — Т. 39. — № 9. — С. 2988–2993.

- [15] **Cheng, X.** Silicone Rubber Based Highly Sensitive Fiber-Optic Fabry–Perot Interferometric Gas Pressure Sensor / X. Cheng // *Sensors*. — 2020. — Vol 20. — № 17. — P. 4927.
- [16] **Zhang, Y.** A High Precision Fiber Optic Fabry–Perot Pressure Sensor Based on AB Epoxy Adhesive Film / Y. Zhang // *Photonics*. — 2021. — Vol 8. — № 12. — P. 581.
- [17] **Zhu, C.** Optical Interferometric Pressure Sensor Based on a Buckled Beam with Low-Temperature Cross-Sensitivity / C. Zhu // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. — 2018. — T. 67. — № 4. — C. 950–955.
- [18] **Li, J.** Batch-producible all-silica fiber-optic Fabry–Perot pressure sensor for high-temperature applications up to 800 °C / J. Li // *Sensors and Actuators A: Physical*. — 2022. — Vol 334. — P. 113363.
- [19] **Wu, J.** Optical Fiber-Tip Fabry–Pérot Interferometric Pressure Sensor Based on an In Situ μ -Printed Air Cavity / J. Wu // *Journal of Lightwave Technology*. — 2018. — T. 36. — № 17. — C. 3618–3623.
- [20] **Cui, Q.** Miniature Optical Fiber Pressure Sensor With Exfoliated Graphene Diaphragm // *IEEE Sensors Journal*. — 2019. — Vol. 19. — P. 5621–5631. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2904020.
- [21] **Domingues, M. F.** Hydrostatic pressure sensor based on micro-cavities developed by the catastrophic fuse effect / M.F. Domingues // *24th International Conference on Optical Fibre Sensors 24th International Conference on Optical Fibre Sensors*. — 2015. — T. 9634. — C. 737–740.
- [22] **Ferreira, L. A.** Simultaneous measurement of displacement and temperature using a low finesse cavity and a fiber Bragg grating / L.A. Ferreira // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 1996. — T. 8. — № 11. — C. 1519–1521.
- [23] **Морозов, О. Г.** Адресные волоконные брэгговские структуры в квазираспределенных радиофотонных сенсорных системах / О. Г. Морозов, А. Ж. Сахабутдинов // *Компьютерная оптика*. — 2019. — Т. 43. — № 4. — С. 535–543.
- [24] **Gubaidullin, R. R.** Application of Gaussian Function for Modeling Two-Frequency Radiation from Addressed FBG / R. R. Gubaidullin // *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. — 2020. — C. 1–4.
- [25] **Morozov, O.** Multi-Addressed Fiber Bragg Structures for Microwave-Photonic Sensor Systems / O. Morozov // *Sensors*. — 2020. — T. 20. — № 9. — C. 2693.
- [26] **Morozov, O.** Fiber-Optic Hydraulic Sensor Based on an End-Face Fabry–Perot Interferometer with an Open Cavity / O. Morozov // *Photonics*. — 2024. — Vol 11. — № 1. — P. 22.
- [27] **Mohammed P.A.** Long Free-Standing Polymer Waveguides Fabricated Between Single-Mode Optical Fiber Cores / P.A. Mohammed, W.J. Wadsworth // *Journal of Lightwave Technology*. — 2015. — T. 33. — № 20. — C. 4384–4389.
- [28] Enhancing Microwave Photonic Interrogation Accuracy for Fiber-Optic Temperature Sensors via Artificial Neural Network Integration / R. Makarov [et al.] // *Optics*. — 2024. — Vol. 5. — № 2. — P. 223–237.

Addressed combined fiber-optic structures as a universal platform for creating sensor systems

T. A. Agliullin¹, A. Zh. Sakhabutdinov¹, O. G. Morozov¹, B. I. Valeev¹

¹ *Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, Kazan, Russia*

The concept of creating combined fiber-optic structures (CFOS), including fiber Bragg structures and Fabry-Perot interferometers in various configurations, which can be used as sensitive elements for measuring various parameters of materials and substances, is presented. A classification of CFOS is given, and the results of studies of their various configurations are presented. Microwave-photonic methods for their interrogation are considered.

Keywords: *Fiber Bragg grating, Addressed fiber Bragg structure, Combined fiber-optic sensors, Microwave photonics*

Метод одноэкспозиционного голографического формообразования в объеме материала

Н. Д. Ворзобова, П. П. Соколов

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Предложен метод одноэкспозиционного формообразования в объеме материала, определяющий новую технологию 3D-печати, в которой в отличие от аддитивных технологий, основанных на последовательном формировании трехмерного объекта, весь объект формируется в результате однократного экспонирования. Основой метода является отображение в объеме материала голографического изображения формируемого объекта. Рассмотрены факторы, определяющие характеристики проектируемых изображений и их отображение в объеме фотополимерного материала при однократной экспозиции, включая принципы ограничения размеров области полимеризации, а также размерные характеристики и конфигурации трехмерных изделий. Приводятся результаты реализации метода при использовании излучения в зеленой и УФ областях спектра в качестве формирующего и получения объектов с трехмерной формой поверхности. Рассматриваются возможности применения предлагаемого метода.

Ключевые слова: Голографическое формообразование в объеме материала, 3D-печать

Введение

В настоящее время наиболее широко исследуемыми и применяемыми для получения изделий с трехмерной конфигурацией являются аддитивные технологии 3D-печати. Аддитивные технологии основаны на последовательном формировании трехмерных объектов, что ограничивает скорость процесса. Существует множество подходов, направленных на увеличение скорости, из которых наиболее эффективными представляются подходы, основанные на использовании объема материала — метод аксиальной литографии [1] и метод линейной объемной печати [2]. Однако данные методы остаются методами последовательного синтеза. Принципиальным решением проблемы скорости является разработка метода, исключаящего последовательный синтез, представленного в данной работе.

Основные результаты

Предлагаемый метод одноэкспозиционного голографического формообразования — метод голографической 3D-печати основан на проекции в объем фотополимерного материала голографического изображения формируемого объекта и его отображении в объеме материала в результате однократного экспонирования. В работе исследованы факторы, определяющие характеристики проектируемых голографических изображений и их отображение в объеме фотополимерного материала, а также размерные характеристики и конфигурации трехмерных объектов.

Одной из основных проблем одноэкспозиционного голографического формообразования является ограничение полимеризации вне области наибольшей резкости проектируемого изображения. Предложены принципы ограничения размеров области полимеризации за счет кислородного ингибирования, создания необходимого поглощения в материале, двухфотонных процессов.

Выявлена роль поглощения в материале. Установлена связь глубины профиля формируемых объектов с материальными и экспозиционными параметрами. Показано, что соотношение поглощения в материале и величины экспозиции влияет на конфигурации трехмерных объектов. Определены условия получения малоразмерных объектов (в микронной размерной области) без искажения конфигурации. Выявлена позитивная роль двухфотонных процессов.

Исследованы трансформационные свойства проектируемых изображений при различии длин волн и геометрических параметров записи проектирующей голограммы и схемы голографической 3D-печати. Показано преимущество уменьшения длины волны формирующего излучения относительно длины волны записи голограммы с точки зрения уменьшения размеров трехмерных объектов и их размерных искажений, а также возможности использования серийных фотополимерных материалов со спектральной чувствительностью в УФ области.

Приведены результаты реализации метода при использовании излучения в зеленой и УФ областях спектра в качестве формирующего и получения объектов с трехмерной формой поверхности. Обсуждаются перспективы развития и использования предлагаемого метода.

Заключение

Предложен и исследован метод одноэкспозиционного голографического формообразования в объеме фотополимерного материала. Выявлены и исследованы факторы, определяющие размерные характеристики и конфигурации формируемых объектов. Результаты определяют возможность разработки новой технологии 3D-печати, преимуществом которой относительно аддитивных технологий является исключение последовательного синтеза трехмерного изделия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Geisler, E. 3D printing of optical materials by processes based on photopolymerization: materials, technologies, and recent advances / E. Geisler, M. Lecompère, O. Soppera O. // Photonics Research. — 2022. — Vol 10. — № 6. — P. 1344–1360.
- [2] Regehly, M. Holography for linear volumetric 3D printing / Regehly M., Garmshausen Y., Reuter M., Konig N.F., Israel E., Kelly D.P., Chou C.Y., Koch K., Asfary B., Hecht S. // Nature. — 2020. — Vol 588. — P. 620–624.

Method of single-exposure holographic shaping in the volume of material

N.D.Vorzobova¹, P.P.Sokolov¹

¹ITMO University, St. Petersburg, Russia

A method of single-exposure shaping in a volume of material proposes, which defines a new 3D printing technology, in which, unlike additive technologies based on the sequential formation of a three-dimensional object, the entire object is formed by a single exposure. The basis of the method is the display of a holographic image of the formed object in the volume of the material. The work examines the factors that determine the characteristics of the projected images and their display in the volume of photopolymer material during a single exposure, including the principles of limiting the size of the polymerization area, as well as the dimensional characteristics and configurations of three-dimensional products. The results of implementing the method using radiation in the green and UV regions of the spectrum as a forming one and obtaining objects with a three-dimensional surface shape are given. The prospects for the development and use of the proposed method are considered.

Keywords: Holographic shaping in the volume of material, 3D printing

Расчет системы световозвращателей для задачи измерения параметров орбиты МКА

Г. В. Башкатов, И. В. Животовский

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Описана дифракция на уголковом световозвращателе. Предложена конструкция системы световозвращателей для задачи измерения дальности до малого космического аппарата. Смоделирована дифракция на системе световозвращателей в случае когерентного и некогерентного освещения. Проведен комплексный светоэнергетический расчет системы световозвращателей для случая пролета малого космического аппарата с произвольной ориентацией относительно квантовой оптической станции.

Ключевые слова: Световозвращатель, Система световозвращателей, Эффективная апертура

Введение

Уголковые световозвращатели (УСВз), в силу узкой индикатрисы световозвращенного излучения, позволяют эффективно проводить измерения дальности до космических аппаратов, а также определять их пространственное положение. Обычно применяются не полые, а призматические УСВз благодаря более простому изготовлению с высокой точностью, а также их более широкой пеленгационной характеристике [1]. Однако для решения таких задач применяются не отдельные УСВз, а системы световозвращателей, позволяющие еще больше расширить пеленгационную характеристику (до 180° по углу азимута).

Дифракция на УСВз

При расчете распределения интенсивности световозвращенного от УСВз излучения в плоскости анализа, заключающийся в использовании дифракционного интеграла в приближении Фраунгофера при интегрировании по контуру эффективной апертуры [1, 2]. Эффективная апертура формируется в действительности в двух различных плоскостях по ходу луча вдоль оптической оси — при прямом и обратном ходе через входную грань. При обратном ходе пучок ограничивается в случае внеосевого падения на УСВз в силу смещения пучка внутри световозвращателя. Таким образом происходит последовательная дифракция на двух, в общем случае эллиптической формы апертурах, пересечение которых формирует эффективную апертуру.

Дифракция на системе световозвращателей

Дифракционная картина, полученная от системы световозвращателей, описывается как сумма интенсивностей полей световозвращенного излучения от отдельных эффективных апертур УСВз в случае некогерентного сложения, что имеет место при распространении излучения в атмосфере, где турбулентность разрушает когерентность. Если же исключить влияние атмосферы и проводить измерение дальности, например в космосе, то распределение интенсивности можно найти при помощи Фурье-преобразования от транспаранта, состоящего из эффективных апертур УСВз. В рамках решения дифракционной задачи была разработана программа в программном пакете Matlab, которая позволяет найти распределение интенсивности в плоскости анализа как в случае когерентного, так и в случае некогерентного освещения.

Светоэнергетический расчет

Уравнение, позволяющее найти количество фотонов на приемнике излучения давно описано в научной литературе [4]. Квантовые оптические станции (КОС), проводящие измерения дальности, способны работать в условиях, когда приходит 0,5–50 фотонов полезного световозвращенного сигнала [5]. Параметры КОС для расчета описаны в диссертации [6]. В представленной работе показано, что такие значения потоков световозвращенного излучения достигаются при измерении дальности во всем диапазоне углов азимута $0-180^\circ$ и зенитных углов $0-60^\circ$, что подтверждает эффективность данной системы световозвращателей.

Благодарность

Авторы выражают благодарность за конструктивное обсуждение работы д.т.н., профессору Соколову А. Л., к.т.н. Акентьеву А. С. и Аксенцеву П. А.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bartels, N.** Design and qualification of a recessed satellite cornercube retroreflector for ground-based attitude verification via satellite laser ranging / N. Bartels, et al. // CEAS Space Journal. — 2019. — Т. 11. — С. 391–403. — DOI: 10.1007/s12567-019-00255-x.
- [2] **Arnold, D. A.** Method of calculating retroreflector-array transfer functions. — 1978. — №. NASA-CR-157932. — С. 169.
- [3] **Садовников, М. А.** Пространственная поляризационная структура излучения, формируемая уголковым отражателем с неметаллизированными гранями / М. А. Садовников, А. Л. Соколов // Оптика и спектроскопия. — 2009. — Т. 107. — №. 2. — С. 213–218.
- [4] **Degnan, J. J.** A tutorial on retroreflectors and arrays used in satellite and lunar laser ranging / J. J. Degnan // Photonics. — MDPI. — 2023. — Том 10. — № 11. — С. 1215–1232. — DOI: 10.3390/photonics10111215.
- [5] **Appleby, G. M.** Satellite signatures in SLR observations / G. M. Appleby // NASA. Goddard Space Flight Center, Eighth International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. — 1993. — С. 14.
- [6] **Brunettin, L.** Development of a nanosatellite payload for orbit and attitude determination through laser ranging / L. Brunettin // Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale. — 2023. — С. 83.

Calculation of the retroreflector system for measuring the parameters of a small spacecraft's orbit

G. V. Bashkatov, I. V. Zhivotovsky

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In this paper, the diffraction on a cube corner retroreflector is described. A design for a retroreflector system for satellite and small satellite laser ranging is proposed. The diffraction of both coherent and incoherent illumination is studied using Matlab. A complex energy analysis of the retroreflector system is carried out for a small spacecraft with an arbitrary orientation relative to a ILRS station.

Keywords: *Retroreflector, Retroreflector system, Effective aperture*

Разработка, изготовление и исследование инфракрасных интерференционных фильтров для спектрального диапазона от 2 до 20 мкм

А. Н. Тропин, Н. Э. Тропина

АО Научно-исследовательский институт «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты опытно-конструкторской разработки серии инфракрасных интерференционных фильтров для спектрального диапазона от 2 до 20 мкм. Приведены сведения об особенностях проектирования и изготовления коротко- и длинноволновых блокирующих, узкополосных и полосовых фильтров. Исследованы температурные и угловые зависимости спектральных характеристик пропускания фильтров. Продемонстрированы возможности применения разработанных фильтров в оптических датчиках для приборов обеспечения пожаро- и взрывобезопасности, NDIR-сенсорах инфракрасных газоанализаторов и в других современных приложениях фотоники.

Ключевые слова: Тонкие пленки, Интерференция, Многослойное покрытие, Спектральные характеристики, Вакуумные технологии

Введение

Вакуумные технологии одно- и многослойных оптических покрытий получили свое развитие в 30-х годах прошлого столетия, когда появились промышленные средства получения вакуума — вакуумные насосы. С тех пор в области техники и технологий тонкопленочных покрытий наблюдаются непрерывный прогресс и совершенствование как самих технологических методов и подходов, используемых при проектировании и изготовлении интерференционных фильтров, так и функциональных характеристик получаемых тонкопленочных покрытий.

Современные достижения в области техники инфракрасного диапазона диктуют новые требования к характеристикам оптических элементов. В полной мере это относится и к фильтрующим элементам, преобразующим спектральный и фазовый состав излучения. В отличие от видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра, где возможно использование сорбционных фильтров, например из цветного стекла, задача фильтрации излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов решается в подавляющем большинстве случаев с использованием интерференционных фильтров [1, 2].

В общем виде оптический интерференционный фильтр состоит из плоскопараллельной подложки с нанесенным на одну или обе ее стороны многослойным тонкопленочным покрытием. Обычно при формировании многослойного покрытия используют чередующиеся слои двух прозрачных материалов с различными показателями преломления n_1 и n_2 . Однако при проектировании и изготовлении наиболее сложных интерференционных покрытий для формирования тонких пленок могут применяться 3 и более пленкообразующих материалов. Толщина каждого слоя подбирается с учетом дисперсионных зависимостей его оптических констант и таким образом, чтобы реализовать требуемые спектральные, а при необходимости, и фазовые характеристики.

В случае многослойного оптического покрытия в его спектральной характеристике имеются области с высоким пропусканием, а также спектральные области, в котором пропускание отсутствует вследствие поглощения излучения или его отражения в результате многолучевой интерференции. Очевидно, что создание и надежное функционирование интерференционных фильтров зависит от свойств оптических пленок, применяемых для их изготовления. Изготавливаются многослойные покрытия осаждением в вакууме.

1. Проектирование фильтров

Выбор структуры покрытия и последующее определение параметров слоев составляют задачу конструирования [3]. Ее обычно разделяют на две составляющие. Первая такая составляющая — это задача анализа покрытий, которая заключается в расчете спектральных характеристик покрытия по известной структуре покрытия. Определяются спектры отражения, пропускания и поглощения, фазовые набег при отражении и пропускании. Эта задача решена в аналитическом виде для одно-двух- и трехслойных покрытий. В принципе, она может быть решена аналитически и для покрытий из большего числа слоев, но в этом случае решения настолько громоздки, что не представляют ценности и их обычно находят численными методами.

Численными методами прямая задача расчета характеристик заранее известной многослойной структуры может быть решена следующими способами: методом перебора, матричным методом, рекуррентным методом, методом адмиттанса [4].

Задача нахождения структуры покрытия по заданным спектральным характеристикам — задача синтеза (проектирования) покрытий является обратной по отношению к задаче анализа и обычно рассматривается в контексте постановки задач обратного инжиниринга.

В настоящее время существуют аналитические и машинные (численные) подходы к решению этой задачи. Машинные методы основаны на введении некоторой функции качества (оценочной функции), которая дает количественную оценку соответствия текущей характеристики покрытия требуемому спектру. Как правило, локальный минимум такой оценочной функции находится с применением методов многопараметрической оптимизации (методы градиентного спуска и сопряженных градиентов, симплекс-метод и т. д.). Минимальное значение функции качества соответствует найденному решению.

На заключительном этапе конструирования исследуется влияние на спектральные и фазовые характеристики покрытий различных дестабилизирующих факторов, связанных с технологическими особенностями применяемых приемов и методов нанесения покрытий. Обычно эта часть работы решается расчетными методами или проведением виртуальных напылительных процессов [5].

При проектировании покрытий в настоящей работе использовалась наиболее прогрессивная современная методология, известная в мировой практике как метод игольчатого синтеза (needle optimization technique) [6]. Суть подхода заключается в следующем. На начальном этапе в качестве решения выбирается начальное приближение, к которому применяется традиционный метод многопараметрической оптимизации, например градиентный. После нахождения локального минимума оценочной функции, ограничения связанные с многоэкстремальностью этой самой функции преодолеваются за счет добавления в определенное место в структуре покрытия дополнительного тонкого слоя. Такое добавление слоя эквивалентно изменению показателя преломления текущего слоя, в который был добавлен новый слой. Тем самым происходит перевод решаемой задачи из N -мерного пространства в $N+2$ -мерное, где N и $N+2$ — количество слоев в покрытии до и после применения игольчатой вариации показателя преломления. Далее снова применяются различные методы многопараметрической оптимизации до нахождения решения с заданной точностью.

Кроме этого, в работе ключевой особенностью при проектировании сложных фильтров являлось введение системы дополнительных ограничений при решении задач многопараметрической оптимизации. Эта система ограничений связана с возможностями практической реализации спроектированных покрытий.

Первым таким ограничением являлось ограничение на количество слоев в покрытии. Очевидно, что с необоснованным увеличением количества слоев увеличивается вероятность возникновения ошибок в толщинах слоев при напылении и отклонения значений оптических констант пленок от значений, принятых в расчетах. Так в настоящей работе были реализованы многослойные структуры с количеством слоев от 15 до 45.

Второе ограничение накладывает требования на минимальную и максимальную толщину каждого слоя и связано со сложностями контроля слоев малой толщины (порядка нескольких десятков нанометров) и оптимальным расходом исходных пленкообразующих материалов.

Кроме того, при необходимости могут применяться и другие ограничения, связанные, например, с углом падения излучения или его поляризацией.

