

ХОЛОЭКСПО 2026

Предварительная программа

Возможны изменения в последовательности докладов и/или секций

01.06.2026

Содержание

[Содержание](#)

[Спонсоры и партнеры](#)

[Программный комитет](#)

[Архитектура программы](#)

[Пленарное заседание «Тенденции развития оптических технологий». Часть 1](#)

[Пленарное заседание «Тенденции развития оптических технологий». Часть 2](#)

[Секция 1 Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 2 Оптика лазерных пучков и структурированного света](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 3 Системы визуализации и отображения информации для AR/VR](#)

[Устные доклады](#)

[Секция 4 Оптические защитные технологии](#)

[Устные доклады](#)

[Секция 5 Интегральная фотоника](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 6 Интерферометрия и оптическая метрология](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 7 Квантовые оптические технологии](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 8 Технологии микро- и наноструктурирования](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 9 Цифровая голография и методы визуализации](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 10 Современные функциональные оптические материалы](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 11 Биоптоника](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 12 Оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 13 Новые прикладные оптические технологии](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 14 Нейросетевые технологии в фотонике](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

[Секция 15 Терагерцовая фотоника](#)

[Устные доклады](#)

[Стендовые доклады](#)

Спонсоры и партнеры

Платиновый спонсор

АО «НПО «КРИПТЕН»

Бронзовые спонсоры

АО НТЦ «Атлас»

ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»

ООО «ХолоГрэйт»

Партнеры

АО «НПО «ГИПО»

ООО «Альянс Оптических Систем»

ООО «Оптико-голографические приборы»

ООО «ЦЕНТР КОМПЬЮТЕРНОЙ ГОЛОГРАФИИ»

Информационные партнеры

Лазерная ассоциация

Оптическое общество имени Д. С. Рождественского

Научно–техническое издание «Оптический журнал»

Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана»

Журнал «Фотоника»

«Голографика»

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Программный комитет

Председатель программного комитета **Венедиктов Владимир Юрьевич**, д. ф.-м. н., профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.

Заместитель председателя программного комитета **Грейсух Григорий Исаевич**, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой физики и химии Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, Пенза, Россия.

Танин Леонид Викторович, Почетный член программного комитета, д. ф.-м. н., академик Международной инженерной академии (МИА), член Совета президентов МИА, главный советник ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Беларусь

Павлычева Надежда Константиновна, Почетный член программного комитета, д. т. н., профессор Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия.

Барышников Николай Васильевич, д. т. н., профессор, директор НИИ РЛ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

Вишняков Геннадий Николаевич, д. т. н., профессор, заведующий лабораторией ФГУП «Всероссийской научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», Москва, Россия.

Голубева Татьяна Юрьевна, д. ф.-м. н., профессор кафедры Общей физики-1 Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

Демин Виктор Валентинович, к. ф.-м. н., доцент, первый проректор Национального исследовательского Томского государственного университета, Томск, Россия.

Драчев Владимир Прокопьевич, д. ф.-м. н., Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия.

Захаров Юрий Николаевич, к. ф.-м. н., преподаватель медицины Гарвардской медицинской школы, Старший научный сотрудник BIDMC Центра передовой биомедицинской визуализации и фотоники, Гарвардский университет, Бостон, США

Злоказов Евгений Юрьевич, д. ф.-м. н., 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, д. т. н., заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия.

Кортаев Валерий Викторович, д. т. н., профессор Университета ИТМО, главный редактор Оптического журнала, Санкт-Петербург, Россия.

Котляр Виктор Викторович, д. ф.-м. н., профессору кафедры технической кибернетики СГАУ, заведующему лабораторией лазерных измерений ИСОИ РАН, Самара, Россия

Кудряшов Сергей Иванович, д. ф.-м. н., 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.

Кутлюяров Руслан Владимирович, к. т. н., директор Школы перспективных исследований и технологий фотоники Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Россия

Лукин Владимир Петрович, д. ф.-м. н., заведующий лабораторией ИОА СО РАН, Томск, Россия.

Никонов Николай Валентинович, д. ф.-м. н., профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Петров Виктор Михайлович, д. ф.-м. н., главный научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия.

Петров Николай Владимирович, д. ф.-м. н., руководитель лаборатории цифровой и изобразительной голографии, профессор Университета ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Путилин Андрей Николаевич, к. ф.-м. н., Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия.

Скиданов Роман Васильевич, д. ф.-м. н., профессор, Институт систем обработки изображения РАН — филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самарский аэрокосмический университет имени С. П. Королева, Самара, Россия.

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

Страупе Станислав Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент кафедры Квантовой электроники, Отделение радиофизики, Физический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

Тучин Валерий Викторович, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., заведующий кафедрой оптики и биофотоники, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия.

Шамрай Александр Валерьевич, д. ф.-м. н., заведующий лабораторией квантовой электроники Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Владимир Яковлевич Шур, д. ф.-м. н., профессор, директор УЦКП "Современные нанотехнологии", Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия.

Николай Александрович Ушаков, д. ф.-м. н., профессор института электроники и телекоммуникаций, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

Назар Александрович Николаев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Терагерцовой фотоники, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия.

Сергей Владимирович Макаров, д. ф.-м. н., профессор, заведующий лабораторией Гибридной Нанофотоники и Оптоэлектроники, директор Инжинирингового Центра Фотоники и Оптоэлектроники, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.