2. Выбор материалов подложек и пленок

В работе при создании инфракрасных интерференционных фильтров с учетом совокупности требуемых физико-химических и оптических свойств, в качестве материалов подложек были выбраны монокристаллические кремний и германий.

Кремниевые подложки применялись для проектирования и изготовления фильтров, работающих в спектральном диапазоне от 2,0 до 4,5 мкм.

Монокристаллический кремний используется, прежде всего, в полупроводниковой микроэлектронике. Однако он также применяется для изготовления плоскопараллельных пластин — подложек для производства инфракрасных светофильтров, работающих в спектральном диапазоне от 2 до 5 мкм. Показатель преломления оптического кремния $n \approx 3,42$ [7] в области прозрачности. Изготовление кремния методом зонной плавки позволяет уменьшить поглощение излучения с длинами волн вблизи 9 и 16 мкм. В общем случае кремний оптического качества является слабо легированным материалом с удельным сопротивлением 5–40 Ом·см, что обеспечивает лучшую прозрачность в диапазоне выше 10 мкм. Высокоомный кремний имеет длинноволновое инфракрасное окно прозрачности в диапазоне 30–100 мкм и применяется для изготовления оптики, работающей в терагерцовом спектральном диапазоне.

Для изготовления фильтров, работающих в спектральном диапазоне от 4,5 до 20 мкм, в работе использовались подложки из монокристаллического германия.

Из оптического германия марки ГМО (германий монокристаллический оптический) изготавливают окна, пластины, линзы, призмы и зеркала для инфракрасного спектра излучения. Чаще всего оптический германий используют как материал для инфракрасной оптики в системах пассивного тепловидения, системах инфракрасного наведения и приборах ночного видения, в противопожарных системах, в картографировании и исследованиях поверхности земли со спутников. Кроме того, германий используется в оптических приборах ИК-спектроскопии.

Спектральная полоса пропускания монокристаллического оптического германия от 1,8 до 23 мкм. Благодаря прозрачности германия в диапазоне 8–14 мкм, оптика из монокристалла германия широко используется в оптических системах для тепловидения. Также из монокристаллического оптического германия изготавливают подложки для светофильтров ИК диапазона.

Монокристаллический оптический германий — оптический материал с высоким показателем преломления $n \approx 4,0\text{--}4,1$ в зависимости от длины волны излучения. Оптическое пропускание германия с ростом температуры уменьшается во всей спектральной полосе прозрачности. Для монокристалла германия ширина запрещенной зоны $E_g = 0,7$ эВ, поэтому заметное поглощение излучения с длиной волны меньшей 1,8 мкм наблюдается уже при комнатной температуре. Известно, что максимальной прозрачностью в области 2,3–14 мкм обладают монокристаллы германия n-типа проводимости с удельным сопротивлением 2–20 Ом·см.

Для реализации интерференционных покрытий в инфракрасной области спектра требуются прозрачные оптические пленки с различными коэффициентами преломления и минимальным коэффициентом поглощения в требуемой области спектра.

Оптические свойства пленок сильно зависят от способа получения слоев, от технологических режимов — температуры подложки, скорости осаждения, остаточного давления в вакуумной камере, используемых при их изготовлении пленкообразующих материалов, и отличаются от оптических констант исходных веществ. Поэтому для успешного проектирования любого оптического покрытия должны быть с достаточной степенью точности определены оптические характеристики получаемых на практике тонких пленок. Под оптическими характеристиками понимаются спектральные зависимости показателя преломления $n(\lambda)$ и показателя поглощения $k(\lambda)$. Здесь $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ являются действительной и мнимой частями комплексного показателя преломления $\tilde{n}(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda)$ соответственно.

При разработке серии инфракрасных фильтров решались задачи, связанные с созданием сложных многослойных интерференционных покрытий для работы в спектральном диапазоне от 2 до 20 мкм. В качестве пленкообразующих материалов с высоким показателем преломления в этом диапазоне использовались пленки германия [8] и теллурида свинца (PbTe) [9–11]. А в качестве пленкообразующих материалов с низким показателем преломления были использованы пленки монооксида кремния и пленки твердого раствора сульфоселенида цинка $ZnS_{0,5}Se_{0,5}$ [12].

Пленки германия широко используются при изготовлении интерференционных покрытий различного назначения в диапазоне спектра 2–20 мкм. Оптические покрытия на их основе имеют высокую механическую прочность и влагостойкость.

Из используемых на практике пленкообразующих материалов теллурид свинца позволяет формировать оптические пленки с одним из самых высоких показателей преломления. При комнатной температуре показатель преломления пленок PbTe по данным различных работ составляет от 4,9 до 5,6 на длине волны $\lambda = 8$ мкм [10, 13, 14]. Анализ большинства имеющихся публикаций, затрагивающих задачи конструирования и изготовления интерференционных фильтров для спектрального диапазона 5–20 мкм, свидетельствует о том, что альтернативы высокопреломляющим пленкам PbTe практически не существует [9].

Пленки монооксида кремния в сочетании с пленками германия образуют прочные покрытия, обладающие хорошими эксплуатационными характеристиками. Однако известно, что свойства пленок монооксида кремния сильно зависят от условий их получения [15]. При недостаточном вакууме при испарении исходного SiO происходит более глубокое окисление кремния, и конденсируется пленка состава Si_2O_3 с отличным от расчетного показателем преломления и сильным поглощением из-за сорбции воды вблизи длины волны 2,9 мкм. Без принятия специальных мер пленки SiO получаются пористыми и также обнаруживают поглощение на длине волны 2,9 мкм. Тем не менее, с применением специальных мер и при тщательном контроле условий и режимов осаждения удается получать прозрачные пленки SiO и многослойные покрытия на их основе с воспроизводимыми характеристиками.

Структурные и оптические свойства пленок твердого раствора $ZnS_{0,5}Se_{0,5}$ ранее были исследованы в работе [12]. Где для исследованных пленок в спектральном диапазоне от 2 до 25 мкм определены дисперсионные зависимости оптических констант — показателя преломления и коэффициента экстинкции. Установлено, что значение показателя преломления исследованной пленки находится между значениями показателей преломления пленок ZnS и $ZnSe$ и составляет $n=2,25$ на длине волны $\lambda=10$ мкм.

Отсутствие линий поглощения в широком рабочем диапазоне спектра позволяет успешно использовать пленки $ZnS_{0,5}Se_{0,5}$ для изготовления тонкопленочных оптических покрытий и интерференционных фильтров для ближнего и среднего инфракрасных диапазонов спектра.

3. Контроль процесса осаждения покрытий

Многослойные интерференционные покрытия, состоящие из пленок германия, диоксида кремния, теллурида свинца и твердого раствора сульфоселенида цинка изготавливались методами электроннолучевого и резистивного испарения в вакууме на вакуумных установках типа ВУ-2М. Пленки Ge получались испарением электронным лучом. Пленки SiO_2 , $PbTe$, и $ZnS_{0,5}Se_{0,5}$ были получены резистивным испарением из лодочек, изготовленных из молибденовой фольги.

Для дополнительной очистки подложек перед напылением, а также для улучшения адгезионных, оптических и механических свойств получаемых покрытий, процесс осаждения сопровождался ионным ассистированием с применением источника типа «Аида».

При контроле толщины пленки в процессе вакуумного осаждения в работе применялась методология, основанная на использовании систем спектрального контроля. Здесь уместно отметить, что в технологии оптических покрытий обычно выделяют три основных направления, а именно: проектирование интерференционных покрытий, способы получения покрытий и стратегии контроля процесса осаждения. При этом, в зависимости от достижений в области каждого из этих направлений, происходит циклическая смена приоритетов с периодом ≈ 15 лет [16].

В конечном итоге, воспроизводимость выходных характеристик получаемых оптических покрытий зависит от достижений в области каждого из этих направлений. В настоящее время, с развитием и совершенствованием оплотехники, для контроля вакуумного напыления оптических покрытий стали широко применяться так называемые спектровизоры — спектральные системы контроля (ВВОМ — broad band optical monitors) [17].

Характеристики используемой нами системы спектрального контроля IRIS 1017 приведены в таблице.

Таблица 1. Характеристики спектральной системы IRIS 1017

Наименование параметра	IRIS 1017
Спектральный диапазон, нм	950–2500
Спектральное разрешение, нм	3,6
Точность установки длины волны, нм	1,6
Фотометрические функции	% R, % T (перестановка источника излучения)
Диапазон измерения: R %, T %	0,01–120 %-шкала
Источник света	галогенная лампа
Точность измерения, не хуже, %	$<0,01 \times T$
Время измерения полного диапазона	от 10 мс,

Принцип действия используемой спектральной системы для контроля толщины осаждаемых пленок описывается следующим образом.

Излучение от осветителя на верхней стенке напылительной камеры, источником света в котором является галогеновая лампа, проходит через один из контрольных образцов, закрепленных в турели. Турель позволяет производить смену контрольных образцов без разгерметизации напылительной камеры. Далее излучение попадает в конденсер через проходное окно в нижней стенке вакуумной напылительной камеры. В конденсере излучение фокусируется на торце волоконнооптического световода и далее направляется в спектральный прибор. В спектральном приборе излучение, разложенное в спектр при отражении от вогнутой дифракционной решетки, попадает на линейный

инфракрасный охлаждаемый приемник излучения (линейка фотодиодов). Обработанный сигнал передается на персональный компьютер в виде спектральной характеристики в реальном времени.

Осаждаемый пленкообразующий материал конденсируется как на оптических деталях, закрепленных на вращающейся внутрикамерной оснастке, так и на неподвижном контрольном образце. В результате многолучевой интерференции спектр пропускания (отражения) контрольного образца трансформируется при изменении толщины пленки. Процесс осаждения слоя прерывается оператором напылительной установки в тот момент, когда спектр пленки с текущей толщиной совпадает с предварительно рассчитанным спектром пленки требуемой конечной толщины.

Применение подобного рода спектральных широкополосных систем для контроля толщины осаждаемого слоя, позволяет осаждать так называемые неравнотолщинные покрытия, т. е. покрытия, состоящие из пленок с оптической толщиной не кратной четверти длины волны.

4. Результаты изготовления и исследования фильтров

При выполнении опытно-конструкторской работы была создана серия инфракрасных интерференционных фильтров для спектрального диапазона от 2 до 20 мкм. Серия включает коротко- и длинноволновые блокирующие фильтры, а также узкополосные и полосовые фильтры. Спектральные характеристики типовых представителей разработанных фильтров представлены на рисунке 1.

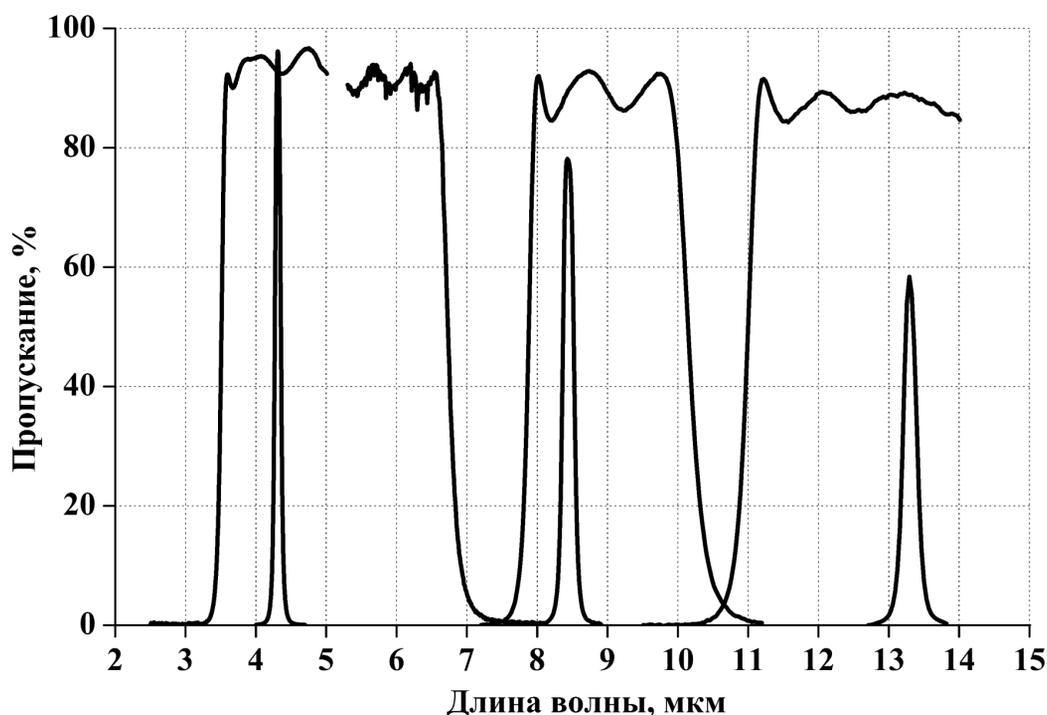


Рис. 1. Спектральные характеристики пропускания фильтров

Спектральные характеристики фильтров, приведенные на рисунке 1, были измерены на Фурье-спектрометре модели ФСМ-1201 при нормальном падении и комнатной температуре. Однако при эксплуатации фильтров несомненный практический интерес представляют угловые и температурные зависимости их спектральных характеристик.

При наклонном падении излучения спектральные характеристики фильтров сдвигаются в сторону более коротких длин волн. На рисунке 2 приведены угловые зависимости положения λ_{\max} для узкополосных фильтров, изготовленных на подложке из кремния с применением пленок Ge и SiO (спектральный диапазон 2,5–4,5 мкм) и для узкополосных фильтров на подложке из германия с применением пленок PbTe и ZnS_{0,5}Se_{0,5} (спектральный диапазон 4,5–12,0 мкм), где $\lambda_{\max\alpha}$ — при угле падения α ; $\lambda_{\max 0}$ — при нормальном падении излучения.

Температурные зависимости в интервале значений от -60 °C до 70 °C были получены с применением заливного азотного криостата модели LN-120. На рисунке 3 представлены температурные зависимости λ_{\max} тех же узкополосных фильтров, угловые характеристики которых приведены на рисунке 2, где $\lambda_{\max t}$ — при температуре t °C; $\lambda_{\max 20}$ — при температуре 20 °C.

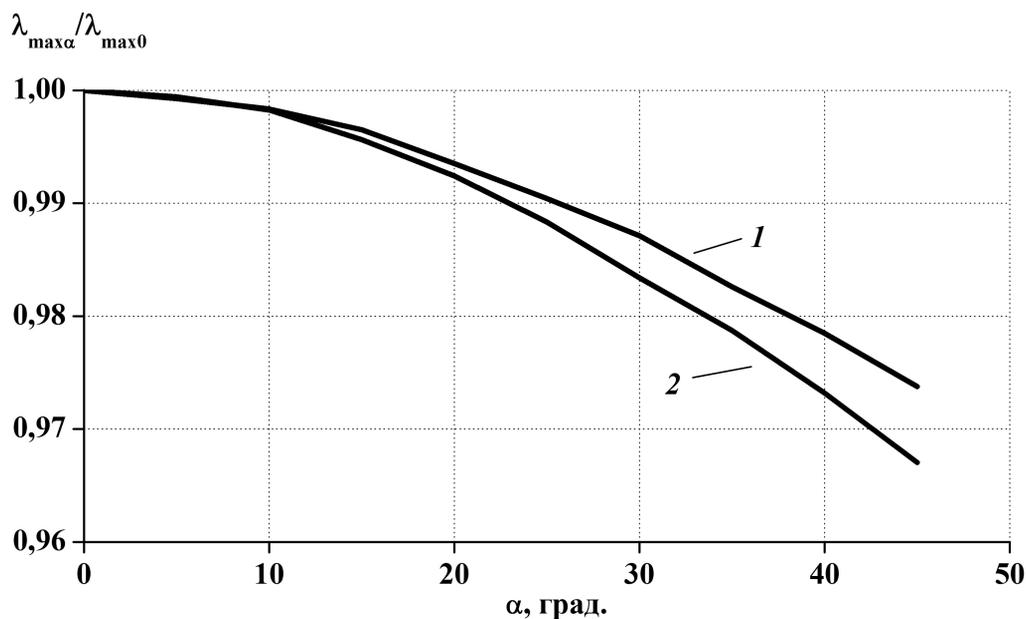


Рис. 2. Зависимость λ_{\max} от угла падения излучения для узкополосных фильтров:
1 — фильтр для спектрального диапазона 2,5–4,5 мкм; 2 — фильтр для спектрального диапазона 4,5–12,0 мкм

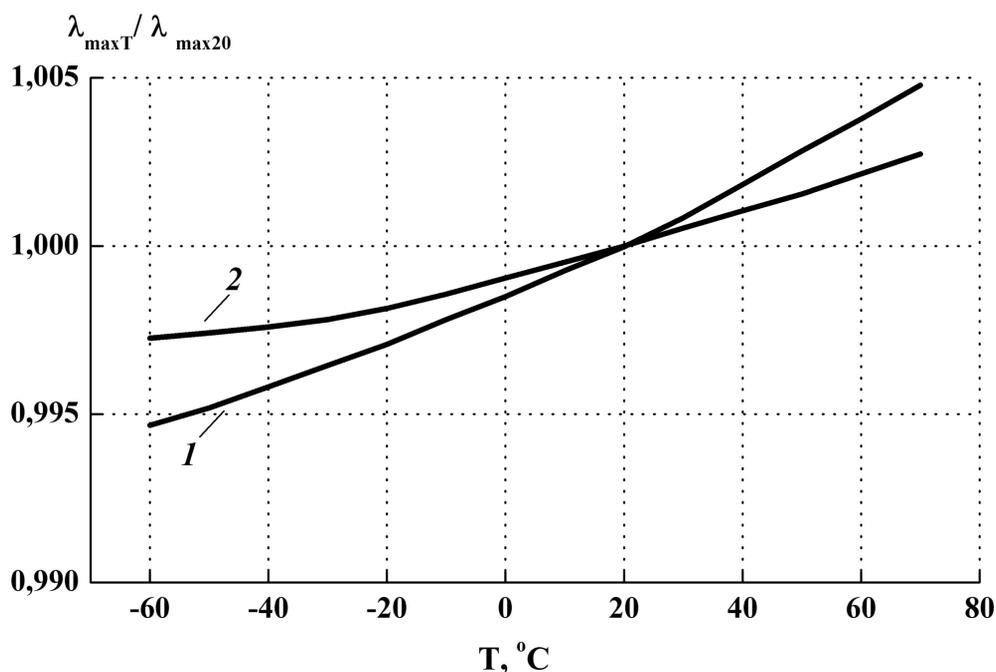


Рис. 3. Зависимость λ_{\max} от температуры для узкополосных фильтров:
1 — фильтр для спектрального диапазона 2,5–4,5 мкм; 2 — фильтр для спектрального диапазона 4,5–12,0 мкм

Фильтры разработаны и выпускаются в следующих конструктивных исполнениях:

- подложка квадратной формы с размером стороны от 2,5 до 50 мм, с двух сторон которой способом осаждения в вакууме нанесены многослойные тонкопленочные оптические покрытия;
- подложка круглой формы диаметром от 5 до 80 мм и толщиной от 0,35 до 15 мм, с двух сторон которой методом осаждения в вакууме нанесены многослойные тонкопленочные оптические покрытия;
- собранные в круглые оправы диаметром от 12,7 до 25,4 мм две или три подложки круглой формы, на каждой из двух сторон которых способом осаждения в вакууме нанесены многослойные тонкопленочные оптические покрытия.

Заключение

Представлены результаты разработки, изготовления и исследования серии инфракрасных интерференционных фильтров, предназначенных для выделения требуемого спектрального диапазона в интервале длин волн от 2 до 20 мкм и комплектации в качестве встроенных элементов оптической и оптико-электронной аппаратуры, инфракрасных оптоэлектронных компонентов.

Фильтры могут быть использованы в:

- оптических и оптико-электронных приборах и системах инфракрасной термометрии и тепловидения;
- инфракрасных абсорбционных газоаналитических системах для детектирования горючих углеводородов, фреонов, элегаза (SF_6) и других технологических газов и газов-загрязнителей атмосферы, регистрируемых методами NDIR–спектроскопии в диапазоне спектра 3–15 мкм;
- приборах и системах обеспечения пожаро- и взрывобезопасности;
- в конструкции инфракрасных оптоэлектронных компонентов — приемников и источников оптического излучения;
- в других современных приложениях фотоники.

На предприятии АО «НИИ «Гириконд» (Санкт-Петербург) освоено серийное производство фильтров. Фильтры выпускаются в соответствии с требованиями технических условий [18].

Благодарность

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам лаборатории электронных компонентов для инфракрасной техники АО «НИИ «Гириконд» Е. А. Наумовой, В. Б. Шалину и И. Д. Троянову за выполнение комплекса работ по изготовлению опытных образцов фильтров и измерению их параметров и характеристик.

Список источников

- [1] **Гайнутдинов, И. С.** Интерференционные покрытия для оптического приборостроения / И. С. Гайнутдинов, Е. А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин. — Казань: ФЭН, 2002. — 592 с.
- [2] **Путилин, Э.С.** Оптические покрытия: Учебник / Э. С. Путилин, Л. А. Губанова. — Спб.: Издательство «Лань», 2016. — 268 с.
- [3] **Willey, R. R.** Practical Design of Optical Thin Films. Second Edition / R. R. Willey. — Charlevoix: Willey Optical, Consultants, 2007. — 248 p.
- [4] **Furman, Sh. A.** Basics of Optics of Multilayer Systems / Sh. A. Furman, A.V. Tikhonravov. — Gif-sur-Yvette: Frontieres, 1992. — 242 p.
- [5] **Тропин, А. Н.** Предпроизводственный анализ в технологии тонкопленочных оптических покрытий / А. Н. Тропин // Научное приборостроение. — 2017. — Том 27. — № 2. — С. 41–46.
- [6] **Tikhonravov, A. V.** Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings / A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, G. W. DeBell // Applied Optics. — 1996. — Vol 35. — № 28. — P. 5493–5508.
- [7] **Edwards, D. F.** Infrared refractive index of silicon / D. F. Edwards, Ellen Ochoa // Applied Optics. — 1980. — Vol. 19. — № 24. — P. 4130–4131.
- [8] **Котликов, Е. Н.** Исследование оптических свойств пленок германия в средней ИК области спектра / Е. Н. Котликов, В. А. Иванов, В. Н. Прокашев, А. Н. Тропин // Оптика и спектроскопия. — 2010. — Том 108. — № 6. — С. 1003–1006.
- [9] **Тропин, А. Н.** Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор) / А. Н. Тропин // Успехи прикладной физики. — 2016. — Том 4. — № 2. — С. 206–211.
- [10] **Kotlikov, E. N.** Film's forming materials for THz Spectral Range Purposes / E. N. Kotlikov, V. A. Ivanov, A. N. Tropin // Progress In Electromagnetics Research Symposium PIERS 2010 in Cambridge. USA. Draft abstracts. — 2010. — P. 88.
- [11] **Hawkins, G.** Mid-infrared filters for astronomical and remote sensing instrumentation / G. Hawkins, R. Sherwood, K. Djotni // Advances in Optical Thin Films III. Proc. of SPIE. — 2008. — Vol 7101. — P. 710114-1–710114-15.
- [12] **Котликов, Е. Н.** Оптические и структурные свойства пленок $\text{ZnS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ и интерференционные фильтры на их основе / Е.Н. Котликов, А.Н. Тропин // Оптический журнал. — 2020. — Том 87. — № 1 — С. 56–61.
- [13] **Zhan, K. Q.** Optical and semiconductor properties of lead telluride coatings / K. Q. Zhan, J. S. Seeley, R. Hunneman, G. J. Hawkins // Thin Films in Optics SPIE. — 1989. — Vol 1112. — P. 45–52.
- [14] **Котликов, Е.Н.** Исследование оптических констант пленок из теллуридов свинца и германия / Е. Н. Котликов, В. А. Иванов, В. Г. Погарева, Е. В. Хонинева // Оптика и спектроскопия — 2000. — Т. 88. — № 5. — С. 795–797.
- [15] **Hass, G.** Optical Properties of Silicon Monoxide in the Wavelength Region from 0.24 to 14.0 Microns / G. Hass, C. D. Salzberg // Applied Optics. — 1954. — Vol 44. — Issue 3. — P. 181–187.
- [16] **Thelen, A.** Milestones in optical coating technology: from A. Smakula / John Strong until today / A. Thelen // Proc. SPIE. Advances in Optical Thin Films II. — 2005. — Vol 5963. — P. 596301-1 596301-5.

- [17] **Vidal, B.** Wideband optical monitoring of nonquarterwave multilayer filters / B. Vidal, A. Fournier, E. Pelletier // Applied Optics. — 1979— Vol 18. — P. 3851–3856.
- [18] Фильтры оптические вакуумного напыления ФОИ-1. Технические условия ТЦАФ.755410.001 ТУ.

Development, production and research of infrared optical interferential filters for 2 -20 microns spectral range

A. N. Tropin, N. E. Tropina

GIRICOND scientific research institute, Saint Petersburg, Russia

The results of the development of a series of infrared interference filters for the spectral range from 2 to 20 microns are presented. The features of the design and manufacture of short- and long-pass, narrowband and bandpass filters are described. The temperature and angular dependences of the spectral transmission spectra of filters have been studied. The possibilities of using the developed filters in optical sensors for fire and explosion safety devices, NDIR sensors for infrared gas analyzers and in other modern photonics applications have been demonstrated.

Keywords: *Thin films, Interferential, Multilayer coating, Spectra, Vacuum technologies*

Конфокальная лазерная микроскопия субдифракционной структуры изобразительных голограмм

Л. Н. Бородина, Е. В. Рабош, М. А. Вольнский, Н. В. Петров, А. В. Вениаминов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Впервые с помощью лазерной сканирующей микроскопии расширения образца визуализирована субдифракционная внутренняя структура изобразительных голограмм, записанных в галогенидосеребряных пластинках «Славич». Для получения изображений эмульсия с голограммой подвергалась набуханию в иммерсионной среде для микроскопии. Изображения были получены с помощью 3D-сканирования в отраженном свете. За счет набухания эмульсии пространственный период отражательной голограммы становится разрешимым с помощью дифракционно-ограниченной оптики и визуализируется объемная архитектура голограммы.

Ключевые слова: Объемная отражательная голограмма, Конфокальная лазерная сканирующая микроскопия, Микроскопия расширения, Галогенидосеребряные материалы

В связи со стремительным развитием информационных и оптических технологий для создания и применения голограммных оптических элементов (ГОЭ) в системах дополненной и расширенной реальности (augmented reality, extended reality, AR- и XR-технологии) актуальны исследования микроструктуры используемых материалов. К таким испытаниям относятся анализ структуры с помощью современных методов оптико-физической диагностики, количественная оценка параметров ГОЭ, восстановление и визуализация объемных изображений. Из полученных данных извлекается информация о стабильности дифракционных волноводов и дифракционной структуры голограмм, например, в работе [1] сообщается об исследованиях устойчивости волноводов к воздействию ближнего УФ-излучения. Улучшение производительности и стабильности ГОЭ является активной областью исследований [2].

Поскольку разработка и изготовление дифракционно-оптических элементов в области фотоники активно затрагивает изготовление отражательных голограмм (например, такие голограммы составляют основу узкополосных голографических элементов, таких как спектральные фильтры для лазерной локации и спектроскопии), задача сохранения свойств, обеспечения стабильности и функциональности микроструктуры самих отражательных голограмм также востребована. Изобразительные голограммы также, как правило, являются отражательными. Как известно, с помощью техники изобразительной голографии можно сохранять объекты культурного наследия в виде точных оптических копий [3, 4]. Мало того, некоторые ряд художественные голограммы сами были признаны объектами культурного наследия. Однако в отсутствие каких-либо методов диагностики голографического изображения было обнаружено, что ценные голограммы деградируют при длительном воздействии света и при хранении голограмм в условиях несоблюдения правильного температурного режима [5]. Разработка нового микроскопического подхода визуализации структуры голограммы, который позволит сохранить и полностью восстановить ее, является очень многообещающим решением обозначенной ранее проблемы. Важно также отметить, что из-за разрушения голограмм многие копии объектов культурного наследия были потеряны для человечества безвозвратно.

Визуализация и исследование структуры отражательных голограмм во многом отличается от визуализации и изучения структуры пропускающих голограмм с пространственными периодами в несколько микрометров и более. Малый (130–170 нм) пространственный период отражательных голограмм препятствует разрешению соседних интерференционных полос (изофазных поверхностей) оптическими методами. Применение электронной и атомно-силовой микроскопий, обладающих гораздо более высоким пространственным разрешением, также затруднено вследствие экранирования приповерхностными изофазными поверхностями других поверхностей, которые расположены в толще голографического эмульсионного материала. Для считывания микроструктуры отражательной голограммы ранее были применены такие приемы, как, например, микроскопия поперечных срезов [6] или оптических срезов под острым углом к изофазным поверхностям, наблюдаемая на которых периодическая структура имела увеличенный эффективный пространственный период, доступный для оптической микроскопии [7]. В основном, эти методы применимы к модельным объектам типа решетки или голограммы зеркала и не позволяют судить о локальных особенностях структуры голограммы объектов произвольных и сложных форм.

В 2015 г. был предложен оригинальный в своей концептуальной простоте подход к повышению пространственного разрешения оптической микроскопии, основанный на растяжении объекта съем-

ки (expansion microscopy) [8–10]. Он находит все более широкое применение в микробиологии, но представляется перспективным и для проникновения средствами оптической (конфокальной лазерной) микроскопии в микроструктуру такого искусственного объекта, как изобразительная голограмма. Детальное изучение дифракционной структуры голограммы на микроскопическом уровне позволит точно понять особенности процессов формирования, изменения, разрушения и деградации голограммы.

Метод основан на объемном расширении, сопровождающемся увеличением пространственного периода голограммы из-за набухания эмульсии в различных проникающих жидкостях, таких как иммерсионное масло. Отражательная голограмма была записана в монохромном когерентном свете с $\lambda = 640$ нм. После химической постобработки голограммы на середину образца (незащищенный слой фоточувствительного материала ПФГ-03М) наносилось иммерсионное масло, вся остальная поверхность эмульсии не была затронута. Затем путем построения 3D-изображения структуры из отдельных оптических срезов, записанных в отраженном свете диодного лазера с длиной волны 405 нм (рис. 1). Морфология голограммы была изучена на различных стадиях набухания с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LSM 710 (Zeiss, Германия). Видно, что спустя несколько дней с помощью расширения исследуемого слоя субдифракционная структура проявляется, однако из-за сильного поглощения света виден только приповерхностный слой.

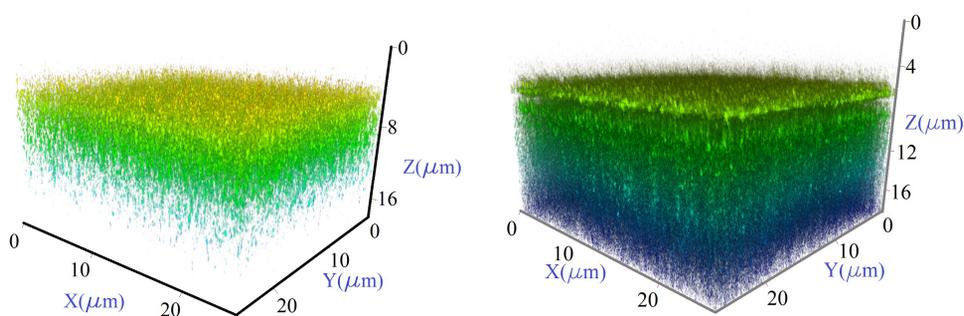


Рис. 1. 3D-изображения отражательной голограммы: слева — изображение субдифракционной структуры сразу после нанесения иммерсии на эмульсионный слой, справа — через 4 дня. Цвета срезов определены ПО при обработке изображений и соответствуют осевым координатам

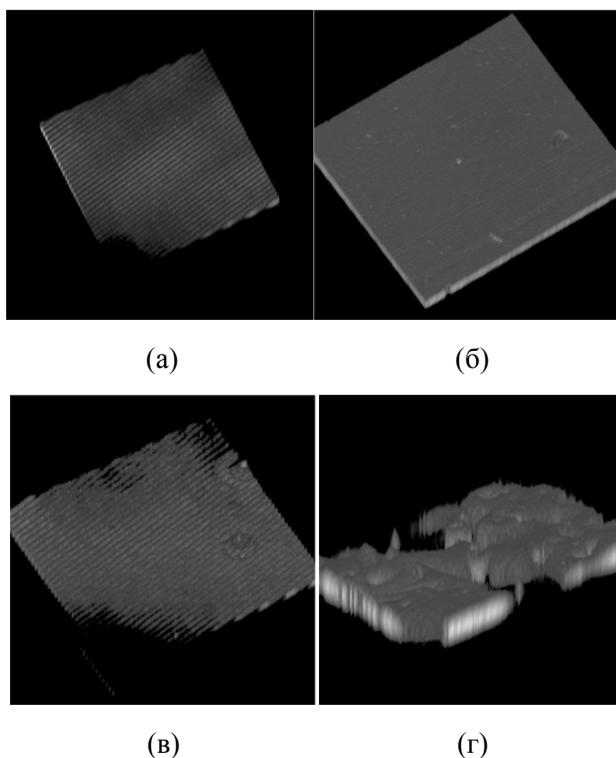


Рис. 2. Томограммы двух участков одной голограммы, полученные в результате сканирования на двух установках (интерферометр МИИ-4 (а) и (в), модифицированный микроинтерферометр (б) и (г)). Томограммы (а) и (б) получены при сканировании сухого участка, (в) и (г) получены вблизи иммерсии

Дополнительно дифракционная структура была визуализирована с помощью корреляционной оптической когерентной томографии (ОКТ, time-domain OCT, [11]) — среди методов томографии ОКТ позволяет получать изображения структуры с наибольшим пространственным разрешением. Для сканирования образца были использованы две установки: интерферометр МИИ-4 (на базе оптической схемы микроинтерферометра Линника, регистрация видеокадров при перемещении по глубине, изотропное разрешение: ~ 1 мкм, поле зрения: $\sim 0,2$ мм²), вторая — система корреляционной ОКТ, основанная на модифицированном микроинтерферометре Линника (разрешающая способность по глубине (в воздухе) — $7,3$ мкм, глубина сканирования — до 1 мм, скорость визуализации — 8 гигапикселей/с, источник излучения на длине волны $\lambda = 668$ нм). Образец голограммы сканировался в двух участках — в области нанесенной иммерсии на эмульсионный слой и чистый участок образца. Результаты представлены на рисунке 2. С помощью полученных томограмм возможно восстановить объемную микроструктуру исследуемой голограммы и выявлять локальные изменения в дифракционной структуре голограммы.

Заключение

Новый метод лазерной сканирующей микроскопии, основанный на физическом расширении объекта исследования, применен для визуализации и исследования фоточувствительного эмульсионного слоя для получения сверхразрешения и визуализации микроструктуры отражательной голограммы, записанной в высокоразрешающем галогенидосеребряном материале. Получены микроскопические изображения дифракционной структуры голограмм в результате применения предложенного метода и томограммы по методу оптической когерентной томографии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Tadros, N. J.** UV stable high-refractive index nanocomposites for extended reality (XR) / N. J. Tadros, P. Guschl, G. McClintock, Z. S. Gonen-Williams // *Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR) IV.* — SPIE/ — 2023. — Vol 12449. — С. 53–60.
- [2] **Kim, N.** Holographic optical elements and application / N. Kim, Y. L. Piao, H. Y. Wu // *Holographic Materials and Optical Systems.* — 2017. — Vol 5. — С. 99–131.
- [3] **Rabosh, E. V.** Analog-to-digital conversion of information archived in display holograms: I. discussion / E. V. Rabosh, N. S. Balbekin, N. V. Petrov // *JOSA A.* — 2023. — Vol 40. — №. 4. — С. B47-B56.
- [4] **Sarakinos, A., Lembessis A.** Color holography for the documentation and dissemination of cultural heritage: Optoclones™ from four museums in two countries / A. Sarakinos, A. Lembessis // *Journal of Imaging.* — 2019. — Vol 5. — № 6. — С. 59.
- [5] **Rabosh, E. V.** Quality control of the diffraction structure of display reflection holograms / E. V. Rabosh, N. S. Balbekin, O. V. Andreeva, N. V. Petrov // *Journal of Optical Technology.* — 2024. — Vol 90. — № 10. — P. 582–589.
- [6] **Ingwall, R. T.** Properties of reflection holograms recorded in Polaroid's DMP-128 photopolymer / R. T. Ingwall, M. Troll, W. T. Vetterling // *Practical Holography II.* — SPIE. — 1987. — Vol 747. — С. 67–73.
- [7] **Sabel T.** Imaging of volume phase gratings in a photosensitive polymer, recorded in transmission and reflection geometry / T. Sabel, M. Zschocher // *Applied Sciences.* — 2014. — Vol 4. — № 1. — С. 19–27.
- [8] **Wen, G.** Current Progress in Expansion Microscopy: Chemical Strategies and Applications / G. Wen V. Leen, T. Rohand, M. Sauer, J. Hofkens // *Chem. Rev.* — 2023. — Vol 123. P. 3299–3323.
- [9] **Halpern, A. R.** Hybrid Structured Illumination Expansion Microscopy Reveals Microbial Cytoskeleton Organization / A. R. Halpern, G. C. Alas, T. J. Chozinski, A. R. Paredez, J. C. Vaughan // *ACS Nano.* — 2017. — Vol 11. P. 12677–12686.
- [10] **Wassie, A. T.** Boyden Expansion microscopy: principles and uses in biological research / A. T. Wassie, Zh. Yongxin // *Nature Methods.* — 2019. — Vol 16. — P. 33–41
- [11] **Volynsky, M. A.** Condition diagnosing easel tempera paintings by the high-resolution optical coherence tomography method / M. A. Volynsky, E. S. Gladkova, I. P. Gurov, E. V. Zhukova, N. B. Margaryants, S. V. Sirro, P. S. Skakov // *Journal of Optical Technology.* — 2021. — Vol 88. — № 8. — P. 435–440.

Confocal laser microscopy of a display hologram subdiffraction structure

L. N. Borodina¹, E. V. Rabosh¹, M. A. Volynsky¹, N. V. Petrov¹, A. V. Veniaminov¹

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

For the first time, using laser scanning microscopy of sample expansion, the subdiffraction internal structure of display holograms recorded in Slavich silver halide plates was visualized. To obtain images, the hologram emulsion was swollen in a microscopy immersion environment. The images were obtained using 3D reflected light scanning. Due to the swelling of the emulsion, the spatial period of the reflection hologram becomes resolvable using diffraction-limited optics and the volumetric architecture of the hologram is visualized.

Keywords: Volume reflection hologram, Confocal laser scanning microscopy, Extension microscopy, Silver halide materials

Голографическая релаксометрия и восстановление люминесценции наночастиц

Л. Н. Бородина¹, Т. О. Осколкова¹, И. А. Арефина¹, А. Ю. Дубовик¹, А. В. Вениаминов¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Методы голографической релаксометрии и восстановления люминесценции после фотообесцвечивания, создание в исследуемом объекте оптической неоднородности и наблюдение за ее изменением, применены к изучению диффузии углеродных точек в коллоидных растворах. Первый из методов основан на отслеживании дифракции света на периодических структурах, записанных голографическим способом в объеме исследуемых объектов, второй — на отслеживании пространственного профиля интенсивности люминесценции средствами лазерной микроскопии. Оба метода указывают на изменение локальной диффузионной подвижности наночастиц под действием света. В совокупности они позволяют судить об изменении как оптических свойств и размеров наночастиц, так и окружающей их среды.

Ключевые слова: Диффузия, Люминесценция, Углеродные точки, Восстановление флуоресценции после фотообесцвечивания, Релаксация фотоиндуцированной решетки

Люминесцирующие наноструктуры активно используются в различных приложениях нанофотоники, оптоэлектроники, в том числе в лазерных технологиях, фотовольтаике, материаловедении, сенсорных приложениях, катализе и биомедицине. Для определения размера наночастиц чаще всего используют сканирующую электронную микроскопию или методы, основанные на исследовании их подвижности: метод динамического рассеяния света (фотонной корреляционной спектроскопии), флуоресцентная корреляционная микроскопия и даже прямое наблюдение и анализ траектории движения частиц. При этом основанные на наблюдении фотоиндуцированной пространственной неоднородности методы восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания [1] и голографической релаксометрии (релаксации голографических решеток, вынужденного рэлеевского рассеяния) [2] к наночастицам почти не применялись до настоящего времени. Однако именно такие подходы могут снабдить исследователей информацией не только о гидродинамических размерах частиц, но и об изменении их оптических и диффузионных свойств, следовательно и размеров, под действием фотохимически активного излучения.