Архитектура программы

Дата, Время	Зал "Летний"	Зал "Весенний"	Зал "Времена года I"	Холл
7 сентября, понедельник				
10:00–15:00	Экскурсия №1 Обзорная экскурсия: Ганина яма, обелиск Европа-Азия, Екатеринбург			
15:00–18:00				Регистрация участников
19:00–22:00	Приветственный коктейль в формате фуршета в ресторане 18/11			
8 сентября, вторник				
08:30–17:30				Регистрация участников
09:00–09:30	Открытие и приветствия			
9:30–11:00	Пленарное заседание (Часть 1)			
11:00–11:30	Кофе-брейк			
11:30–13:00	Пленарное заседание (Часть 1)			
13:00–14:00	Обед			
14:00–16:00	Секция 1	Секция 10 (Часть 1)	Секция 5	Демозона
16:00–16:30	Кофе-брейк			
16:30–18:00	Секция 4	Секция 10 (Часть 2)	Секция 12	Демозона
19:00–22:00	Социальная активность (Квиз, Бильярд, Йога)			
9 сентября, среда				
09:00–18:00				Регистрация участников
9:30–11:00	Пленарное заседание (Часть 2)			
11:00–11:30	Кофе-брейк			
11:30–13:00	Пленарное заседание (Часть 2)			
13:00–14:00	Обед			
14:00–16:30	Секция 7	Секция 2	Секция 9	Демозона
16:30–17:00	Кофе-брейк			
17:00–18:30	Секция 11	Секция 8		Демозона
18:30–19:30				Стендовые доклады
20:00–22:00	Социальная активность (Бильярд, Йога)			
10 сентября, четверг				
09:00–11:00				Регистрация участников
09:30–11:30	Секция 3		Секция 6 (Часть 1)	Демозона
11:30–12:00	Кофе-брейк			
12:00–13:30	Секция 15		Секция 6 (Часть 2)	Демозона
13:30–14:30	Обед			
14:30–16:45	Секция 14		Секция 13	Демозона
17:00–17:30	Закрытие конференции			
18:30–22:30	Торжественный ужин			
11 сентября, пятница				
10:00–18:00	Экскурсия №2 Металлургия сквозь века: от кричного молота до цифрового завода			
09:00–19:00	Экскурсия №3 Медь и Золото Урала			

Пленарное заседание «Тенденции развития оптических технологий». Часть 1

П.1 Нелинейные фотонные кристаллы на основе сегнетоэлектриков с периодической доменной структурой

Шур Владимир Яковлевич, д. ф.-м. н., профессор, А. Р. Ахматханов, М. А. Чувакова,
Б. И. Лисых, М. С. Кособоков
Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Представлены последние достижения в области создания 2D и 3D нелинейных фотонных кристаллов на основе периодически поляризованных сегнетоэлектриков с регулярной доменной структурой и их использования для генерации второй гармоники, параметрической генерации света и генерации спутанных фотонных пар. Особое внимание уделено созданию доменных структур и волноводов в объеме сегнетоэлектриков сильно сфокусированным излучением фемтосекундного лазера ближнего инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: Оптика, преобразование частоты света, генерация второй гармоники, сегнетоэлектрические домены, генерация спутанных фотонных пар, доменная инженерия

П.2 Квантовые пределы чувствительности в оптических и оптомеханических измерениях

Фарит Явдатович Халили, д. ф.-м. н., профессор МГУ, руководитель группы РКЦ
Российский Квантовый Центр, Москва, Россия

Квантовая механика налагает иерархию ограничений на точность оптических измерений. Наиболее известными из них является предел дробового шума, создаваемый квантовыми флуктуациями фазы света. При достаточно больших значениях оптической мощности начинает также сказываться возмущение объекта, создаваемое квантовыми флуктуациями числа квантов. Это приводит к появлению еще одного характерного ограничения чувствительности -- стандартного квантового предела. Чувствительность наиболее совершенных современных оптомеханических устройств, в частности лазерных детекторов гравитационных волн, примерно соответствует этому пределу.

Известно, однако, что оба упомянутых предела не являются истинно фундаментальными и могут быть преодолены, в частности, путем использования неклассических состояний света. В то же время, строгая оптимизация квантового шума позволяет выявить более глубокие ограничения чувствительности, такие, как предел Гейзенберга и т.н. диссипативный квантовый предел.

П.3 Фотоника единичных квантовых излучателей — основа оптической наноскопии и квантовой сенсорики

Андрей Витальевич Наумов, д. ф.-м. н., член-корреспондент РАН
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
МПГУ, Москва, Россия

П.4 Информация в квантовой микроскопии: оценка разрешения и учет ограничений

Александр Борисович Михальчев, д. ф.-м. н., доцент, ведущий научный сотрудник центра
«Квантовая оптика и квантовая информатика»
Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

П.5 Состояние и перспективы развития аналоговых фотонных вычислительных устройств

Николай Львович Казанский, д. ф.-м. н., профессор, ведущий научный сотрудник
Самарский университет, Самара, Россия

П.6 Методы терагерцовой фазовой визуализации: обзор современное состояния и применений

Николай Владимирович Петров, д. ф.-м. н., профессор
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Harbin Institute of Technology, Харбин, Китай

Пленарное заседание «Тенденции развития оптических технологий». Часть 2

П.7 Голография в современном оптическом производстве

Олег Борисович Яковлев, главный оптик

Уральский Оптико-Механический Завод, Екатеринбург, Россия

П.8 Управляемая прозрачность биологических тканей: новые горизонты биофотоники

Валерий Викторович Тучин, член-корреспондент РАН, профессор, д. ф.-м. н., заведующий кафедрой оптики и биофотоники