Детальное знание о микроскопической подвижности молекул и наночастиц, получаемое на основе формирования и наблюдения концентрационных и связанных с ними оптических неоднородностей, дает важную информацию не только о размере наночастиц и локальной вязкости их окружения, но и о фототрансформациях наночастиц с изменением их диффузионных и оптических свойств, а также дает возможность создавать эффективные объемные дифракционные элементы для систем дополненной реальности, лазеров с распределенной обратной связью и люминесцентных сенсоров.

1. Люминесцентный микроскопический метод исследования диффузии наночастиц

Суть метода Stripe-FRAP (Stripe Fluorescence Recovery After Photobleaching, восстановление флуоресценции после фотообесцвечивания), реализованного на базе лазерного сканирующего микроскопа, заключается в создании фотоиндуцированной пространственной неоднородности интенсивности люминесценции в виде полосы с последующим анализом изменений ее профиля, который, как правило, аппроксимируется гауссовой функцией. Коэффициент диффузии определяется из наклона зависимости квадрата ширины профиля от времени, а гидродинамический размер частиц может быть определен с использованием формулы Стокса-Эйнштейна. Общая схема эксперимента Stripe-FRAP показана на рисунке 1.

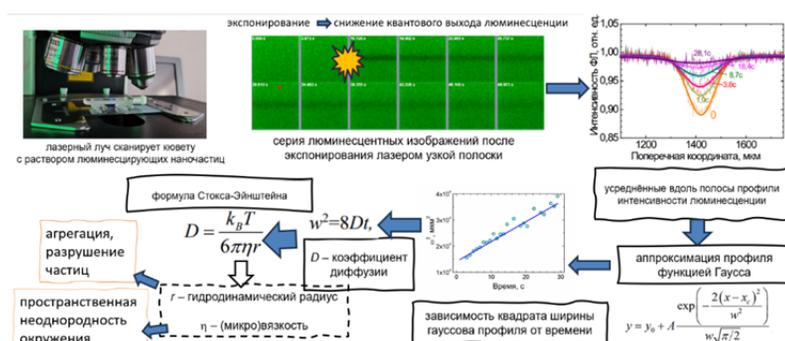


Рис. 1. Схема эксперимента Stripe-FRAP с описанием процесса эксперимента и обработкой результатов

Метод Stripe-FRAP направлен, в первую очередь, на изучение диффузии и дрейфа наночастиц в коллоидных растворах.

2. Основные принципы голографической релаксометрии

Суть метода голографической релаксометрии (рис. 2) состоит в голографической записи фотоиндуцированной решетки в исследуемом объекте и анализе изменения ее дифракционной эффективности, по скорости которого можно судить о коэффициенте диффузии; к наночастицам такой подход применяется очень редко.

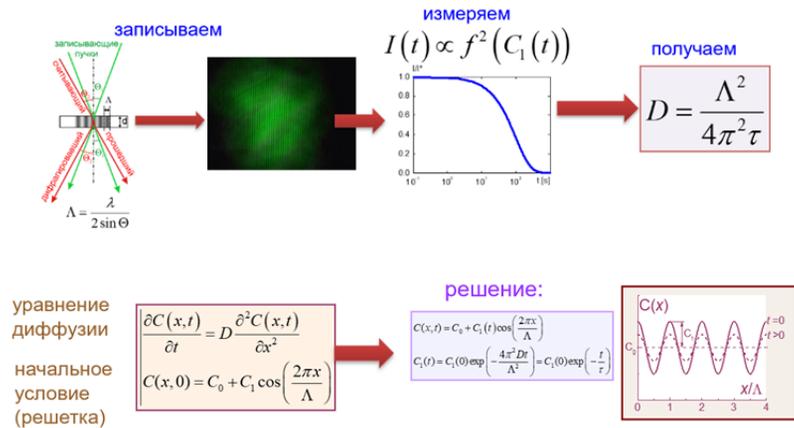


Рис. 2. Общая схема эксперимента по голографической релаксометрии с описанием процесса эксперимента и обработкой результатов

В общем случае для описания динамики дифракционного отклика фотоиндуцированной решетки используется комбинация двух экспоненциальных функций, одна из которых отвечает диффузии частиц в исходном состоянии, а другая — в фототрансформированном. В результате анализа кинетики релаксации решеток с различными пространственными периодами определяют значения коэффициентов диффузии исходного вещества и его фотопродукта.

3. Микроскопия фототрансформации углеродных точек

Углеродные точки (УТ) — новый класс люминесцирующих наночастиц на основе углерода, перспективных для применения в биомедицинских, сенсорных, фотоэлектрических, информационных приложениях благодаря доступному синтезу, биосовместимости, эффективной люминесценции в широкой спектральной области.

В ходе исследования коллоидного раствора УТ в карбоксиэтилакрилате с применением техники Stripe-FRAP вместо обычного расширяющегося с течением времени гауссова контура наблюдались профили ФЛ более сложной формы (рис. 3).

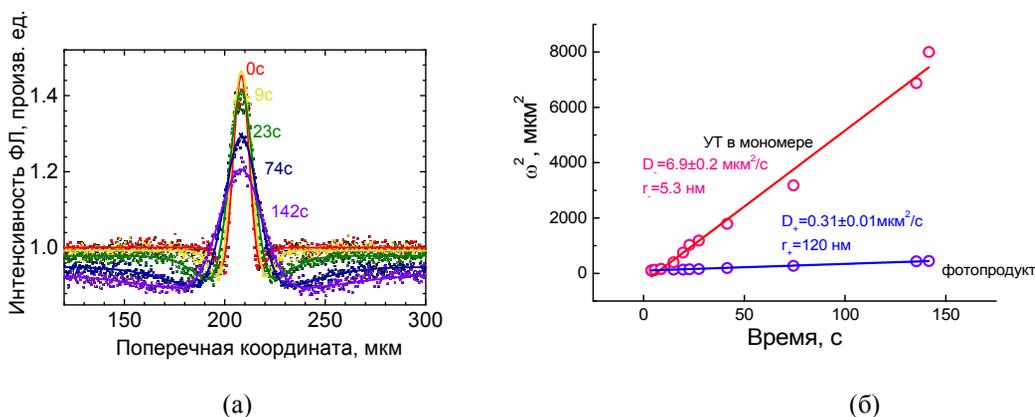


Рис. 3. Поперечные профили интенсивности ФЛ (а) и соответствующие им зависимость квадрата ширины гауссовых контуров от времени (б) исходной и фототрансформированной форм УТ

Для их корректного описания наряду с изменением квантового выхода ФЛ следует учесть изменения диффузионных свойств наночастиц и вместо функции Гаусса использовать разностью двух таких функций с общим центром, одна из которых отвечает распределению люминесцирующих частиц о исходном состоянии A , а другая — в фототрансформированном B . Ширина гауссовых профилей может меняться с разной скоростью, определяемой коэффициентами диффузии двух форм $D_{A,B}$.

$$I(x,t) = I_0 + B \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{4D_B t}\right)}{2\sqrt{\pi D_B t}} - A \frac{\exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{4D_A t}\right)}{2\sqrt{\pi D_A t}}$$

Анализ экспериментальных данных указывает на то, что при экспонировании происходит трансформация УТ, сопровождающаяся одновременным изменением коэффициента диффузии и квантового выхода их ФЛ: в экспонированной полосе увеличивается квантовый выход ФЛ и снижается коэффициент диффузии УТ, вероятно вследствие локальной полимеризации мономера. Рассчитанные по данным эксперимента коэффициенты диффузии УТ в неэкспонированной и экспонированной областях составили 7 и 0,3 мкм²с⁻¹, меньший из которых соответствует гидродинамическому размеру УТ 5 нм.

4. Голографическая релаксометрия люминесцирующих углеродных наноструктур

Метод голографической релаксометрии впервые применен к коллоидному раствору УТ в 2-карбокситилакрилате. Коллоидный раствор, заключенный между предметным и покровным стеклами, подвергся экспонированию картиной интерференции двух плоских волн излучения диодного лазера с длиной волны 405 нм, пересекающихся под углом 80°, что соответствует пространственному периоду 35 мкм. Далее наблюдалось изменение интенсивности света, дифрагирующего на фотоиндуцированной решетке.

Экспоненциальная аппроксимация результатов измерений приводит к характерному времени релаксации 1,0±0,3 с, однако более точной представляется аппроксимация квадратом суммы двух экспонент с характерными временами 0,4±0,2 и 80±30 с, что соответствует коэффициентам диффузии 30 и 0,4 мкм²с⁻¹. Медленная составляющая близка к результату люминесцентных измерений, а быстрая отвечает гидродинамическому радиусу 1,2±0,4 нм, который меньше полученного из люминесцентных измерений, но близок к характерным гидродинамическим размерам молекулярных образований, люминесценция которых проявляется в некоторых опытах с УТ.

Заключение

Методы голографической релаксометрии и восстановления люминесценции после фотообесцвечивания были использованы в работе для описания свойств диффундирующих наночастиц — углеродных точек в исходном и экспонированном состояниях.

Традиционная модель, используемая для описания восстановления люминесценции после фотообесцвечивания, в ряде экспериментальных случаев не соответствует наблюдаемой форме профиля люминесценции УТ. Описание такой ситуации включает представление о том, что лазерное воздействие изменяет не только квантовый выход люминесценции, но и коэффициент диффузии наночастиц. В результате метод восстановления флуоресценции получил возможность давать информацию о фотоиндуцированном изменении подвижности наночастиц, следовательно, изменении их размеров, взаимодействия с окружением, или локальной микровязкости этого окружения.

Голографическое релаксационное исследование также выявило двухстадийную релаксацию фотоиндуцированной структуры, характеристики которой отчасти отличны от полученных в люминесцентных исследованиях. Это может быть следствием проявления различных компонент сложных частиц в экспериментах, адресующихся к люминесцентным и рефрактивным свойствам.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Schärtl, W.** Forced Rayleigh Scattering – Principles and Application (Self Diffusion of Spherical Nanoparticles and Copolymer Micelles) / W. Schärtl // Soft Matter Characterization. Springer. — 2008. — P. 677.
- [2] **Russo, P. S.** et al. Fluorescence photobleaching recovery / P. S. Russo, et al. // Soft Matter Characterization. Springer, 2008. — P. 605.

Holographic relaxometry and luminescence recovery of nanoparticles

L. N. Borodina¹, T. O. Oskolkova¹, I. A. Arefina¹, A. Dubavik¹, A.V. Veniaminov¹

¹ ITMO University, St. Petersburg, Russia

Holographic relaxometry and luminescence recovery after photobleaching techniques based on monitoring optical inhomogeneity photoinduced in the object under study, are applied to the diffusion of carbon dots in colloidal solutions. The first approach utilizes diffraction of light on periodic structures recorded in the volume of the object, the second one uses tracking of luminescence spatial profile by means of laser scanning microscopy. Both methods indicate changes in the local diffusion mobility of nanoparticles under the influence of light and make it possible to consider changes in both optical properties and sizes of nanoparticles.

Keywords: Diffusion, Luminescence, Carbon dots, Fluorescence recovery after photobleaching, Photoinduced grating relaxation

Результаты ускоренных испытаний на сохраняемость линз с реставрированными асферическими рабочими поверхностями

А. В. Лукин¹, А. Н. Мельников¹, Е. Г. Лисова¹, Н. А. Гурин^{2,3}, А. А. Свистунова²

¹Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия;

²Акционерное общество «Новосибирский приборостроительный завод», Новосибирск, Россия;

³Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия

В докладе обсуждаются результаты ускоренных испытаний на сохраняемость линз с реставрированными оптическими рабочими поверхностями, в том числе сравнительных измерений фокусного расстояния и модуля оптической передаточной функции окуляров со штатной линзой и реставрированной линзой. При этом реставрация поверхностей выполнена при помощи метода прецизионного реплицирования на основе использования малоусадочной полимерной композиции холодного отверждения.

Ключевые слова: Метод прецизионного реплицирования, Малоусадочная полимерная композиция холодного отверждения, Реставрированная оптическая поверхность, Ускоренные испытания на сохраняемость, Модуль оптической передаточной функции окуляра

В качестве продолжения ранее выполненных работ по методам прецизионного реплицирования оптических поверхностей и применению этих методов в части реставрации поверхностей серийно изготавливаемых оптических деталей, отбракованных по форме, чистоте и уровню шероховатости их рабочих поверхностей [1–4], возникла необходимость оценить функциональную стабильность линз с реставрированными поверхностями путем проведения ускоренных испытаний их на сохраняемость.

Следует напомнить, что изначально [3] одна из линз с реставрированной асферической рабочей поверхностью, на которую было также нанесено просветляющее покрытие, была подвергнута комплексным испытаниям в соответствии с требованиями [5]. Это образец № 1 стеклянной линзы световым диаметром 39 мм и парааксиальным фокусным расстоянием 39,3 мм на средней длине волны 550 нм, у которого восстановлена асферическая рабочая поверхность (из брака по форме) путем нанесения тонкого полимерного слоя методом прецизионного реплицирования с применением точной асферической мастер-матрицы; восстановление этого образца линзы и нанесение просветляющего покрытия осуществлены на технологическом оборудовании АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики». В ходе проведения испытаний периодически осматривался его внешний вид на предмет возможного нарушения покрытия и (или) отвержденного полимерного слоя. Затем после выполнения всего комплекса испытаний были проконтролированы основные оптические параметры этого образца, в том числе класс чистоты рабочих поверхностей [6], коэффициент пропускания вдоль оптической оси на длине волны $\lambda_{cp} = (550 \pm 20)$ нм, а также измерены фокусное расстояние (на длине волны $\lambda_{изм} = 750$ нм) и модуль оптической передаточной функции (ОПФ) в спектральном диапазоне 600–900 нм при установке этого образца № 1 линзы в корпус окуляра в сравнении с окуляром, в котором была установлена штатная стеклянная линза. Назначенный в технической документации допуск на модуль ОПФ окуляра — контраст должен быть не менее 0,29 на пространственной частоте 20 мм^{-1} . Измерения показали, что модуль ОПФ окуляра с испытуемым образцом № 1 линзы соответствует заданному допуску: получено усредненное значение контраста 0,355 на пространственной частоте 20 мм^{-1} . Испытания и измерения выполнялись на испытательном и контрольно-измерительном оборудовании АО «Новосибирский приборостроительный завод» (АО «НПЗ»).

Этот же образец № 1 линзы был использован для проведения ускоренных испытаний на сохраняемость, которые выполнялись также на испытательном оборудовании АО «НПЗ» в течение 10 месяцев, что эквивалентно 10 годам хранения. Регулярно, по окончании каждого месяца проводимых ускоренных испытаний, осуществлялся контроль класса чистоты рабочих поверхностей образца № 1 линзы и осмотр его внешнего вида на предмет выявления возможного повреждения покрытия и (или) отвержденного полимерного слоя. Результаты испытаний показали, что класс чистоты рабочих поверхностей не изменился в сравнении с исходным значением, а внешний вид образца № 1 линзы соответствует заданным требованиям на покрытия, повреждения отсутствуют.

По завершении ускоренных испытаний на сохраняемость образец № 1 линзы в составе окуляра был подвергнут следующим сравнительным измерениям, выполненным с применением контрольно-измерительного оборудования АО «НПЗ»:

– фокусного расстояния f' , мм, на длине волны измерения $\lambda_{\text{изм}} = 750$ нм в сравнении с серийно изготовленным окуляром, при этом погрешность измерения фокусного расстояния окуляра составляет $\pm 0,5$ %; получены следующие результаты: для серийно изготовленного окуляра $f' = 108,89$ мм, для окуляра с образцом № 1 линзы $f' = 108,86$ мм (это значение находится в поле допуска на фокусное расстояние согласно технической документации);

– модуля ОПФ (в меридиональной и сагиттальной плоскостях сечений) при установке его в окуляр в сравнении с модулем ОПФ серийно изготовленного окуляра (табл.), при этом погрешность измерений модуля ОПФ окуляров составляет ± 2 %, а повторяемость измерений равна ± 1 %.

Таблица. Результаты сравнительных измерений модуля ОПФ окуляров (измерения выполнены для «точки на оси» в диапазоне длин волн 600–900 нм)

№ п/п	Пространственная частота, мм^{-1}	Наименование плоскости сечения	Среднее значение модуля ОПФ, отн. ед.	
			Серийно изготовленный окуляр со штатной стеклянной линзой	Окуляр с образцом № 1 линзы с реставрированной асферической рабочей поверхностью
1	10	Меридиональная	0,671	0,574
		Сагиттальная	0,670	0,572
2	20	Меридиональная	0,337	0,486
		Сагиттальная	0,339	0,483
3	30	Меридиональная	0,200	0,310
		Сагиттальная	0,204	0,300
4	40	Меридиональная	0,130	0,133
		Сагиттальная	0,134	0,130
5	50	Меридиональная	0,120	0,114
		Сагиттальная	0,122	0,111

Из таблицы видно, что модуль ОПФ окуляра с испытуемым образцом № 1 линзы после проведенных ускоренных испытаний на сохраняемость соответствует заданному допуску на этот параметр: получен усредненный контраст 0,485 на пространственной частоте 20 мм^{-1} . Некоторые наблюдаемые различия в результатах измерений модуля ОПФ в таблице обусловлены разбросом исходных геометрических параметров линз.

Результаты выполненных испытаний и соответствующих измерений демонстрируют перспективность применения технологии прецизионного реплицирования как в части формообразования всех видов оптических поверхностей, так и в части реставрационных возможностей этой технологии.

Список источников

- [1] Лукин, А. В. Реплицированная асферическая оптика: основные аспекты организации серийного и массового производства / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, М. М. Ахметов, А. В. Берденников, И. С. Гайнутдинов, А. В. Жданова, В. П. Иванов, Е. Г. Лисова, И. А. Могилук // Контентант. — 2017. — Том 16. — № 2. — С. 167–172.
- [2] Лукин, А. В. Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве / А. В. Лукин, А. Н. Мельников // Оптический журнал. — 2022. — Том 89. — № 10. — С. 42–50. — DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50
- [3] Лукин, А. В. Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве / А. В. Лукин, Н. А. Гурин, А. Н. Мельников, Е. Г. Лисова, А. А. Свистунова // Оптический журнал. — 2023. — Том 90. — № 7. — С. 107–115. — DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115
- [4] Лукин, А. В. Дополнительные и низкокзатратные возможности серийного формообразования оптических поверхностей методом прецизионного реплицирования на основе использования малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения / А. В. Лукин, А. Н. Мельников, Е. Г. Лисова, А. И. Садрутдинов, Н. А. Гурин // НОЛОЕХРО 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 311–314.
- [5] ОСТ 3–1901–95 Покрyтия оптических деталей. Типы, основные параметры и методы контроля. — М.: Изд-во ЦНИИ «Комплекс», 1995. — 191 с.
- [6] ГОСТ 11141–84 Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 15 с.

Results of accelerated durability tests of lenses with restored aspherical working surfaces

A. V. Lukin¹, A. N. Melnikov¹, E. G. Lisova¹, N. A. Gurin^{2,3}, A.A. Svistunova²

¹JSC "Scientific and Production Association "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia

²JSC "Novosibirsk Instrument-Building Plant", Novosibirsk, Russia

³Institute of Automatics and Electrometry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The report discusses the results of accelerated durability tests of lenses with restored optical working surfaces, including comparative measurements of the focal length and optical transfer function modulus of eyepieces with a standard lens and a restored lens. In this case, the surface restoration was carried out using the precision replication method based on the use of low-shrinkage cold-setting polymer compound.

Keywords: Precision replication method, Low-shrinkage cold-setting polymer compound, Restored optical surface, Accelerated durability tests, Optical transfer function modulus of eyepieces

Расчет и проектирование эталона цветности

Г. Р. Сагателян, Е. Р. Пискунова, А.С. Кузнецов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Разработана методика расчета и проектирования эталона цветности, предназначенного для распознавания цветов при проведении компьютеризированного гистологического анализа оптико-микроскопических изображений. Проведен расчет координат цветности цветового эталона и приведены расчетные формулы с результатами вычислений. На основе полученных результатов разработан эталон цветности, представляющий собой набор цветовых полей.

Ключевые слова: Эталон цветности, Оптический спектр, Спектр пропускания, Спектральная чувствительность, Диаграмма цветности

Любой цвет раскладывается на три базовых компонента (Red, Bleu, Green) и далее может быть получен снова путем смешения данных цветов с разной интенсивностью.

Геометрически цвет можно представить точкой в трехмерном пространстве, для этого его цветные координаты откладывают по 3 взаимно перпендикулярным осям (рис. 1).

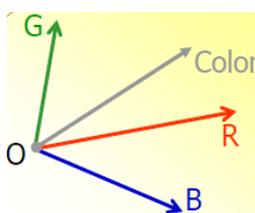


Рис. 1. Оси координат

Кривые сложения цветов (рис. 2) играют в колориметрии важную роль. По ним можно рассчитать количества основных цветов, которые требуются для получения смеси. Для этого цвет сложного излучения представляют в виде суммы чистых спектральных цветов, соответствующих его монохроматическим составляющим. Возможность подобного представления основана на том, что цветные координаты цвета смеси равны суммам соответствующих координат смешиваемых цветов.

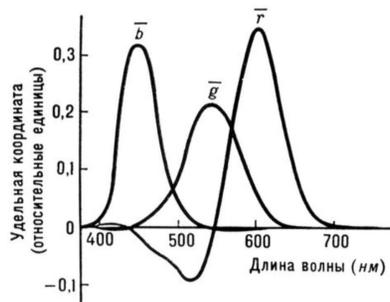


Рис. 2. Кривые сложения цветов

Эталон цветности состоит из стекол разных цветов, которые были взяты из набора светофильтров, спектры пропускания (ρ_i) которых известны.

Представим RGB -координаты для одного цветового поля следующим уравнением:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Theta_1^R & \dots & \Theta_K^R \\ \Theta_1^G & \dots & \Theta_K^G \\ \Theta_1^B & \dots & \Theta_K^B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \dots \\ \rho_K \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где Θ_i^m — величина, показывающая произведение спектра источника освещения и спектра чувствительности элементов матрицы на i -ой длине волны для m -ого канала RGB ; K — число отсчетов по длине волн.

Найдем величину Θ_i^m . Для этого необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений СЛАУ:

$$\begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ R_N & G_N & B_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_1^1 & \dots & \rho_K^1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_1^N & \dots & \rho_K^N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Theta_1^R & \Theta_1^G & \Theta_1^B \\ \dots & \dots & \dots \\ \Theta_K^R & \Theta_K^G & \Theta_K^B \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где N — количество цветовых полей на эталоне цветности;

$$\begin{pmatrix} \rho_1^1 * \Theta_1^R + \dots + \rho_K^1 * \Theta_K^R & \rho_1^1 * \Theta_1^G + \dots + \rho_K^1 * \Theta_K^G & \rho_1^1 * \Theta_1^B + \dots + \rho_K^1 * \Theta_K^B \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho_1^N * \Theta_1^R + \dots + \rho_K^N * \Theta_K^R & \rho_1^N * \Theta_1^G + \dots + \rho_K^N * \Theta_K^G & \rho_1^N * \Theta_1^B + \dots + \rho_K^N * \Theta_K^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ R_N & G_N & B_N \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Получим СЛАУ:

$$\begin{cases} \rho_1^1 * \Theta_1^R + \dots + \rho_K^1 * \Theta_K^R = R_1 \\ \rho_1^N * \Theta_1^R + \dots + \rho_K^N * \Theta_K^R = R_N \\ \rho_1^1 * \Theta_1^G + \dots + \rho_K^1 * \Theta_K^G = G_1 \\ \rho_1^N * \Theta_1^G + \dots + \rho_K^N * \Theta_K^G = G_N \\ \rho_1^1 * \Theta_1^B + \dots + \rho_K^1 * \Theta_K^B = B_1 \\ \rho_1^N * \Theta_1^B + \dots + \rho_K^N * \Theta_K^B = B_N \end{cases}, \tag{4}$$

Исходными материалами для цветовой калибровочной меры был выбран набор светофильтров из цветного стекла размером 40x40 мм (рис. 3).

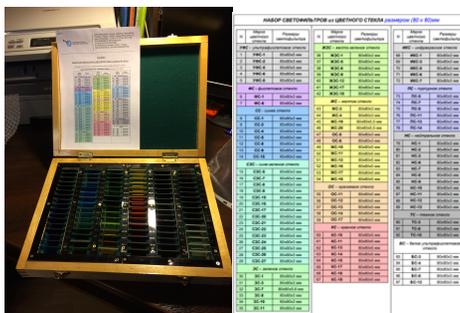


Рис. 3. Набор светофильтров из цветного стекла размером 40x40 мм

На рис. 4 приведена диаграмма цветности, на которой построена выпуклая оболочка согласно спектрам пропускания световых фильтров.

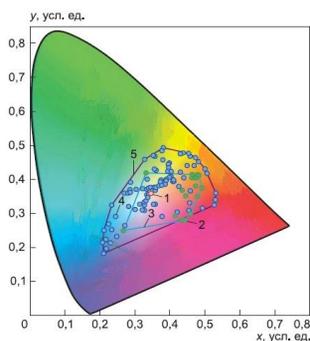


Рис. 4. Диаграмма цветности

На рис. 5 изображен прототип разработанного эталона цветности.

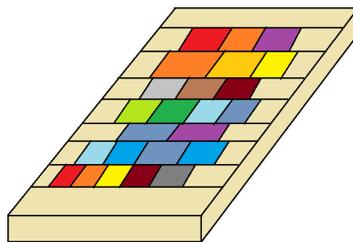


Рис. 5. Прототип разработанного эталона цветности

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Махов, Д. С. Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии / Махов Д. С., Сагателян Г. Р., Самородов А. В. // Измерительная техника. — 2021. — № 10. — С. 60–63.
- [2] Сагателян, Г. Р. Разработка конструкции и технологии изготовления набора цветных эталонов для оптико-микроскопических исследований / Сагателян Г. Р., Кондратенко В. С., Пискунова Е. Р., Кузнецов А. С. // Приборы. — 2023. — № 8. — С. 40–43.
- [3] Сагателян, Г. Р. Изготовление цветовой калибровочной меры для компьютеризированного гистологического анализа / Сагателян Г. Р., Самородов А. В., Кондратенко В. С., Пискунова Е. Р., Кузнецов А. С. // Сборник научных трудов XII международной конференции по фотонике и информационной оптике. — 2023. — С. 66–67.

Calculation and design of the chromaticity standard

G. R. Sagatelian, E. R. Piskunova, A. S. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

A technology has been developed for calculating and designing a chromaticity standard, which is designed for color recognition during computerized histological analysis of optical microscopic images. The chromaticity coordinates of the color standard were calculated. This article presents formulas and calculations performed, based on the results of which a chromaticity standard has been developed, which is a set of color fields.

Keywords: *Chromaticity standard, Optical spectrum, Transmission spectrum, Spectral sensitivity, Chromaticity diagram*

Секция 13

Опико - цифровые информационные системы и опические коммуникации

Погрешность оптических вычислений в 4f-схеме с жидкокристаллическими модуляторами света

Р. В. Скиданов^{1,2}, Ю. В. Ханенко^{1,2}, А. Е. Морозов^{1,2}, А. П. Порфирьев^{1,2}, А. С. Пронин^{1,2}, Д. М. Сорокин^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия

² ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Рассмотрены основные факторы, влияющие на погрешность оптической реализации математических преобразований в 4f-схеме. Приводятся результаты моделирования и натурального эксперимента. Рассмотрены различные варианты реализации пространственных фильтров.

Ключевые слова: 4f-схема, Пространственный фильтр, Оптические вычисления

Введение

Основная масса публикаций по тематике Фурье-коррелятора посвящена задаче распознавания во всех ее аспектах. В англоязычной литературе для основной операции принят устоявшийся термин joint transform correlation (JTC) [1]. Дословный перевод — совместное корреляционное преобразование. Это преобразование используется для выделения в исходном изображении некоторых искомым объектов. По сути, для комплексной функции входного изображения $f(x, y)$ применяются три базовых операции: преобразование Фурье, умножение Фурье-спектра исследуемого изображения на фильтр, который определяется, и второе преобразование Фурье для получения корреляции [1]. Изначально пространственный фильтр был статичным, например это могла быть записанная голограмма эталонного объекта, что сильно ограничивало применение метода ввиду его сильной зависимости от поворота и изменения масштаба изображения. С появлением динамически изменяемых транспарантов, в первую очередь, на основе всевозможных жидких кристаллов, появилась возможность реализации большого количества модификаций метода. Это привело как к усложнению исходной оптической схемы Фурье-коррелятора, так и к ее упрощению в некоторых задачах. Например, появилась оптическая схема совместный Фурье-коррелятора, в которой всего одно плечо (одна линза), второй каскад реализуется последовательно после преобразования зарегистрированного Фурье-спектра в компьютере.

Фурье-коррелятор может использоваться не только для задач распознавания. На основе использования Фурье-коррелятора можно реализовать большое семейство математических преобразований двумерного входного сигнала: интегральные преобразования Фурье, Френеля, Гильберта, Ханкеля и многие другие, вычисление двумерных сверток, вычисление разложения входного сигнала по ортогональным базисам. В том числе возможны математические операции для упрощения процесса распознавания, реализуемого не корреляционным способом. При этом в качестве пространственного фильтра может выступать как пространственный модулятор света, так и дифракционный оптический элемент (ДОЭ), реализующий одно математическое преобразование.

Так, в работах [2–6] рассматривались многоканальные ДОЭ для разложения когерентных световых полей на ряд ортогональных функций, например, для обнаружения и анализа aberrаций волнового фронта, реализовывалось оптическое разложение по полиномам Цернике. В настоящей работе анализируется возможный уровень ошибок, с которыми осуществляется вычисление двумерных преобразований в 4f-системе.

1. Моделирование

Для оценки погрешности аналоговых оптических вычислений была создана математическая модель Фурье-коррелятора, позволяющая моделировать оптическое выполнение математических преобразований. На рисунке 1 представлен интерфейс программы, осуществляющей моделирование.

Программа реализует математическую модель через алгоритмы БПФ и ДПФ опционально. Для определения основных закономерностей решено было использовать модель Фурье-коррелятора с линейным пространственным фильтром, который реализует операцию взятия частной производной от входного поля. Выбор этот продиктован удобством сравнения и тем, что при вычислении производной используются оба плеча Фурье-коррелятора. В качестве функции для дифференцирования была выбрана функция $f(x, y) = \sin(ax) \sin(ay)$.

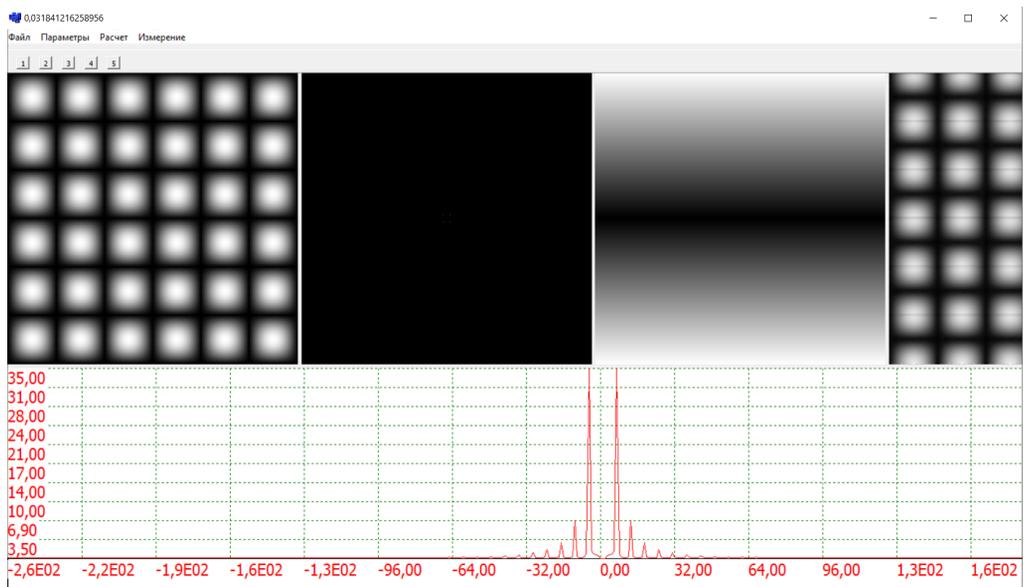


Рис. 1. Интерфейс моделирующей программы

На рисунке 2а показана исходная функция, на рисунке 2б показана ее точно вычисленная производная по оси y , на рисунке 2в показана оптически вычисленная производная с использованием БПФ, на рисунке 2г показана оптически вычисленная производная с использованием ДПФ.

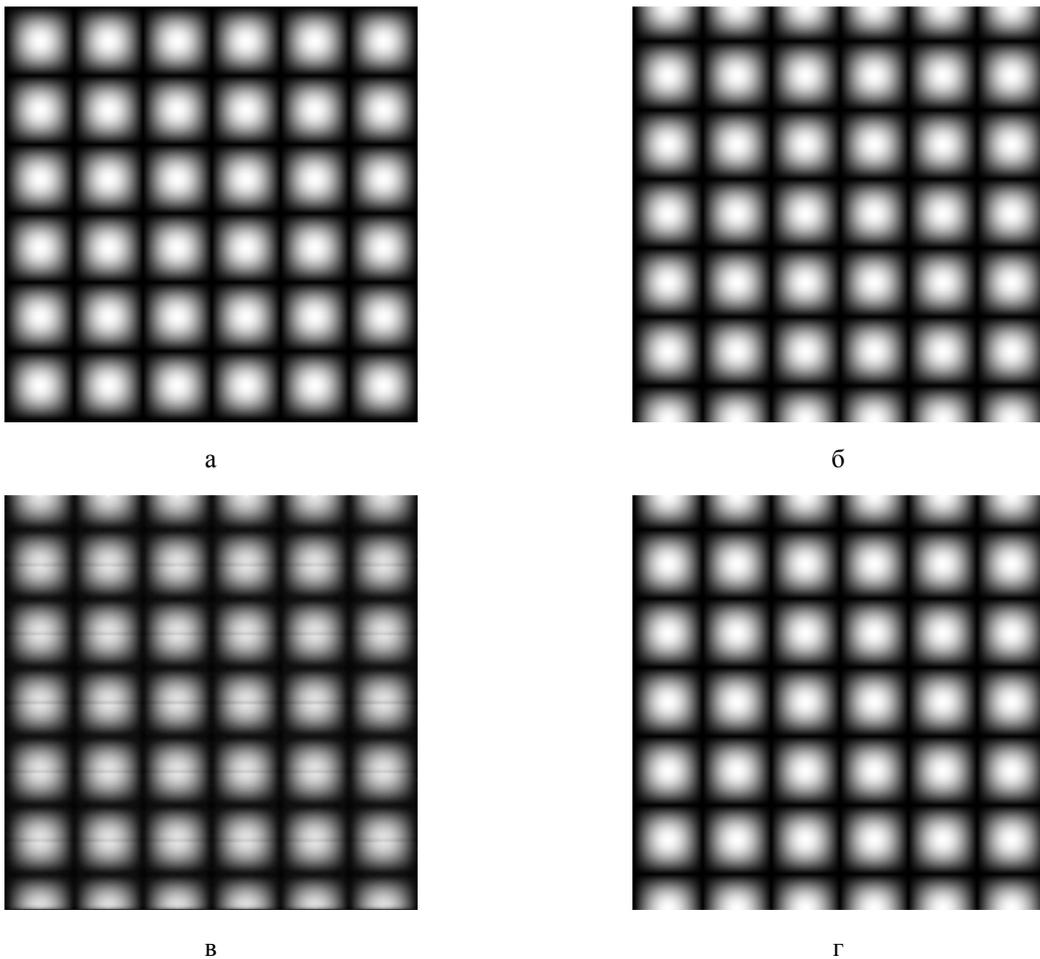


Рис. 2. Исходная функция $f(x,y) = \sin(ax) \sin(ay)$ (а), точно вычисленная производная по оси y (б), оптически вычисленная производная с использованием БПФ (в), оптически вычисленная производная с использованием ДПФ (г)

Сравнение распределения интенсивности на рисунке 2в с распределением на рисунке 2б по критерию среднеквадратичного отклонения (СКО) дало ошибку вычисления 3,2 %. Однако при сравнении распределения интенсивности на рисунке 2г с распределением на рисунке 4.2б по критерию СКО значение ошибки получается всего 0,6, что примерно соответствует ошибке квантования при 256 уровнях.

Была исследована зависимость СКО от количества уровней квантования в модуляторе в частотной плоскости. В таблице 1 приведены результаты.

Таблица 1. Величина СКО вычисления первой производной в зависимости от числа уровней квантования

N	256	128	64	32	16
СКО	0,006	0,008	0,019	0,163	0,27

Еще одно важное исследование было сделано для проверки влияния уровня неоднородности по поверхности модулятора.

Таблица 2. Влияние уровня неоднородности по поверхности модулятора

Δ	0,001	0,01	0,1	0,2	0,3
СКО	0,006	0,007	0,017	0,041	0,159

Как видно из таблицы 2, уровень неоднородности набега фазы по поверхности модулятора не должен превышать 1 % от 2π . Видно, что уже 64-уровневый модулятор дает совершенно неприемлемые результаты.

2. Эксперимент

В ходе экспериментов была использована оптическая схема, показанная на рисунке 3. Выходное линейно-поляризованное излучение твердотельного лазера (MGL-U-532-1W, $\lambda = 532$ нм, максимальная выходная мощность 1 Вт) проходило через полуволновую пластинку HWP, которая была использована для поворота плоскости линейно поляризации лазерного пучка. Система оптической фильтрации, состоящая из микрообъектива MO1 (4 \times , NA = 0,1), пинхола PH (размер отверстия 40 мкм) и линзы L1 (фокусное расстояние 500 мм) была использована для пространственной фильтрации, расширения и коллимации исходного Гауссова пучка. Поляризатор P1 был использован для выделения части исходного лазерного излучения с поляризацией перпендикулярной плоскости оптического стола (y -линейная поляризация). Далее это линейно-поляризованное излучение попадало на дисплей пропускающего пространственного модулятора света SLM1 PLUTO LC 2012 (HOLOEYE, размер 1024 \times 768 пикселей, размер пикселя 36 мкм) (входная плоскость). Для выполнения амплитудной модуляции после данного модулятора света располагался второй поляризатор-анализатор P2 с ориентацией оси, перпендикулярной оси первого поляризатора P1. Комбинация линзы L2 (фокусное расстояние 250 мм) и отражающего пространственного модулятора света SLM2 PLUTO VIS (HOLOEYE, размер 1920 \times 1080 пикселей, размер пикселя 8 мкм) была использована для реализации 4F-оптической системы Фурье-коррелятора, где в качестве пространственного фильтра использовалась фазовая маска, выводимая на дисплей модулятора (спектральная плоскость). При этом светоделительный кубик BS1 был использован как дополнительный элемент этого коррелятора, который был использован для наблюдения отраженного промодулированного светового поля с помощью видеокамеры CAM1 (ToopCam, UCMOS03100KPA, размер матрицы 2048 \times 1536, размер пикселя 3,2 мкм). Светоделительный кубик BS2 в сочетании с линзой L3 (фокусное расстояние 125 мм) давал возможность наблюдать интенсивность светового поля, сформированного в плоскости дисплея отражающего модулятора SLM2. В данном случае расстояние от линзы до плоскости дисплея модулятора, а также расстояние от линзы до матрицы видеокамеры CAM2 (ToopCam, UCMOS08000KPB, размер матрицы 3264 \times 2448, размер пикселя 1,67 мкм) было равно двойному фокусному расстоянию линзы. Фактически эта интенсивность представляла собой спектр светового поля, сформированного в плоскости дисплея первого модулятора света SLM1.