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Институт проблем точной механики и управления ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия

Представлены физические принципы метода оптического просветления биологических тканей, которые рассматриваются как дисперсионные среды с сильным многократным рассеянием и поглощением молекул воды, белков, гемоглобина, билирубина, каротиноидов, меланина, липидов и др. Метод основан на краткосрочном и обратимом подавлении многократного рассеяния и поглощения при действии оптических иммерсионных агентов. Обсуждается эффективность этих методов для ин-виво диагностики с использованием когерентно-оптических методов микроскопии и томографии, таких как оптическая когерентная томография (ОКТ), конфокальная микроскопия, спекл-интерферометрия, многофотонная микроскопия, поляризационная визуализация.

Ключевые слова: Биологические ткани, Дисперсионные среды, Оптическое просветление, ОКТ, Спекл-контрастная и поляризационная визуализация.

П.9 Современные тенденции в развитии мультимодальной оптической когерентной томографии

Владимир Юрьевич Зайцев, д. ф.-м. н., чл-корр. РАН, заведующий лабораторией

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

П.10 Искусственный интеллект в биофотонике: поиск молекулярных маркеров и количественная визуализация

Евгений Александрович Ширшин, д.ф.-м.н. заведующий лабораторией лазерной биофотоники

МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

П.11 Название доклада обновляется

Илья Александрович Вайнштейн, д. ф.-м. н., профессор, главный научный сотрудник

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Секция 1

Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы

Устные доклады

1.1 Управляемые электрическим полем дифракционные оптические элементы на основе сегнетоэлектрических кристаллов (Приглашенный)

*Андрей Ришатович Ахматханов¹, к. ф.-м. н., А. А. Есин¹, В. А. Шихова¹, М. А. Чувакова¹,
А. Д. Ушаков¹, И. А. Кипенко¹, Л. И. Ивлева², М. С. Небогатиков¹, В. С. Павельев³, В. Я. Шур¹*

¹ Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

³ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Сегнетоэлектрические кристаллы с искусственно созданной доменной структурой могут, за счет разного знака электрооптического коэффициента в соседних сегнетоэлектрических доменах, использоваться для создания управляемых электрическим полем дифракционных оптических элементов (ДОЭ). В докладе приводятся основные принципы построения таких элементов, обзор результатов, сделанных в данной области в последнее время, а также результаты, полученные в нашей научной группе. Продемонстрирована возможность создания ДОЭ для преобразования гауссова пучка в пучок с пространственной модой ТЕМ₀₁ и в пучок с орбитальным угловым моментом. Обсуждаются основные параметры полученных ДОЭ, в том числе управляющие напряжения и характерные времена отклика.

Ключевые слова: Оптика, Дифракционные оптические элементы, Электрооптический эффект, Ниобат лития, Сегнетоэлектрические домены.

1.2 Гармоническая дифракционная линза: оптическая сила и хроматизм (Приглашенный)

Григорий Исаевич Грейсх¹, д. т. н., профессор, В. А. Данилов², О. А. Захаров¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

В настоящем докладе представлен краткий анализ фокусирующих свойств гармонической киноформной линзы. Он позволяет сформулировать основные отличия с точки зрения фокусирующих свойств этой линзы от однопорядковой киноформной линзы.

Ключевые слова: гармоническая киноформная линза, оптическая сила, хроматизм положения

1.3 Гармоническая дифракционная линза: пространственное разрешение и контраст (Приглашенный)

Григорий Исаевич Грейсх¹, д. т. н., профессор, В. А. Данилов², Е. Г. Ежов¹

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, Россия

В настоящем докладе проанализированы и сопоставлены структуры изображений, формируемых гармонической киноформной линзой в полихроматическом излучении с различным спектральным составом. В приближении геометрической оптики продемонстрирована зависимость от спектрального состава полихроматического излучения и конструктивных параметров самой линзы пространственного разрешения двух бесконечно удаленных приосевых точечных источников и контраста, с которым они разрешаются.

Ключевые слова: гармоническая киноформная линза, структура формируемого изображения, пространственное разрешение и контраст

1.4 Реализация дифракционных нейронных сетей в зеркальных системах (Приглашенный)

Скиданов Роман Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, Ю. В. Ханенко, А. Е. Морозов, А. С. Пронин, Д.М. Сорокин, Л.Л. Досколович, И. С. Пронин, Г.В. Успенъев, С.С. Подтихова, С.А. Фомченков
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Методами вычислительного и натурального экспериментов подтверждена возможность компактной реализации дифракционной нейронной сети в 4F системах на основе зеркал и нескольких отражений внутри системы. Рассмотрена схема Оффнера и схема с кольцевой апертурой и дифракционной линзой. Показано, что используемые оптические схемы позволяют сделать реализацию дифракционной нейронной сети предельно компактной.

Ключевые слова: 4F схема, дифракционная нейронная сеть, оптические вычисления, схема Оффнера.

1.5 Передача информации в оптическом терминале на основе дифракционного аксикона и дифракционной кольцевой линзы

Юрий Владимирович Ханенко, Р. В. Скиданов, С. С. Подтихова, С.А. Фомченков
Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва, Самара, Россия

Представлены результаты эксперимента по передаче информации на длине волны 1550 нм в оптическом терминале на основе двух дифракционных оптических элементов: бинарного аксикона и кольцевой линзы. Данная схема оптического терминала позволяет решить две задачи: снижение расходимости лазерного пучка на 20-30% и уменьшение габаритов оптического терминала до размеров достаточных для использования на спутниках формата кубсат.