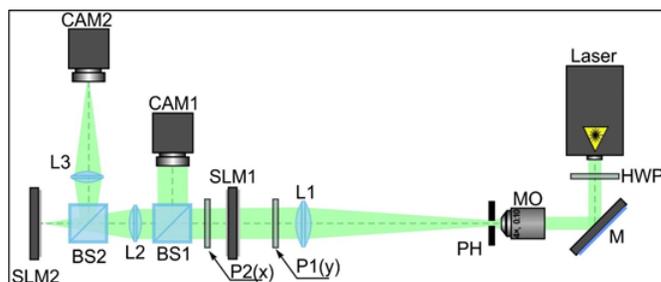


Рис. 3. Оптическая схема эксперимента по распознаванию цифр из набора MNIST с помощью оптических нейронных сетей:

Laser — твердотельный лазер MGL-U-532-1W; HWP — полуволновая пластинка; M — зеркало; MO — микрообъектив; PH — пинхол; L1, L2 и L3 — линзы; P1(y) и P2(x) — поляризаторы с осями, повернутыми под углом 90° друг к другу; SLM1 — пропускающий пространственный модулятор света HOLOEYE LC 2012; SLM2 — отражающий пространственный модулятор света HOLOEYE PLUTO VIS; BS1 и BS2 — светоделительные кубики; CAM1 и CAM2 — видеокамеры

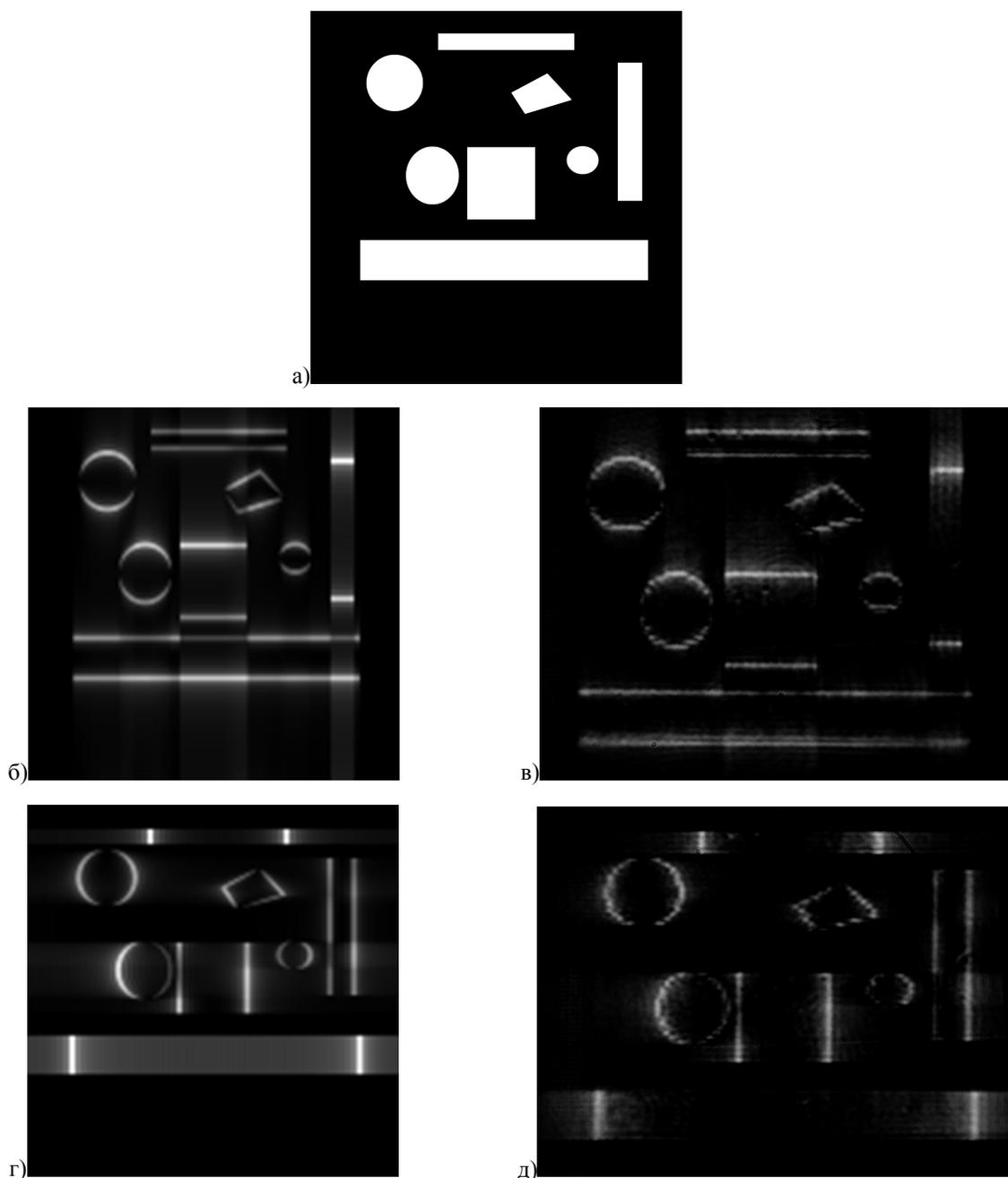


Рис. 4. Тестовый рисунок (а), вертикальный гильберт образ, полученный моделированием (б), полученный в эксперименте (в), горизонтальный гильберт образ, полученный моделированием (г), полученный в эксперименте (д)

Как видно из рисунка 4, в экспериментальных Гильберт-образах проявляется помимо структуры тестовой картинки, структура самого модулятора, что не позволяет напрямую получить результат. Поэтому СКО вычислялась по центрам экспериментальных пикселей, что позволило получить значение 2,5 %.

Заключение

Оптические аналоговые вычисления, в силу ряда как фундаментальных, так и технических причин формируют результат с заметной ошибкой. Даже в идеальной ситуации моделирование дает ошибку в десятые доли процента, что объясняется невысокой разрядностью итогового изображения. Ошибка в эксперименте, в основном, связана с несовершенством устройств ввода-вывода. Так, пространственные модуляторы обычно имеют 8-битовую разрядность и заметные промежутки между управляемыми пикселями. Для повышения точности вычислений, необходимо, в первую очередь, усовершенствовать именно пространственные модуляторы света.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025»».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Schönleber, M. Joint transform correlator subtracting a modified Fourier spectrum / M. Schönleber, G. Cedilnik, H.-J. Tiziani // *Applied Optics*. — 1995. — Vol 34. — Issue 32. — P. 7532–7537.
- [2] Porfirev, A. P. Experimental investigation of multi-order diffractive optical elements matched with two types of Zernike functions / A. P. Porfirev, S. N. Khonina // *Proceedings of SPIE*. — 2016. — Vol 9807. — P. 98070E.
- [3] Degtyarev, S. A. Zernike basis-matched multi-order diffractive optical elements for wavefront weak aberrations analysis / S. A. Degtyarev, A. P. Porfirev, S. N. Khonina // *Proceedings of SPIE*. — 2017. — Vol 10337. — P. 103370Q.
- [4] Khorin, P. A. Optical detection of values of separate aberrations using a multi-channel filter matched with phase Zernike functions / P. A. Khorin, S. G. Volotovskiy, S. N. Khonina // *Computer Optics*. — 2021. — Vol 45(4). — P. 525–533.
- [5] Khonina, S. N. Wavefront aberration sensor based on a multichannel diffractive optical element / S. N. Khonina, S. V. Karpeev, A. P. Porfirev // *Sensors*. — 2020. — Vol 20. — Issue 14. — P. 3850.
- [6] Khorin, P. A. Adaptive detection of wave aberrations based on the multichannel filter / P. A. Khorin, A. P. Porfirev, S. N. Khonina // *Photonics*. — 2022. — Vol 9. — Issue 3. — P. 204.

The error of optical calculations in a 4F circuit with liquid crystal light modulators

R. V. Skidanov,^{1,2} Yu. V. Khanenko^{1,2}, A. E. Morozov^{1,2}, A. P. Porfiriev^{1,2}, A. S. Pronin^{1,2}, D. M. Sorokin^{1,2}

¹ Samara University, Samara, Russia

² NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

The main factors influencing the error of the optical implementation of mathematical transformations in the 4F scheme are considered. The results of modeling and field experiment are presented. Various options for the implementation of spatial filters are considered.

Keywords: 4F circuit, Spatial filter, Optical calculations

Фильтры с заданной формой корреляционного пика для инвариантных оптико-цифровых корреляторов с нейросетевой постобработкой

Д. В. Павленко, Е. Ю. Злоказов, Р. С. Стариков, П. А. Черёмхин

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

Работа посвящена изучению корреляционных фильтров со сглаживающими функциями, обеспечивающими корреляционный сигнал заданной формы. Анализ корреляционного отклика проводится с помощью сверточной нейронной сети, на основе обработки изображений окрестности пика корреляционной функции.

Ключевые слова: Корреляционный фильтр, Фурье-преобразование, Сверточные нейронные сети, Обработка и распознавание изображений

Одним из перспективных подходов к решению задач распознавания образов и идентификации объектов является корреляционный метод [1]. Суть корреляционного метода заключается в вычислении двумерной взаимокорреляционной функции между изображением входного объекта и эталонными изображениями, а также в последующем анализе корреляционного отклика. Применение инвариантных фильтров в качестве эталонов при корреляционном распознавании позволяет обеспечить сохранение максимума корреляционной функции в условиях искажения изображений объектов, таких как поворот, зашумление, изменение освещенности и т. п. Первые работы по реализации инвариантного корреляционного распознавания появились в начале 1980-х годов [2], и в настоящее время метод получил дальнейшее развитие. Также огромным преимуществом метода инвариантной корреляции является возможность полностью реализовать все вычисления в оптической системе.

Одним из наиболее перспективных типов инвариантных фильтров стали составные корреляционные фильтры, синтезированные на основе обучающего набора изображений объектов одного или нескольких классов. Данные фильтры позволяют формировать корреляционный сигнал заданной формы, что может быть полезно для повышения эффективности процесса обнаружения и классификации объектов. Кроме того, современная тенденция развития методов распознавания изображений является комбинация оптических систем и сверточных нейронных сетей (СНС). Основная идея заключается в модификации исходной архитектуры СНС для анализа признаков, извлеченных из изображений оптическим путем [3].

В данной работе использовался метод синтеза корреляционного фильтра с минимальной средней энергией корреляции со сглаживающей функцией (КФ МСЭКСФ). Расчет КФ МСЭКСФ формулируется как задача минимизации суммы среднеквадратичных отклонений Фурье-образов результирующих корреляционных полей от Фурье-образа сглаживающей функции для всех изображений обучающего набора при наличии фиксированного значения высоты корреляционного пика. Подобный фильтр уже был реализован с использованием сглаживающей вейвлет-функцией [4] и функцией Гаусса [5]. Также на основе КФ МСЭКСФ синтезировались голограммы Фурье, обеспечивающие импульсный отклик схемы когерентного 4f-коррелятора, соответствующий корреляционной функции. Реализация голограмм возможна с применением жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света [6].

В качестве сглаживающей функции предложена собственно разработанная, которая задавалась путем преобразования изображения с интересующим видом корреляционного пика. Результаты показали устойчивость формы корреляционного пика по отношению к изображениям эталонного класса не вошедшим в обучающий набор. Одновременно с этим фильтр показал дискриминацию по отношению к изображениям ложного класса, выражающуюся в снижении высоты и разрушении формы корреляционного пика. На рисунке 1 представлен вид корреляционного отклика для изображения истинного класса и ложного.

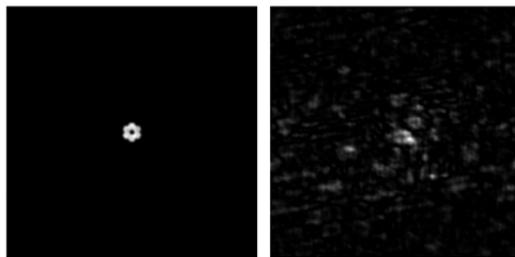


Рис. 1. Центральная часть корреляционного поля: слева представлено корреляционный отклик эталонного изображения, справа — ложного

Всего в работе использовалось 4 класса изображений объектов, каждый из которых включал 355 изображений. Один из этих классов являлся истинным, а остальные три — ложными. Эталонные и распознаваемые изображения объектов имели следующие характеристики: размер каждого изображения 256x256 пикселей, при этом они представлены в градациях серого.

После вычисления кросс-корреляционной функции входных изображений и корреляционного фильтра строилась дискриминационная характеристика, пример которой приведен на рисунке 2.

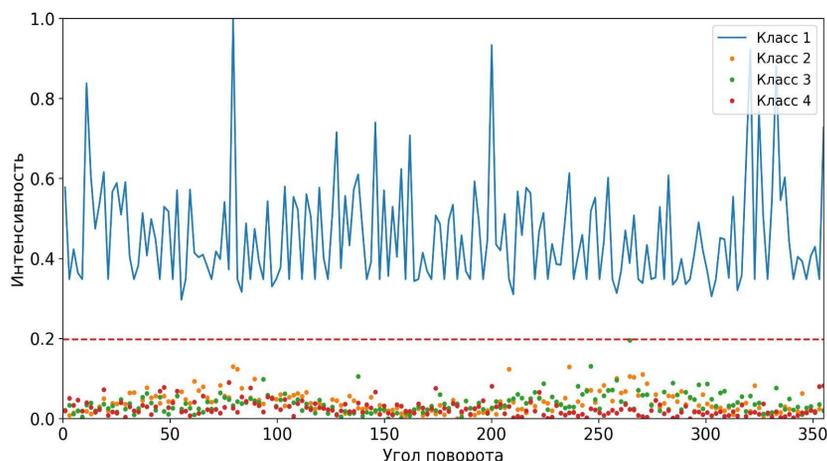


Рис. 2. Зависимость интенсивности корреляционного пика от угла поворота входного объекта

Дискриминационная характеристика КФ МСЭКФ представляет собой график зависимости корреляционного отклика (сумма значений интенсивности в окрестности пика) от номера изображения N (одинаковые номера соответствуют одинаковым углам поворота при данном горизонтальном склонении). Диапазон поворота объектов составляет 360° , горизонтальное склонение около 50° . Число эталонных изображений, вошедших в фильтр, равно 118.

Полученные корреляционные отклики использовались для дальнейшего анализа с помощью СНС. Главной задачей являлась классификация корреляционных сигналов. Для этого из матриц с корреляционными пиками вырезалась центральная часть, равная 28×28 пикселей. После этого производилась аугментация изображений, которая позволила расширить тренировочный набор данных благодаря внесению различных искажений. После этого проводилось обучение СНС, и полученная ошибка распознавания составляла менее 1 %. Подобный результат достигается за счет того, что корреляционный отклик для изображений объектов ложного класса сильно разрушается.

Таким образом, исследование КФ МСЭКФ показало, что фильтр со сглаживающей функцией позволяет получать корреляционный пик заданной формы. В контексте такой задачи, корреляционный фильтр является предобработчиком изображений и позволяет снизить необходимые вычислительные требования для распознавания объектов на изображениях с помощью СНС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-12-00336.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Mahalanobis, A. Minimum average correlation energy filters / B. V. Kumar and D. Casasent // *Applied Optics*. — 1987. — Vol 18. — P. 3633–3640.
- [2] Hester, C. F. Multivariate technique for multiclass pattern recognition / D. Casasent // *Applied Optics*. — 1980. — Vol 19. — P. 1758–1761.
- [3] Colburn, S. Optical frontend for a convolutional neural network / Y. Chu, E. Shilzerman, A. Majumdar // *Applied Optics*. — 2019. — Vol 58. — P. 3179–3186.
- [4] Evtikhiev, N. N. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study / D. V. Shaulskiy, E. Y. Zlokazov, R. S. Starikov // *Optical Pattern Recognition XXIII*. — 2012.
- [5] Casasent, D. Ravichandran Gopalan, Bollapragada Srinivas. Gaussian-minimum average correlation energy filters // *Applied Optics*. — 1991. — Vol 30. — № 35. — P. 5176–5181.
- [6] Shaulskiy, D. Variants of light modulation for MINACE filter implementation in 4-F correlators/ N. Evtikhiev, E. Zlokazov, S. Starikov, R. Starikov, E. Petrova, D. Molodtsov // *Proceedings of SPIE*. — 2015. — Vol 9598.

Filters with a Predefined Correlation Peak Shape for Invariant Optical - Digital Correlators with Neural Network Post - Processing

D. V. Pavlenko, E. Y. Zlokazov, R. S. Starikov, P. A. Cheremkhin

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

This research investigates correlation filters with smoothing functions that generate a correlation signal of a predetermined shape. The analysis of the correlation response is conducted using a convolutional neural network, which processes the imagery in the vicinity of the correlation function peak.

Keywords: *Correlation filter, Fourier transform, Convolutional neural networks, Image processing and recognition*

Калибровка 4f-системы для оптических вычислений в режиме оптических нейронных сетей

Ю. В. Ханенко, Р. В. Скиданов, А. П. Порфирьев

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия

В статье представлены результаты калибровки оптического аналогового вычислителя на основе пространственных фазовых модуляторов света с помощью преобразования Гильберта. Рассмотрены особенности формирования оптического сигнала в оптической схеме с большим количеством делителей пучка. Рассмотрены методы устранения паразитных засветок.

Ключевые слова: Оптические вычисления, 4f-схема, Калибровка, Оптические нейронные сети, Оптический аналоговый вычислитель

Введение

В статье рассматривается задача калибровки оптической установки аналогового фотонного вычислительного устройства, задачей которой являются распознавание и реализация заданного набора матричных преобразований. На рисунке 1 показана данная экспериментальная установка. На рисунке видно входную часть системы, состоящую из микрообъектива, пинхола и линзы, что позволяет очистить входной пучок и сфокусировать его. Затем луч проходит через полуволновую пластинку и попадает через делитель пучка на модулятор. На данный модулятор выводятся входные изображения. Отразившись от модулятора, луч через делитель пучка проходит полуволновую пластинку и поляризатор. Набор из второй полуволновой пластинки и поляризатора позволяет превращать фазу в амплитуду, что необходимо для работы системы, так как модуляторы являются фазовыми. Далее луч проходит через линзу, делитель пучка и попадает на второй модулятор, на котором выведена некоторая структура, позволяющая разделять интенсивность по зонам в зависимости от того, что находится на входном изображении. Луч отражается от модулятора и идет в обратную сторону, где на делителе пучка отходит в сторону камеры, что позволяет видеть результат работы системы, а именно распределение интенсивностей по зонам.

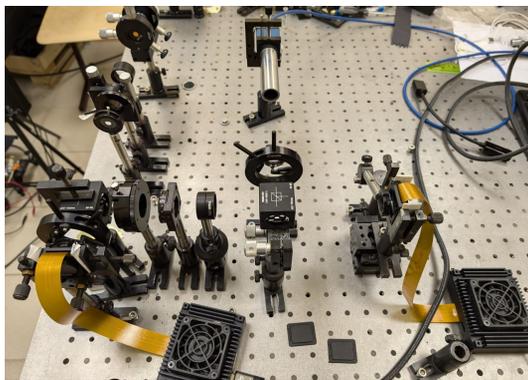


Рис. 1. Экспериментальная установка

1. Калибровка модулятора в частотной плоскости на основе преобразования Гильберта

Преобразование Гильберта в оптике имеет характер квазидифференцирования пространственного сигнала. Однако, в отличие от операции дифференцирования, преобразование Гильберта имеет не-локальный характер. Поведение гильберт-образа в окрестности любой точки зависит от светового сигнала на всем пространственном интервале его существования. Энергия сигнала при гильберт-преобразовании сохраняется. Это является важным преимуществом гильберт-фильтрации по сравнению с пространственным дифференцированием. При гильберт-преобразовании энергия оптического сигнала перераспределяется в соответствии с фазовыми градиентами и осуществляется визуализация полей фазовой оптической плотности исследуемой среды [1, 2].

Как известно, одномерное преобразование Гильберта в координатном пространстве описывается сверткой сигнала $s(x)$ с функцией $1/\pi x$. В частотном пространстве оно соответствует произведению Фурье-спектра сигнала на функцию $H(K_x) = -i \operatorname{sgn} K_x$. Здесь K_x — x -компонента простран-

ственной частоты; $\text{sgn } K_x$ — знаковая функция. В оптике преобразование Гильберта легко реализуется методами фильтрации сигнала в частотной плоскости [3, 4]. Функция $H(K_x)$ является когерентно–передаточной функцией (КПФ) соответствующего фильтра. На рисунке 2 представлены фазовые маски для реализации одномерного и двумерного преобразований Гильберта.

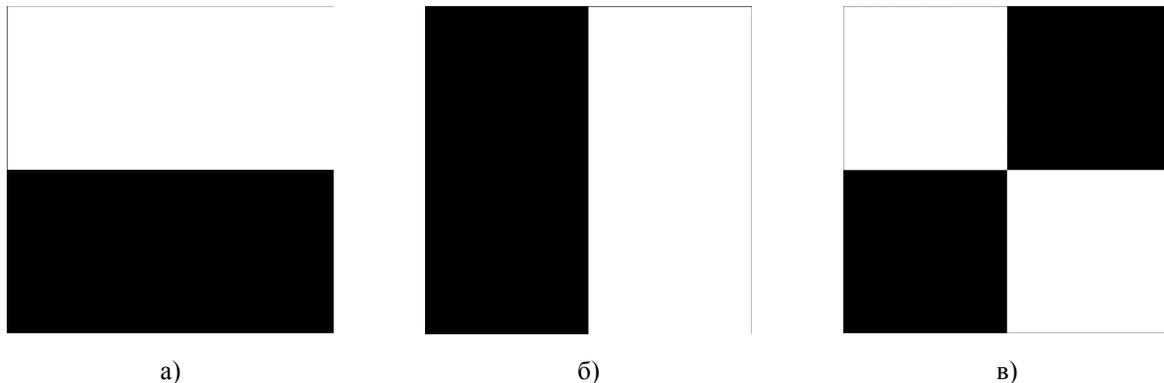


Рис. 2. Фазовые маски для оптической реализации одномерного по y (а), одномерного по x (б) и двумерного (в) преобразований Гильберта

На рисунке 3 представлено тестовое изображение и его гильберт-образы.