Ключевые слова: Коллимация, Лазерный пучок, Межспутниковая связь, Дифракционные оптические элементы.

1.6 Составной многоапертурный коллиматор с пространственно-угловым мультиплексированием полей виртуального изображения для систем дополненной реальности в носимой электронике

Вячеслав Сергеевич Брунов, Д. П. Чертин, М. М. Чугунова, А. В. Арсенин, В. С. Волков
Emerging Technology Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

Рассматривается фундаментальная проблема формирования высококачественного виртуального изображения в ультракомпактных AR-системах на примере умных контактных линз. Жесткие массогабаритные ограничения из-за эргономики повседневного ношения задают экстремальные рамки для гетерогенной интеграции оптоэлектронных компонентов, ограничивая достижимое разрешение и поле зрения виртуального дисплея. Для преодоления данных барьеров предложена архитектура составного коллиматора - массива микрооптических элементов (градиентных линз), оси которых ориентированы под заданными углами друг к другу. Это обеспечивает пространственно-угловое мультиплексирование: независимую угловую сшивку (тайлинг) и/или оптическое наложение (суперпозицию) полей виртуальных изображений. Оптическое моделирование и эксперименты показали, что мультиплексирование обеспечивает кратное расширение FOV, увеличение яркости и информационной емкости дисплея, а суперпозиция независимых монохроматических каналов позволяет сформировать полноцветное изображение с минимизацией хроматических aberrаций. Разработанный подход открывает новые перспективы для экстремальной миниатюризации носимой электроники.

Ключевые слова: умная контактная линза, носимая электроника, дополненная реальность, микроколлиматор, градиентная оптика, градиентная линза, GRIN, угловое поле зрения, пространственно-угловое мультиплексирование.

1.7 Обработка реальных спектров, полученных на дифракционных спектроанализаторах, с учетом расчётных аппаратных функций.

Н.К. Павлычева д.т.н., проф., Артём Александрович Пеплов

Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
Казань, Россия

В докладе рассматривается задача повышения точности спектральных измерений на дифракционных спектроанализаторах за счет учета расчетной аппаратной функции прибора. Представлен алгоритм, основанный на комплексном подходе к обработке спектров, позволяющий скорректировать спектр излучения, используя данные расчета аппаратной функции, рассчитанной на основе геометрических и оптических параметров схемы дифракционного спектроанализатора. Приводятся результаты обработки реальных спектров, демонстрирующие повышение достоверности измеряемых параметров линий по сравнению с прямой регистрацией и, как следствие повышение точности, при проведении качественно-количественного спектрального анализа.

Ключевые слова: Дифракционная решетка, Аппаратная функция спектрографа, Спектр, Спектроанализатор.

1.8 Различия экспериментальной и теоретической оценки степени объемности решеток Брэгга в ФТР стекле

*Павел Константинович Розанов^{1,2}, М. В. Гавриш^{1,2}, У. В. Прохорова¹, П. Ю. Сердобинцев³,
Н. В. Никоноров², А. П. Погода¹*

¹ БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе проведен анализ различий между теоретическими и экспериментальными методами оценки степени объемности решеток Брэгга, записанных в фото-термо-рефрактивном стекле. Рассмотрена применимость теории связанных волн и параметра Кляйна–Кука для описания дифракционных процессов в толстых голографических решетках. Выполнены экспериментальные измерения угловой и спектральной селективности решеток с различной пространственной частотой и толщиной. Сравнение расчетных и экспериментальных параметров выявило отклонения, обусловленные неоднородностью записи, распределением модуляции показателя преломления и технологическими особенностями обработки ФТР стекла. Полученные результаты позволяют уточнить критерии оценки объемных свойств решеток Брэгга, применяемых в лазерных и спектрально-селективных оптических системах.

Ключевые слова: решетка Брэгга; фото-термо-рефрактивное стекло; объемная голограмма; теория связанных волн; параметр Кляйна–Кука; дифракционная эффективность; голографическая запись.

Стендовые доклады

С.1.1 Поляризационно-управляемая лазерная запись микрорельефов для дифракционных оптических элементов

Дарья Дмитриевна Учанова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Секция 2

Оптика лазерных пучков и структурированного света

Устные доклады

2.1 Формирование структурированных световых полей с помощью секторной спиральной фазовой пластины на основе жидкокристаллического сегнетоэлектрика (Приглашенный)

Светлана Павловна Котова¹, к. ф.-м. н., С.А.Самагин¹, Е.П. Пожидаев²

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Создан экспериментальный образец секторной спиральной фазовой пластины на основе эффекта деформации спирали геликоида жидкокристаллического сегнетоэлектрика под воздействием электрического поля. Частота реконфигурации превышает 1 кГц. Представлены результаты формирования вихревых кольцеобразных световых полей с топологическим зарядом от 1 до 4. Продемонстрирована возможность формирования цилиндрических векторных пучков с радиальной, азимутальной поляризацией и нескольких высших поляризационных мод.

Ключевые слова: Вихревое световое поле, Векторное световое поле, Сегнетоэлектрический жидкий кристалл

2.2 Требования к быстродействию измерительных и корректирующих фазовых систем при работе в турбулентной атмосфере (Приглашенный)

Лукин Владимир Петрович, д. ф.-м. н.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

Выполнены аналитические расчеты динамических характеристик измерительных и адаптивных систем в турбулентной атмосфере. Проведен анализ особенностей поведения динамических характеристик систем адаптивной оптики при работе в условиях проявления неколмогоровской турбулентности. Было показано, что флуктуации параметров оптических волн для различных моделей неколмогоровской турбулентности будут по-разному зависеть от внутреннего и внешнего масштабов турбулентности. Полученные в работе результаты позволяют пересчитывать параметры оптических волн при распространении в турбулентной среде с одним законом поведения спектра турбулентности для сред с другим законом для спектра.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, модели спектра турбулентности, неколмогоровская турбулентность, динамические характеристики

2.3 Корректность имитации атмосферных искажений при проведении лабораторных экспериментов (Приглашенный)

Лукин Владимир Петрович, д. ф.-м. н., А.В. Торгаев

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

Обсуждаются проблемы применения некоторых методик и вспомогательных систем для имитации искажений волнового фронта в оптических волнах при проведении лабораторных испытаний систем атмосферной и адаптивной оптики. Исследуется корректность использования гармонического сигнала для моделирования работы измерительных фазовых систем, измеряющих и корректирующих турбулентные искажения. Для анализа применялись теоретические расчеты временной эволюции фазовых искажений для оптической волны при ее распространении в турбулентной атмосфере. Также выполнены исследования по оценке корректности замены естественной атмосферной турбулентности на случайные флуктуации в воздухе за тепловентилятором. В экспериментах использовались ультразвуковая станция АМК-03, разработанная для измерений метеорологических полей, и различные тепловентиляторы.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, неколмогоровская турбулентность, измерения

2.4 Многоканальный голографический датчик волнового фронта (Приглашенный)

Владимир Юрьевич Венедиктов, д. ф.-м. н., А. В. Горелая, Д. В. Масыгин, Е. В. Шалымов

2.5 Вклад поляризации в искажение оптического вихря при фокусировке

Сергей Сергеевич Стафеев^{1,2}, д. ф.-м. н

¹ Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

В данной работе с помощью формализма Ричардса-Вольфа была рассмотрена острая фокусировка оптических вихрей с круговой поляризацией. Было показано, что при фокусировке оптических вихрей, в которых направление вращения поляризации и фазы различно, наблюдается расщепление исходного фокусируемого вихря на три оптических вихря – один вихрь располагается на оптической оси, еще два смещены от нее. С ростом топологического заряда вихря увеличивается расстояние от центров расщепленных вихрей до оптической оси. Если направления вращения фазы и поляризации в оптическом вихре совпадают, то расщепления вихря не наблюдается.

Ключевые слова: оптический вихрь, сингулярность фазы, острая фокусировка

2.6 Возбуждение и исследование мультиплексных терагерцовых вихревых поверхностных плазмон-поляритонов

Наталья Дмитриевна Осинцева¹, к. ф.-м. н., В. В. Герасимов^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В данной работе впервые реализовано формирование мультиплексных вихревых поверхностных плазмон-поляритонов в терагерцовом диапазоне. Эксперимент проводился на металлическом цилиндре, на торец которого фокусировался пучок, представляющий собой суперпозицию двух бесселевых пучков с различными топологическими зарядами. Анализ полученных данных позволил выявить зависимость направления вращения плазмон-поляритона от топологического заряда освещающего пучка, что свидетельствует о передаче орбитального углового момента. Полученные результаты могут лечь в основу разработки терагерцовых устройств для передачи и обработки информации, а также новых типов сенсоров. Предложенный подход обладает потенциалом масштабирования и может быть применим не только в терагерцовом, но и в других частотных диапазонах, что расширяет область его практического применения.

Ключевые слова: оптические вихри, пучки с ОУМ, дифракционные оптические элементы, поверхностные плазмон-поляритоны, терагерцовое излучение.

2.7 Вихревые оптотермические ловушки

Александра Михайловна Майорова, С. П. Котова, Н.Н. Лосевский, Д. В. Проконова, С.А. Самагин, В.К. Урюпина

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

Вихревые оптотермические ловушки формируются за счет острой фокусировки структурированного светового поля на поглощающую поверхность. В результате возникает градиент температуры и конвекционные потоки, обеспечивающие перенос объектов микронных и субмикронных размеров в область действия ловушки. Приводятся результаты экспериментов по влиянию конвекционной и оптической составляющих на движение микросфер в оптотермической

ловушке. Демонстрируется возможность управления скоростью перемещения микросфер по световому контуру за счет изменения параметров ловушки. Эксперименты подтверждаются результатами численного моделирования.

Ключевые слова: оптотермические ловушки, вихревые световые поля, оптотермическое манипулирование

2.8 Генерация углового орбитального момента при возбуждении искусственных оптических решеток неструктурированным светом

Сергей Васильевич Коняхин¹

¹ Российский Квантовый Центр, ИЦ Сколково, Москва, Россия

Показано, что одиночный сфокусированный гауссов пучок, возбуждающий гексагональную графеновую фотонные решётки, приводит к генерации в импульсном пространстве множественных пар вихрь-антивихрь. Формируемые структуры определяются не кривизной Берри или топологией, а симметрией эволюционирующего волнового пакета (например, $S3v$, $S6v$ или $S2v$). Предложен простой метод использования неструктурированного света для генерации регулярных вихревых решёток, перспективный для приложений в области управления орбитальным угловым моментом [Adv. Photonics 5, 066007 (2023)].