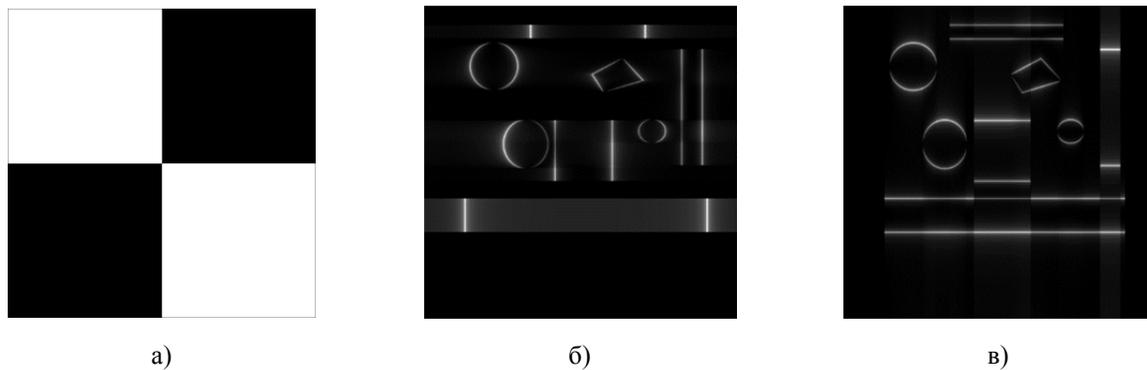


Рис. 3. Модельное изображение (а) и его гильберт-образы: по оси x (б) по оси y (в)

Применение гильберт-преобразования позволит совместить на одной оси входное изображение и структуру, выполняющую разделение интенсивностей по зонам.

Заключение

В работы были рассмотрены способы калибровки 4f-системы для оптических вычислений в режиме оптических нейронных сетей. Наиболее подходящим способом было выбрано гильберт-преобразование, позволяющее получить контуры объектов на изображении при точном совмещении центров изображения и фазовой маски. При точном совмещении центров контрастность изображения становится максимальной.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального физико-математического центра, секция № 1 «Национальный центр исследования суперкомпьютерной архитектуры. Этап 2023-2025».

Список используемых источников

- [1] **Fursov, V. A.** Thematic classification with support subspaces in hyperspectral images [Text] / V. A. Fursov, S. A. Bibikov, D. A. Zherdev, N. L. Kazanskiy // International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation. — 2020. — Vol 11. — № 4. — P. 186–193.
- [2] **Арбузов, В. А.** Методы гильберт–оптики в экспериментальной гидро– и газодинамике [Электронный ресурс] / В. А. Арбузов, Ю. Н. Дубнищев // URL: <https://omfi-conf.ru/omfi2011/omfi2011-0102.pdf>.

- [3] Дубнищев, Ю. Н. Исследование струйного горения водорода с помощью гильберт-диагностики / Ю. Н. Дубнищев, В. А. Арбузов, В. В. Лукашов, К. В. Шаров, В. В. Леманов // Автометрия. — 2019. — Том 55. — № 1. — С. 21–25.
- [4] Сороко, Л. М. Гильберт–оптика / Л. М. Сороко. — М.: Наука, 1981. — 160 с.

Calibration of 4f system for optical computing in optical neural network mode

Yu. V. Khanenko, R. V. Skidanov, A. P. Porfirev

¹ Samara National Research University named after academician S. P. Korolev, Samara, Russia

The article presents the results of calibration of an optical analog computer based on spatial phase light modulators using the Hilbert transform. The features of optical signal formation in an optical circuit with a large number of beam splitters are considered. Methods for eliminating parasitic illumination are considered.

Keywords: Optical computing, 4f scheme, Calibration, Optical neural networks, Optical analog computer

Wi-Fi через волокно

Е. Ю. Злоказов, М. Ю. Казьмин, В. А. Небавский, В. Г. Родин, Р. С. Стариков, Д. А. Третьяков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Цель работы — демонстрация возможности передачи Wi-Fi соединения и подключения к сети Интернет на базе двух оптических СВЧ-трактов. В состав оптического тракта входил РОС-лазер, модулятор Маха-Цендера с контроллером рабочей точки, катушка оптического волокна и фотодиод. Wi-Fi сеть раздавалась с помощью обыкновенного телефона, для передачи сигнала по оптическому тракту к модуляторам и фотодиодам подключились обычные приемно-передающие Wi-Fi антенны. Соответствующая система собиралась и на стороне приемного устройства, чтобы обеспечить как прием, так и передачу сигнала. Тестирование показало работоспособность интернет-соединения, система не вносит существенный пинг, а устройство-клиент (смартфон) может успешно осуществлять прием и передачу интернет-трафика на скоростях, соответствующих стандартам 4G.

Ключевые слова: *Микроволновая фотоника, Радиофотоника, Радио по волокну, Оптические линии трансляции, Аналоговые оптические тракты, Wi-Fi*

Технология Radio over Fiber (RoF) в последние годы набирает все большую популярность. Основными техническими преимуществами использования волоконно-оптических линий связи являются более низкие потери при передаче и пониженная чувствительность к шуму и электромагнитным помехам по сравнению с полностью электрической передачей сигнала.

В области беспроводной связи одним из основных ROF является облегчение беспроводного доступа, такого как 5G и WiFi, одновременно с одной антенны [1]. Другими словами, радиосигналы передаются по волоконно-оптическому кабелю как аналоговые. Таким образом, одна антенна может принимать любые радиосигналы (5G, Wi-Fi и т. д.), передаваемые по оптоволоконному кабелю в центральное местоположение, где оборудование затем обрабатывает сигналы. Это позволяет обойти ограничения традиционного способа передачи беспроводных сигналов, связанного с необходимостью использования для каждого типа протокола (5G, Wi-Fi, сотовые) отдельного оборудования в месте расположения антенны.

Поэтому одной из приоритетных задач микроволновой фотоники является улучшение рабочей полосы и линейности модуляторов и фотодиодов [2–4]. В России также многие научные группы успешно создают готовые решения по трансляции сверхширокополосных сигналов по оптическому волокну на расстояния свыше 1 км. Несмотря на большой диапазон применений таких систем, проверка их работоспособности в реальных задачах требует больших финансовых и человеческих ресурсов.

В работе предлагается один из вариантов решений такой проблемы на примере передачи Wi-Fi сигнала на удаленное расстояние. Для разработчиков оптических трактов появится еще один метод проверки работоспособности оптических трактов в практическом приложении. При этом не нужно дополнительно выделять ресурсы на разработку цифровых протоколов, систем обработки сигналов — достаточно использовать стандартное интернет оборудование: Wi-Fi антенны и два телефона, а качество интернет соединения можно оценить готовыми бенчмарками.

Для передачи интернет-доступа с помощью сети Wi-Fi была собрана схема (рис. 1). В составе экспериментального макета использовались: РОС-лазеры (НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха) с мощностью излучения порядка 50 мВт, широкополосные фотодиоды (НПФ «Дилаз»), катушки с одномодовым волокном длиной 1 км, приемно-передающие Wi-Fi антенны, модуляторы Маха-Цендера с контроллером рабочей точки.

Точкой доступа можно было сделать Wi-Fi роутер, однако он имеет более мощный сигнал при этом является менее мобильным. Большая мощность передающего излучения — это важный фактор, ограничивающий системы на основе модуляторов. На рисунке 2 показаны зависимости разных уровней напряжения выходного сигнала от поданного на модулятор. Несмотря на работу в точке квадратуры при увеличении мощностей входных сигналов, старшие биты будут расположены более плотно.

Этот факт делает невозможным работу с более информационно-плотными форматами модуляции, но можно решить понижением изначальной передающей мощности, либо удалением антенны на большее расстояние. Другим фактором, ограничивающим возможности использования такой системы в экспериментах, может быть низкая выходная мощность фотодиода, что в принципе решается использованием усилителя. Однако такой подход несколько меняет линейные характеристики всей системы.

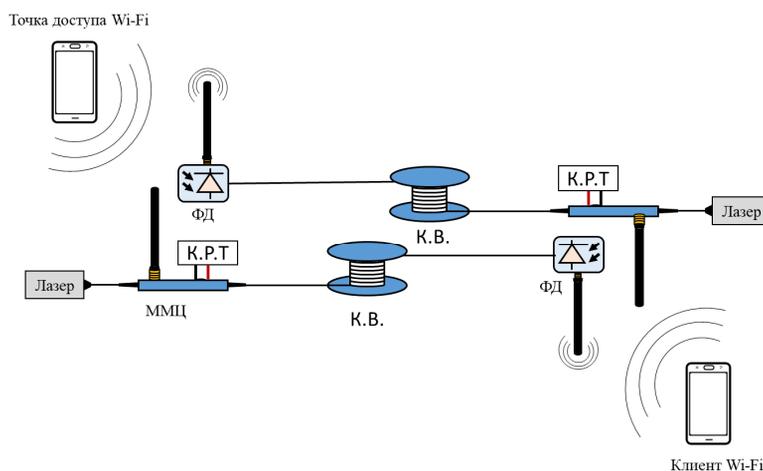


Рис. 1. Принципиальная схема передач удаленной точки доступа Wi-Fi по оптическому волокну: ММЦ — модулятор Маха-Цендера; К.Р.Т — контролер рабочей точки; К.В. — катушка оптического волокна; ФД — фотодиод

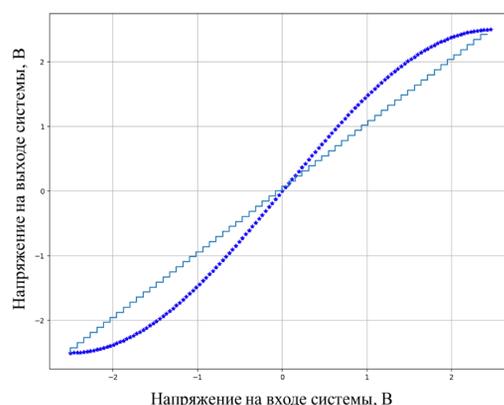


Рис. 2. Преобразования уровней напряжения цифрового сигнала после работы: идеальной системы (голубая линия), модулятора Маха-Цендера, работающего в окрестности квадратуры (синяя линия)

В целом, такого рода экспериментальные макеты могут быть отличным бюджетным решением для тестирования аналоговых оптических трактов, а при наличии средств переноса частоты могут быть отличным альтернативным способ сканирования работоспособности вдоль всего диапазона частот.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00898.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Aragon-Zavala, A.** Radio-over-Fiber Systems for Wireless Communications / A. Aragon-Zavala, G. Castanon, J. Beas// Recent Patents on Electrical Engineering. —2011. —Vol 4. —№ 2. —P. 114–124. —DOI: 10.2174/1874476111104020114
- [2] **Guo, Z.** Radio and Power over Fiber System for 4K/8K Satellite Antenna / Z. Guo, J. Liu and S. Shimamoto 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat), Batam, Indonesia. — 2020. — P. 154–158. — DOI: 1109/Comnetsat50391.2020.9328939.
- [3] **Agruzov, P.** The Optimal Operating Point for Linearizing an Integrated Optical Lithium Niobate Directional Coupler Modulator./ P. Agruzov, M. Parfenov, I. Ilchev, A. Varlamov, A. Tronev, A Shamrai//Photonics —2024. —Vol 11. —№1:48. — DOI: 10.3390/photonics11010048
- [4] **Небавский, В.А.** Методы линейризации аналоговых оптических трактов/ В.А. Небавский, Р. С. Стариков, П. А. Черемхин.D// Успехи современной радиоэлектроники. —2021. — Том 75. — № 12. — С. 42–62. — DOI: 10.18127/j20700784-202112-04

- [5] **Zemtsov, D. S.** Plasmon-Assisted Si-ITO Integrated Electro-Optical Rib-Shape Modulator/ I. A. Pshenichnyuk, S. S. Kosolobov, A. K. Zemtsova, D. M. Zhigunov, A. S. Smirnov, K. N. Garbuzov, V. P. Drachev// Journal of Lightwave Technology. — 2023. — Vol 41. — № 19. — P. 6310–6314. DOI: 10.1109/JLT.2023.

Wi-Fi-over-fiber

E. Yu. Zlokazov, M. Yu. Kazmin, V.A. Nebavskiy, V. G. Rodin, R. S. Starikov, D. A. Tretyakov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

The main task of the work was to demonstrate the possibility of transmitting Wi-Fi connections and connecting to the Internet via two optical links. The optical link included a DFB laser, a Mach-Zehnder modulator with an operating point controller and a photodiode. The Wi-Fi network was distributed using regular smartphones and Wi-Fi antennas that were connected to the modulators and photodiodes to transmit the signal along the optical link; the corresponding system was also assembled on the receiving device side to ensure both signal reception and transmission. Testing showed the functionality of the Internet connection, the system does not introduce significant ping, and the client device (smartphone) can successfully receive and transmit Internet traffic at speeds that meet 4G standards.

Keywords: *Microwave photonics, Radio-over-fiber, Optical link, Analogue optical link, Wi-Fi*

Содержание

Секция 1. Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы

1. Ламинированная радиально-градиентная элементная база тепловизионной оптики. <i>Грейсух Г.И., Левин И.А., Казин С.В.</i>	9
2. Казанская школа дифракционной оптики. <i>Павлычева Н.К., Белокопытов А.А., Иванов В.П., Лукин А.В., Макаева Р.Х., Мельников А.Н., Муслимов Э.Р., Саттаров Ф.А., Скочилов А.Ф., Файзрахманов И.А., Харинцев С.С.</i>	15
3. Формулировка Фурье-модального метода на основе явной записи граничных условий в координатном пространстве для одномерных и двумерных решеток со сложным профилем. <i>Спирidonov С.И., Щербаков А.А.</i>	18
4. Фокусировка гауссовых пучков и оптических вихрей кольцевыми решетками переменной высоты с GRIN-подложкой для формирования удлиненных световых фокальных отрезков. <i>Савельев Д.А.</i>	20
5. Матричный полнокадровый гиперспектрометр. Моделирование и эксперимент. <i>Пронин А.С., Скиданов Р.В., Успенцев Г.В.</i>	24
6. Оптические элементы на основе двулучепреломляющих микротрещок. <i>Рупасов А.Е., Кудряшов С.И., Богацкая А. В.</i>	27
7. Структурированные элементы с высокими дифракционными свойствами в широком угловом диапазоне. <i>Соколов П.П., Ворзобова Н.Д.</i>	30
8. Исследование режимов генерации лазера с распределенной обратной связью на основе волоконной брэгговской решетки, индуцированной в оптическое волокно, легированное ионами эрбия. <i>Моор Я.Д., Коннов Д.А., Коннов К.А., Куликов А.В., Варожель С.В.</i>	32
9. Лазерно-голографические методы, устройства и комплексы для визуализации больших газодинамических полей. История развития направления в Государственном институте прикладной оптики (памяти А.Ф. Белозёрова и Л.Т. Мустафиной). <i>Иванов В.П., Лукин А.В., Мельников А.Н., Шигапова Н.М.</i>	34
10. Оптические пространственные фильтры для управления шириной выделенных контуров объекта. <i>Хорин П.А., Ивлиев Н.А., Хонина С.Н.</i>	36
11. Численный анализ распределения интенсивности вдоль оптической оси для непараксиальных дифракционных линз. <i>Дюкарева О.А., Устинов А.В.</i>	40
12. Струйная печать фотонных структур с магниточувствительной самосборкой. <i>Смирнов А.А., Погосян Т., Поваров С.А., Гунина Е.В., Милчико В.А., Морозов М.И., Виноградов А.В.</i>	42
13. Формирование отражательных дифракционных решеток методом сухого электронно-лучевого травления резиста. <i>Сидоров Ф.А., Рогожин А.Е.</i>	45
14. Студия волнографии. <i>Барышников А.А., Юрченкова В.Ю., Семенов С.С., Кузнецов В.П.</i>	47
15. Регистрация во встречных пучках рельефных голографических решеток на светочувствительном материале ПФГ-01. <i>Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Ильюшина Д.А., Маурер И.А.</i>	49

Секция 2. Оптика лазерных пучков и структурированного света

16. Датчик Шэка — Гартмана как универсальный измеритель. <i>Бальбасова Л.А., Лукин В.П.</i>	53
17. Особенности интерференции оптических вихрей высших порядков с гауссовым пучком. <i>Венедиктов В.Ю., Павелина М.Е., Рыжая А.А., Северюгин А.А., Шальмов Е.В., Юрьева Е.К.</i>	55
18. Проблемы голографического телевидения и 3D-дополненной реальности. <i>Шойдин С.А., Пазов А.Л.</i>	59
19. Мощные терагерцовые вихревые бесселевы пучки, сформированные аксиконами с бинарным и кусочно-непрерывным рельефами на Новосибирском ЛСЭ. <i>Осинцева Н.Д., Колменок М.С., Павельев В.С., Герасимов В.В., Чопорова Ю.Ю., Тукмаков К.Н., Князев Б.А.</i>	62
20. Регулируемый оптический изолятор на основе эффекта Фарадея. <i>Козодаев Д.А., Погоньшев А.О., Пцелко Н.С., Пцелко О.С., Трусов М.А.</i>	66
21. Моделирование процессов формирования и распространения оптических вихревых пучков, излучаемых микрокольцевыми резонаторами (МКР). <i>Багманов В.Х., Бакирова Л.И., Воронков Г.С., Любобытов В.С.</i>	69

Секция 3. Системы визуализации и отображения информации для AR/VR

22. Оптические решения для современных устройств дополненной реальности: игра компромиссов. <i>Алексеев А.М., Алексеев Е.М., Никоноров Н.В.</i>	75
23. Применение голографических волноводных перископов при разработке HUD дисплеев. <i>Путинин А.Н., Копёнкин С.С., Путинин Н.А., Дубынин С.Е., Бородин Ю.П.</i>	80
24. Исследование режимов дифракции в волноводных голографических перископах в схемах HMD и HUD дисплеев. <i>Путинин Н.А., Дубынин С.Е., Путинин А.Н., Копёнкин С.С., Бородин Ю.П.</i>	84
25. Исследование искажений изображения, полученного в проекционной системе с голограммным зеркалом. <i>Янь Ч., Шишова М.В.</i>	88
26. Разработка окуляра с вынесенным зрачком для AR-устройства. <i>Соломашенко А.Б., Афанасьева О.Л., Тимашова Л.Н.</i>	93
27. Применение технологий вспомогательной реальности для телемедицины: текущее состояние и перспективы. <i>Вальщиков Е.Ю., Афанасьева О.Л.</i>	96

Секция 4. Оптические защитные технологии

28. Неклонированный защитный знак основанный на лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур. *Москвин М.К., Прокофьев Е.В., Учанова Д.Д., Долгополов А.Д., Синев Д.А., Романова Г.В.* 101