Ключевые слова: орбитальный угловой момент, искусственная оптическая решётка, атомный пар.

2.9 Многопроходный кольцевой поляризационный интерферометр в задачах исследования распространения оптических вихрей в атмосферных каналах

Даниил Дмитриевич Решетников¹, Т. К. Король¹, Е. В. Малютина¹, В. М. Петров¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе обсуждается схема многопроходного кольцевого поляризационного интерферометра, позволяющая моделировать воздействие двумерных фазовых шумов на вихревые пучки. Ключевая особенность схемы – использование единственного пространственного модулятора света для многократной модуляции волнового фронта за несколько обходов интерферометра. Будут продемонстрированы экспериментальные результаты генерации и интерференционного детектирования вихрей с орбитальным угловым моментом $l = 1$ и $l = 2$ в условиях контролируемого фазового шума.

Ключевые слова: Оптические вихри, Кольцевой интерферометр, Оптические атмосферные каналы связи.

2.10 Формирование оптического вихря в некогерентном излучении с помощью поляризационного интерферометра»

Анастасия Александровна Рыжская, В. Ю. Венедиктов, М. Е. Павелина, Д. Д. Решетников, А. А. Севрюгин

Стендовые доклады

С.2.1 Качество формирования спиральных пучков света в форме замкнутых кривых

Д. И. Кашапова¹, Светлана Павловна Котова², Д. В. Проконова²

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

² Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

Представлены результаты исследования эффективности и качества спиральных пучков света, сформированных голографическим методом при помощи пространственного модулятора света. Изучено влияние формы штриха

дифракционной решетки голограмм на качество восстановления спиральных пучков света. Проведена оценка энергетической эффективности пучков. Определены такие критерии качества, как среднеквадратическая ошибка, пиковое отношение сигнал/шум, коэффициент структурного подобия. Установлено, что пучки, восстановленные с помощью голограмм с пилообразным штрихом решетки, характеризуются более однородной структурой, более высокой энергетической эффективностью (в 2 раза выше), чем голограммы с синусоидальным штрихом решетки. Значения математических критериев качества для голограмм с пилообразным штрихом решетки на 10–30% лучше, чем для синусоидальных.

Ключевые слова: Спиральные пучки света, Голографический метод, Пространственный модулятор света, Синусоидальный профиль штриха решетки, Пилообразный профиль штриха решетки.

С.2.2 Расчёт непараксиальных поправок к угловому моменту векторных вихревых полей

Екатерина Владимировна Малютина¹, В. А. Леонов¹, Д. Д. Решетников¹, Е. А. Ващукевич¹, Т. Ю. Голубева¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе выполнен явный расчет непараксиальных поправок к орбитальному угловому моменту векторных оптических вихрей с использованием метода суммирования по Борелю. Применение формализма калибровочно-инвариантного векторного потенциала позволило аналитически выделить два независимых вклада в орбитальный угловой момент – спин-зависимый и спин-независимый. В работе введен новый параметр – спиральный топологический заряд W – и показано, что совместно с топологическим зарядом l он формирует пару квантовых чисел, необходимых для описания орбитального углового момента векторных вихрей.

Ключевые слова: Векторные оптические вихри, Орбитальный угловой момент, Спиновый угловой момент

С.2.3 Расчёт чирпированной волоконной брэгговской решётки в маломодовом ступенчатом световоде при осесимметричном возбуждении

Александр Александрович Маркварт, Л. Д. Завалишина, Л. Б. Лиокумович, Н. А. Ушаков

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

В работе предложен вариант многомодовой волоконной решётки Брэгга, записанной в маломодовое ступенчатое оптоволокно и работающей в двухмодовом LP01-LP02 режиме. В качестве подходящего оптического волокна подобрано коммерчески доступное волокно FG025LJA компании Thorlabs диаметром сердцевины 25 мкм и числовой апертурой 0.1, которое в О-диапазоне длин волн имеет только две осесимметричные моды. В работе произведены расчеты коэффициентов прямых и перекрестных связей мод в решётке и последующие расчёты спектров отражения однородных и чирпированных вариантов решётки, продемонстрированы эффекты насыщения, уширения и интерференции резонансов, а также получение единого пика отражения с максимальным коэффициентом отражения до 98%.

Ключевые слова: чирпированная волоконная брэгговская решётка, маломодовое волокно, LP01, LP02.

С.2.4 Повышение информативности ФРТ при конической фазовой аподизации в задаче анализа аббераций волнового фронта

Дмитрий Павлович Серафимович¹, П.А. Хорин¹, С.Н. Хонина^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет, Самара, Россия

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

Исследуется возможность повышения информативности в задачах анализа волновых аббераций на основе использования многопорядковых фазовых дифракционных оптических элементов, согласованных с различными типами аксиконов, формирующих кольцевые и спиральные распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы. Аподизация (дополнение) оптической системы такими элементами позволяет увеличить размер и детализацию функции рассеяния точки (ФРТ) без дефокусировки. Кроме того, многопорядковая структура вносит дополнительную

информацию за счет различных типов предискажений. Такой подход увеличивает эффективность применения сверточных нейронных сетей в задаче детектирования и анализа волновых aberrаций.