Секция 5. Интегральная фотоника и оптические коммуникации

29. Генерация комбинаций вихревых мод средствами интегральной фотоники. *Кутлуяров Р.В., Степанов И.В., Любопыттов В.С.* 105
30. Исследование быстродействия электрооптического модулятора на кольцевом микрорезонаторе из тонкопленочного ниобата лития на изоляторе. *Кобцев Д.М., Венедиктов И.О., Святодух С.С., Ковалюк В.В., Гольцман Г.Н.* 108
31. Интегрально-оптический СВЧ-модулятор на основе квази-одномодового волновода на подложке тонкопленочного ниобата лития. *Парфенов М.В., Варламов А.В., Ильичев И.В., Усикова А.А., Задиранов Ю.М., Тронева А.В., Агзузов П.М., Шамрай А.В.* 111
32. Влияние анизотропии на спектральную характеристику оптического резонатора из ниобата лития. *Москалев Д.Н., Криштон В.В.* 114
33. Подавление антифазных границ в GaAs, выращенном на подложке «кремний-на-изоляторе» через буферные слои $A^{III}B^V/Ge$. *Суиков А.А., Юрасов Д.В., Крюков Р.Н., Павлов Д.А.* 116
34. Интегральный плазмонный электро-абсорбционный модулятор на платформе кремний-на-изоляторе. *Земцов Д.С., Пшеничный И.А., Земцова А.К., Смирнов А.С., Жигунов Д.М., Гарбузов К.Н., Косолобов С.С., Драчев В.П.* 118
35. Свойства нитрида кремния легированного атомами эрбия. *Подлесных И.М., Ковалев М.С., Тархов М.А., Кудряшов С.И.* 121
36. Сравнение двух подходов к расчету интерференционных логических элементов на фотонно-кристаллических структурах. *Кривошеева Ю.Ю., Головашкин Д.Л., Павельев В.С.* 124
37. Разработка микро-опто-электромеханического модулятора. *Галанова В.С., Святодух С.С., Голиков А.Д., Ковалюк В.В., Горин Д.А., Гольцман Г.Н.* 126
38. Способ размещения квантовых точек CdSe/CdS/ZnS на волноводах из нитрида кремния. *Касимов Р.Х., Аржанов А.И., Седых К.О., Голиков А.Д., Галанова В.С., Ковалюк В.В., Наумов А.В., Гольцман Г.Н.* 130
39. Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп с модулятором двулучепреломления. *Кубланова И.Л., Куликов А.В.* 134

Секция 6. Интерферометрия и оптическая метрология

40. Метрологическое обеспечение средств измерений толщины оптических покрытий. *Вишняков Г.Н., Минаев В.Л., Самоilenko А.А.* 139
41. К вопросу применения средств электронной спекл-интерферометрии для исследования вибрационных характеристик конструкций ГТД. *Жужукин А.И.* 145
42. Дифракционный рефрактометр для характеристики образцов жидкостей. *Белусов Д.А.* 147
43. Интерферометры фазового сдвига для контроля отклонений от плоскостности крупногабаритных оптических деталей. *Фандиенко И.Ю.* 153
44. Мобильный цифровой спекл-интерферометр для исследования связанных колебаний элементов конструкции роторных системы. *Ивчиенко А.В., Жужукин А.М., Сергеев Р.Н.* 155
45. Особенности метрологического обеспечения в области измерений параметров отклонений формы оптических асферических поверхностей. *Новиков Д.А.* 157
46. О возможности применения неравноплечего лазерно-голографического интерферометра для имитационного моделирования процесса космологического «старения» света. *А. В. Лукин* 159
47. О необходимости учета влияния интерференции в тонких пленках на эффективность голограмм, регистрируемых на тонких светочувствительных слоях. *Ганжерли Н.М., Макаева Р.Х., Царева А.М.* 161
48. Система поиска отраженного луча макета эталонного дальномера до 600 м. *Соколов Д.А., Козаченков С.А.* 163
49. Инновационные технологии при исследовании динамических напряжений в оптических материалах. *Акбарова Н.А., Азаматов З.Т., Махмудов С.А.* 166
50. Инновационные подходы в интерферометрическом контроле качества оптических поверхностей. *Миралиева А.К., Рахимова Н.М., Юнусова М.Р.* 170
51. Оценка метрологических характеристик системы лазерной измерительной ВЗ-ИЛТ. *Лавров Е.А., Донченко С.С., Соколов Д.А., Гунин П.М., Алекперова Б.Р.* 175
52. Анализ точностных возможностей реализации метода дифференциального рассеяния. *Машошин Д.А., Денисов Д.Г.* 179

Секция 7. Квантовые оптические технологии

53. Инженерия квантовых состояний света в схемах с измерениями. *Голубева Т.Ю., Башмакова Е.Н., Зинатуллин Э.Р., Королев С.Б., Ващукевич Е.А.* 183
54. Теоретические аспекты волнового смещения в каскадной системе кубитов. *Елистратов А.А., Ремизов С.В.* 185
55. Параметрический усилитель бегущей волны как источник неклассических состояний фотонов. *Ремизов С.В., Елистратов А.А., Лебедев А.В.* 187

56. Учет влияния разной эффективности детекторов для установки с пассивным выбором базиса в случае квантового канала спутник земля. <i>Ивченко Е.И., Трушечкин А.С., Хмелев А.В., Курочкин В.Л.</i>	189
57. Эффективное обучение модели фотонного процессора со сложной интерферометрической структурой. <i>Кондратьев И.В., Урусова К.Н., Аргенчиев А.С., Ключников Н.С., Кузьмин С.С., Скрабин Н.Н., Дьяконов И.В., Страупе С.С., Кулик С.П.</i>	191
58. Изучение термооптических свойств ниобата лития на изоляторе при криогенных температурах. <i>Венедиктов И.О., Кобцев Д.М., Святодух С.С., Голиков Д.А., Ковалюк В.В., Гольцман Г.Н.</i>	194
59. Определение оптимального временного окна фильтрации квантовых сигналов. <i>Чернов А.Н., Курочкин В.Л., Хмелев В.Л.</i>	198
60. Изменение характеристик SSPD с защитным покрытием из ИТО под влиянием радиочастотного поля. <i>Седых К.О., Сулеймен Е., Святодух С.С., Голиков Д.А., Подлесный А.С., Флоря И.Н., Ковалюк В.В., Лахманский К. Е., Гольцман Г. Н.</i>	201

Секция 8. Технологии микро- и наноструктурирования

61. Современные лазерные технологии в художественной практике. <i>Вейко В.П.</i>	207
62. Сочетание двухслойного материала и двухэтапного травления — ключ к идеальной лазерной термохимической технологии бинарных синтетированных голограмм. <i>Белюсов Д.А., Куц Р.И., Корольков В.П.</i>	210
63. Модификация структуры фоточувствительных борогерманатных стекол фемтосекундными лазерными импульсами. <i>Долгополов А.Д., Хромых И.Ю., Гресько В.Р., Сергеев М.М., Москвин М.К.</i>	216
64. Создание энергонезависимых перестраиваемых элементов фотоники на основе лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур. <i>Лазаренко П.И., Ковалюк В.В., Меньшиков Е.В., Смаев М.П., Проходцов А.И., Голиков А.Д., Синев И.С., Козюхин С.А.</i>	218
65. Фемтосекундное лазерное формирование анизотропного иерархического нанорельефа на поверхности халькогенидных стеклообразных полупроводников. <i>Шулейко Д.В., Пепеляев Д.В., Кузьмин Е.В., Пахольчук П.П., Кункель Т.С., Заботнов С.В., Кашкаров П.К.</i>	220
66. Генерация наночастиц металлов методом лазерно-индуцированного прямого переноса и их применение. <i>Ултургашева Е.В., Настулявичус А.А., Толордава Э.Р., Кудряшов С.И.</i>	222
67. Технология создания оптических линз в объеме кварцевого стекла с помощью фемтосекундной лазерной записи. <i>Красин Г.К., Кузьмин Е.В., Ковалев М.С., Кудряшов С.И.</i>	225
68. Воздействие на алмаз ультракоротких лазерных импульсов с длинами волн, соответствующими пикам его собственного поглощения. <i>Пахольчук П.П., Смирнов Н.А., Буслеев Н.И., Горевой А.В., Данилов П.А., Винс В.Г., Кудряшов С.И.</i>	228
69. Дифракционная решетка Pd/PdO как сенсорный элемент на водород. <i>Шелаев А.В., Барышев А.В., Куликова Д.П.</i> ..	231
70. Экспресс-формирование ГКР-активных слоев для фотонной сенсорики. <i>Дубков С.В., Новиков Д.В., Новосельцев А.И., Лебедев Е.А., Тарасов А.М., Меденков Г.А., Меденков Г.А., Чумаченко Ю.В., Волкова Л.С., Гришин Т.С., Громов В.Д., Гаврилов С.А.</i>	232
71. Прямое лазерное интерференционное паттернирование нанорешеток 2D-дихалькогенидов переходных металлов (TMD). <i>Калганова А.О., Аверченко А.В., Аббас О.А., Салимон И.А., Жаркова Е.В., Красников Д.В., Маилис С., Лагуодакис П.Г.</i>	235
72. Лазерная микро- и нанофабрикация — от гибридных материалов до защитных меток. <i>Агеев Э.И., Ларин А.О., Кустов П.Н., Ярошенко В.В., Зуев Д.А.</i>	237
73. Исследование динамики делительной машины маятникового типа с учетом влияния бицилиндрической геометрии формирующей рабочей кромки алмазного резца. <i>Бородин В.М., Карнов А.И., Крнев В.А., Лукин А.В., Мельников А.Н.</i>	239
74. Измерение нелинейно-оптических свойств кремния при воздействии ультракоротких лазерных импульсов ИК-диапазона (1–2,4 мкм). <i>Смирнов Н.А., Кудряшов С.И., Буслеев Н.И., Гулина Ю.С., Пахольчук П.П., Котенев Т.Ю.</i>	241
75. Модуляция периода лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на тонких титановых пленках для управления тензочувствительностью. <i>Васильев М.Д., Синев Д.А.</i>	243
76. Лазерное нано/микроструктурирование и сверхлегирование кремния. <i>Настулявичус А.А., Кудряшов С.И., Ултургашева Е.В., Ковалев М.С., Сценуро Н.Г., Подлесных И.М.</i>	245

Секция 9. Цифровая голография и методы визуализации

77. Фантомная микроскопия: на пути к трехмерной визуализации. <i>Вьюнышев А.М., Давлетишин Н.Н., Чиркин А.С.</i>	249
78. Двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия контроля обращенных к плазме защитных элементов токамака «Глобус-М». <i>Алексеев И.В., Кожевникова А.М., Раздобарин А.Г., Елец Д.И., Медведев О.С., Шубин Я.Р.</i>	250
79. Разработка одноэкспозиционного цифрового голографического микроскопа на основе линзы с эффектом геометрической фазы. <i>Черных А.В., Езерский А.С., Петров Н.В.</i>	252
80. Исследование нелинейных упругих волн с помощью цифровых голографических методов и ультразвуковой диагностики. <i>Жихорева А.А., Белашов А.В., Семенова И.В., Бельтюков Я.М.</i>	254

Секция 10. Современные функциональные оптические материалы

81. Технологические подходы создания рельефно-фазовых и голографических дифракционных решеток для устройств дополненной реальности: сравнительный анализ. <i>Алексеев Е.М., Алексеев А.М., Никоноров Н.В.</i>	259
82. Нанопористые силикатные матрицы для оптических экспериментов и высокочувствительной диагностики. <i>Андреева О.В., Щелканова И.Ю., Пономарёва В.А., Исмаилов А.О., Андреева Н.В., Сизова С.А., Мельник М.В., Цылкин А.Н.</i>	262
83. Жидкокристаллические полимерные материалы с фото- и механически-управляемыми оптическими свойствами. <i>Баленко Н.В., Бобровский А.Ю., Шибеев В.П.</i>	267
84. Динамические фоторефрактивные голограммы в диффузионно-легированных кристаллах ниобата лития: технология и применение. <i>Шандаров С.М., Колмаков А.А., Анисимов Р.И., Коков Э., Темерева А.С., Буримов Н.И.</i>	270
85. Модификация поверхности фото-термо-рефрактивного стекла методами ионного обмена и химического травления. <i>Никоноров Н.В., Алхалаби Х., Марасанов Д.В., Сгибнев Е.М.</i>	274
86. Наноостровковые пленки серебра, сформированные на поверхности стекла методом Na^+/Ag^+ ионного обмена: свойства и применения. <i>Сгибнев Е. М., Шелаев А. В., Никоноров Н. В., Барышев А. В.</i>	277
87. Магнитостимулированное изменение люминесценции кристаллов фосфида галлия. <i>Скворцова А.А., Волкова Л.В., Каленков С.Г., Нефедова С.М., Скворцов А.А.</i>	279
88. Мономеры с высоким показателем преломления в голографических фотополимерных материалах. <i>Шелковников В.В., Васильев Е.В., Бухтоярова А.Д., Деревянко Д.И., Бережная В.Н., Каргаполова И.Ю., Шундрин И.К.</i>	282
89. Эффект пост-экспозиционного набухания голографических фотополимерных материалов. <i>Деревянко Д.И., Пен Е.Ф., Шелковников В.В.</i>	287
90. Междисциплинарная группа изобразительной и прикладной цветной голографии. <i>Семенов С.С., Кузнецов В.П., Барышников А.А., Юрченкова В.Ю., Шевцов М.К., Стафеев С.К., Андреева О.В., Москвин М.К., Рабош Е.В., Балбекин Н.С., Петров Н.В., Дёмин В.В., Березкина Ю.А., Шаров Д.Д., Акилов А.А.</i>	290
91. Возможности использования 2D-3D гетероперехода $\text{MoS}_2/\text{p-Si}$ для детектирования излучения малой интенсивности видимого диапазона. <i>Жаркова Е.В., Аверченко А.В., Аббас О.А., Салимон И.А., Калганова А., Красников Д.В., Маилис С., Лагудакис П.Г.</i>	292
92. Рельефно-фазовые дифракционные микроструктуры в слоях позитивного ESCAP фоторезиста на основе неионных фотогенераторов кислот. <i>Деревяшкин С.В., Конорев В.А., Агафонцев А.М., Бухтоярова А.Д., Гурская Л.Ю., Байраш А.С., Пен Е.Ф., Шелковников В.В., Васильев Е.В.</i>	296
93. Двухфотонная голографическая запись микроструктур в позитивный ESCAP фоторезист. <i>Васильев Е.В., Деревяшкин С.В., Агафонцев А.М., Конорев В.А., Шелковников В.В., Пен Е.Ф., Бухтоярова А.Д., Гурская Л.Ю.</i>	298
94. Объединение технологий ионного обмена и фото-термо-индуцированной кристаллизации ФТР стекла для создания волноводных структур и дифракционных элементов ввода-вывода излучения. <i>Попова В.А., Никоноров Н.В., Марасанов Д.В.</i>	300
95. Влияние температуры на фотохромные свойства пленок бактериородопсина. <i>Лантух Ю.Д.</i>	304

Секция 11. Биопотоника

96. Анализ реакции клеток на фотодинамическое воздействие с использованием голографической микроскопии, SLIM и FLIM. <i>Семенова И.В., Белашов А.В., Жихорева А.А.</i>	309
97. Разработка сенсоров жидкостной/газовой биопсии на основе фотонных интегральных схем и микрофлюидики для биомедицинских применений. <i>Кузин А.Ю., Чернышев В.С., Флоря И.Н., Ковалюк В.В., Голиков А.С., Васильев С.Н., Гольцман Г.Н., Горин Д.А.</i>	313
98. Инкапсуляция полупроводниковых квантовых точек AgInS_2 в биологические наночастицы для увеличения эффективности терапии онкологических заболеваний. <i>Горбачева В.И., Резник И.А., Колесова Е.П.</i>	316
99. Формирование дифракционных оптических элементов на торцевой поверхности волоконных световодов. <i>Федяй В.Е., Терентьев В.С., Симонов В.А., Корольков В.П., Бронников К.А., Бабин С.А., Кучмижак А.А., Достовалов А.В.</i>	318
100. Рефрактометрические свойства коллагена, измеренные на выделенных длинах волн видимого и ближнего ИК-диапазонов. <i>Лазарева Е.Н., Тучин В.В.</i>	321
101. Разработка мультимодальных подходов на основе МРТ и флуоресцентного имиджинга для мониторинга резорбции имплантируемых композитных сополимерных материалов. <i>Жердева В.В., Лихов А.Р., Апухтина У.А., Володина В.Н., Тучин В.В.</i>	324
102. Высокочувствительная сенсорная платформа на основе комбинации ФИС с микрофлюидными каналами для анализа комплексного показателя преломления двухкомпонентных жидкостей. <i>Флоря И.Н., Кузин А.Ю., Чернышев В.С., Ковалюк В.В., Голиков А.С., Васильев С.Н., Горин Д.А., Гольцман Г.Н.</i>	326
103. Изучение биоинтеграции углеродных имплантируемых материалов с различными покрытиями с использованием магнитно-резонансной томографии. <i>Зайцев П.Е., Скрыбин А.С., Шакуров А.В., Жердева В.В.</i>	330
104. Изучение биологического и терапевтического эффекта виндебуринола на мышинных моделях рассеянного склероза. <i>Володина В.Н., Зайцев П.Е., Струкова В.А., Борец Л.С., Макаров В.А., Жердева В.В.</i>	333
105. Метод прижизненной визуализации локусов генома флуоресцентными сенсорами на основе семейства эндонуклеаз dCas9. <i>Абушинова Г.А., Жердева В.В., Малошенко Л.Г.</i>	335

Секция 12. Новые прикладные оптические технологии

106. Исследование погрешности оптико-электронной системы контроля величины хорды рабочих лопаток паровых турбин на закрытом цилиндре при валоповороте. <i>Кортаев В.В., Родикова Л.С., Тимофеев А.Н.</i>	339
107. Формирование и релаксация голограмм и люминесцирующих структур в результате фотопревращений и движения наночастиц. <i>Вениаминов А.В., Бородина Л.Н., Борисов В.Н.</i>	342
108. Адресные комбинированные волоконно-оптические структуры как универсальная платформа для создания сенсорных систем. <i>Аглиуллин Т.А., Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г., Валеев Б.И.</i>	344
109. Метод одноэкспозиционного голографического формообразования в объеме материала. <i>Ворзобова Н.Д., Соколов П.П.</i>	351
110. Расчет системы световозвращателей для задачи измерения параметров орбиты МКА. <i>Баишкатов Г.В., Животовский И.В.</i>	353
111. Разработка, изготовление и исследование инфракрасных интерференционных фильтров для спектрального диапазона от 2 до 20 мкм. <i>Тропин А.Н., Тропина Н.А.</i>	355
112. Конфокальная лазерная микроскопия субдифракционной структуры изобразительных голограмм. <i>Бородина Л.Н., Рабош Е.В., Волинский М.А., Петров Н.В., Вениаминов А.В.</i>	363
113. Голографическая релаксометрия и восстановление люминесценции наночастиц. <i>Бородина Л.Н., Осколкова Т.О., Арефина И.А., Дубовик А.Ю., Вениаминов А.В.</i>	366
114. Результаты ускоренных испытаний на сохраняемость линз с реставрированными асферическими рабочими поверхностями. <i>Лукин А.В., Мельников А.Н., Лисова Е. Г., Гурин Н.А., Свистунов А.А.</i>	370
115. Расчет и проектирование эталона цветности. <i>Сагателян Г.Р., Пискунова Е.Р., Кузнецов А.С.</i>	373

Секция 13. Оптико - цифровые информационные системы и оптические коммуникации

116. Погрешность оптических вычислений в 4f-схеме с жидкокристаллическими модуляторами света. <i>Скиданов Р.В., Ханенко Ю.В., Морозов А.Е., Порфирьев А.П., Пронин А.С., Сорокин Д.М.</i>	379
117. Калибровка 4f-системы для оптических вычислений в режиме оптических нейронных систем. <i>Ханенко Ю.В., Скиданов Р.В., Порфирьев А.П.</i>	384
118. Wi-Fi через волокно. <i>Злоказов Е.Ю., Казьмин М.И., Небавский В.А., Родин В.Г., Стариков Р.С., Третьяков Д.А.</i> ..	387
119. Фильтры с заданной формой корреляционного пика для инвариантных оптико-цифровых корреляторов с нейросетевой постобработкой. <i>Павленко Д.В., Злоказов Е.Ю., Стариков Р.С., Черёмхин П.А.</i>	391

Научное издание

ХОЛОЭКСПО 2024

XXI Международная конференция
по голографии и прикладным оптическим технологиям

(Казань, 9–13 сентября 2024 года)

Тезисы докладов

Художник Э.Ш. Мурадова

Компьютерная верстка Г.Ю. Молотковой

Оригинал-макет подготовлен

в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 16.10.2024. Формат 210 × 297.

Усл. печ. л. 24,86. Тираж 50 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

press@bmstu.ru

<https://press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

В сборнике представлены тезисы докладов XXI Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям ХОЛОЭКСПО 2024 (Казань, 9–13 сентября 2024 г.) по следующим тематикам: тенденции развития оптических технологий, дифракционные и градиентные оптические элементы и системы, оптика лазерных пучков и структурированного света, системы визуализации и отображения информации для AR/VR, оптические защитные технологии, интегральная фотоника, интерферометрия и оптическая метрология, квантовые оптические технологии, технологии микро- и наноструктурирования, цифровая голография и методы визуализации, современные функциональные оптические материалы, биофотоника, новые прикладные оптические технологии, оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации.

ISBN 978-5-7038-6441-8



holoexpo.ru



press.bmstu.ru