Ключевые слова: Волновые aberrации, Функция рассеяния точки (ФРТ), Дифракционный аксикон, Многопорядковые оптические элементы, Сверточная нейронная сеть

Секция 3

Системы визуализации и отображения информации для AR/VR

Устные доклады

3.1 Шлем дополненной реальности на базе LBS проектора и ГОЭ (Приглашенный)

Сергей Александрович Иванов, к. ф.-м. н., Е.С. Мусихина, М. Киселев, И. Радько, А. Арсенин, В. Волков
XPANCEO Research On Natural Science L.L.C., UAE

Проблема навигации и ситуационной осведомлённости стоит особенно остро для пользователей мотоциклов. В данной работе представлено решение по интеграции дополненной реальности (AR) в мотоциклетный шлем. Система легко адаптируется для гоночных применений благодаря простоте интеграции и упрощённому процессу гомологации. Решение основано на технологии лазерного сканирования (LBS), которая обеспечивает преимущества для голографических элементов за счёт узкого спектра излучения. Высокая энергоэффективность достигается благодаря узконаправленности лазерного луча: вся энергия каждого пикселя полностью собирается оптической системой. Разработанный визор обеспечивает поле зрения до 50°. Текущий прототип выполнен в монохромном исполнении с перспективой развития до полноцветной RGB-системы.

Ключевые слова: Оптика, Голография, Дифракционные оптические элементы.

3.2 Контактная линза с сенсором внутриглазного давления на основе муаровых узоров

Илья Маркович Фрадкин, Р.В. Куртаев, М.С. Миронов, Д.В. Грудинин, А.А. Марченко, М.М. Чугунова, В.Р. Соловей, А.В. Сюй, А.А. Вишневый, И.П. Радько, А.В. Арсенин, В.С. Волков
Emerging Technologies Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

Исследование посвящено разработке интегрированного в контактную линзу пассивного сенсора внутриглазного давления. Принцип действия устройства основан на регистрации микроскопических деформаций линзы, вызванных изменениями кривизны роговицы при колебаниях давления в глазу. Деформации визуализируются в макромасштабе посредством муарового эффекта, возникающего при наложении двух микроструктурированных решеток: одна из них механически связана с телом линзы и воспринимает ее деформации, а вторая остается статичной. Специализированный дизайн меток сенсора позволяет с высокой точностью детектировать его положение на фотоизображении, определять количественные параметры муарового паттерна и устанавливать их связь с уровнем давления. Предлагаемый подход исключает использование энергозависимых компонентов, обеспечивает компактность устройства и на стадии прототипа демонстрирует точность измерений не хуже 2 мм рт. ст. Разработанный сенсор обладает значительным потенциалом для трансформации подходов к диагностике и долгосрочному мониторингу глаукомы.

Ключевые слова: внутриглазное давление, контактная линза, муаровые узоры.

3.3 Разработка алгоритма повышения качества восстановления изображений с компьютерно-синтезированных голограмм в дисплеях дополненной реальности

Тимур Анварович Гататдинов¹, З. С. Марков¹, Е. Ю. Злоказов¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Работа посвящена разработке алгоритма синтеза компьютерных голограмм Френеля для повышения качества изображений, восстановленных в когерентной системе дополненной реальности на основе фазового жидкокристаллического пространственно-временного модулятора света и голографического волноводного перископа. Целью работы является разработка итеративного алгоритма, направленного на численную компенсацию геометрических искажений изображений и высокого уровня фоновой засветки, наблюдаемых в области восстановления.

Ключевые слова: волноводная голография, фазовые голограммы, компьютерный синтез, голограммы Френеля, голографический волноводный перископ.

3.4 Разработка комплексной модели работы волноводных голографических элементов в AR системах

*Николай Андреевич Путилин^{1,2}, Ф. С. Смык^{1,2}, А. Н. Путилин^{1,2}, С. С. Копёнкин^{1,2},
Ю. П. Бородин^{1,2}*

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В работе рассматриваются основные сложности, возникающие при разработке комплексной модели работы волноводных голографических перископов в устройствах дополненной реальности. Анализируются возможные пути решения выявленных вычислительных проблем. Работа основана на опыте разработки оригинальных специализированных компьютерных программ для данных задач. Под комплексной моделью подразумевалась модель, описывающая этап записи голографического элемента в реальной оптической схеме, а также этап воспроизведения с использованием реального объектива. В контексте вопросов трассировки лучей поднимаются вопросы расчёта дифракционной эффективности для рельефно-фазовых и объёмных голографических элементов. Значительное внимание уделено сопоставлению результатов моделирования с экспериментальными данными.

Ключевые слова: Волноводные голографические элементы, Схемы записи голограмм, Компьютерное моделирование, Непоследовательная трассировка лучей

3.5 Анализ влияния геометрических параметров одномерного рефрактивного волновода на показатели качества воспроизводимого изображения

Афанасьева Ольга Леонидовна
МГТУ им. Н.Э. Баумана

3.6 Голограммное зеркало на подложке с ненулевой гауссовой кривизной: моделирование и запись

*Мария Владимировна Шишова, С. Иванов, Е. С. Мусихина, М. Киселев, И. Радько,
А. Арсенин, В. Волков*
XPANCEO Research On Natural Science L.L.C., UAE

В работе исследуются голографические зеркала, записанные на визоре шлема. Использование визора в качестве подложки позволяет реализовать шлем дополненной реальности без дополнительных элементов (волноводов или комбайнеров). Однако форма подложки, обладающая ненулевой гауссовой кривизной, приводит к появлению астигматизма и других аберраций, а внеосевая геометрия системы затрудняет их компенсацию во время записи. Дополнительно, при формовке в визоре образуются локальные напряжения, которые наводят двулучепреломление, что затрудняет получение равномерной дифракционной эффективности по площади образца. В докладе представлены результаты моделирования оптической системы в программе OpticStudio, а также эксперименты по записи голограммных зеркал на визоре и работе полученных элементов в комбинации с LBS-проектором.

Ключевые слова: голограммное зеркало, тороидальная голограмма, OpticStudio.

3.7 Планарные осветители на основе волноводных голографических элементов (Приглашенный)

*Андрей Николаевич Путилин^{1,2}, к. ф.-м. н., С. Е. Дубынин¹, С. С. Копёнкин^{1,2},
Ю. П. Бородин^{1,2}*

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В работе рассматриваются результаты разработки планарных осветителей, формирующих равномерную освещённость по большой плоскости при когерентной подсветке. Технология изготовления такого типа осветителей в большинстве операций совпадает с технологией изготовления волноводных голографических перископов для HMD дисплеев. В основе их конструкции лежит использование плоских волноводов и комбинаций голографических элементов. В работе рассмотрено несколько вариантов оригинальных схем подобного типа устройств. Также были предложены схемы, работающие с линейкой светодиодов и со встроенным голографическим бим-шейпером. В работе представлены экспериментальные результаты изготовления осветителей различных типов для дисплеев до 10 дюймов, в том числе для RGB подсветки. Равномерность освещённости достигала 85 % по площади планарного осветителя.

Ключевые слова: Планарные осветители, Волноводы, Голографические оптические элементы, Дисплеи дополненной реальности, Коллимация излучения

3.8 Вергентный отклик глаз как мера воспринимаемой глубины в проекционных AR-системах

Даниил Дмитриевич Шаров¹, С.К. Стафеев^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты исследования зрительного восприятия стимулов в AR HUD-системах. Участники выполняли задачи фиксации на глубинах 0,3–4 м; регистрация движений глаз сочеталась с полным оптометрическим обследованием для учёта индивидуальных характеристик зрительного аппарата. Разработаны методы выравнивания и аппроксимации экспериментальных данных. Выявлены корреляционные зависимости между угловой конвергенцией зрительных осей и индивидуальными параметрами пользователей. Полученные закономерности формируют основу для адаптивной настройки глубины отображения в AR-системах и могут быть использованы при проектировании интерфейсов с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: дополненная реальность, AR HUD, айтрекинг, конвергенция зрительных осей, глубина отображения, голографический дисплей, юзабилити, адаптивный интерфейс.

Секция 4 Оптические защитные технологии

Устные доклады

4.1 Фазово-поляризационные элементы для кодирования информации (Приглашенный)

Леонид Викторович Танин^{1,2}, А. И. Горчарук^{1,2}, Е. П. Пантелеева², Е. А. Мельникова², А. Л. Толстик²

¹ ЗАО «Голографическая индустрия», Минск, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены голографические защитные технологии на основе комбинированных изображений с использованием полимеризуемых жидких кристаллов. Показано, что созданные защитные элементы на основе рельефно-фазовой голограммы с нанесенным жидкокристаллическим полимерным слоем содержат скрытое изображение, которое видимо в поляризованном свете и несет информацию о пространственном распределении амплитуды и фазы световых пучков. Наряду с использованием поляризации светового пучка в качестве информационного параметра предложены методы кодирования с использованием сингулярных пучков. Предложены варианты кодирования на основе двоичного кода – «0» - гауссовый пучок и «1» - сингулярный пучок с единичным топологическим зарядом, а также систем кодирования с большим числом цифровых знаков с использованием различных топологических зарядов.

Ключевые слова: Голографические защитные технологии, Сингулярная оптика, Комбинированные изображения, Кристаллограмма.

4.2 К вопросу фотоперсонализации цветных объемных защитных голограмм на фотополимерном носителе.

Андрей Валентинович Смирнов¹, Д. С. Лушников,² И. К. Цыганов,² В. В. Маркин,² В. Е. Талалаев²

¹АО «НПО «КРИПТЕН», Дубна, Россия

² ООО «ОГП», Москва, Россия

Доклад посвящен разработке метода персонализации оптических защитных элементов, выполненных на фоторегистрирующих средах, в большей степени фотополимеризующихся. Задача придания уникальности оптическим защитным элементам за счет добавления переменной информации в виде серийного номера, содержащего переменную буквенно-численную часть или изображения, особо актуальна для изделий, выполненных на фотополимерном носителе. Классические методы нанесения переменной информации в виде печати каплеструйным или термотрансферным принтером недостаточно устойчивы к ее подмене, в этой связи требуются новые подходы к фотоперсонализации оптических защитных элементов на фотополимерном носителе в процессе изготовления, не позволяющие заменить переменную информацию, не нарушая целостность защитного элемента. В частности, описан способ фотоперсонализации, основанный на обесцвечивании сенсibilизаторов до регистрации основного изображения на разных источниках излучения, обеспечивающий достаточный уровень эффективности. Предложено техническое решение, основанное на этом способе, в виде встроенного в производственное оборудование по массовому изготовлению фотополимерных голограмм устройства оптической нумерации.

Ключевые слова: Персонализация, Серийный номер, Оптическая защита, Голография, Фотополимеры, Голографические оптические элементы, Защитные голограммы.

4.3 Виды оптической защиты средств идентификации, разработанные в ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»

*А. Л. Адаменко¹, А. Г. Бобореко¹, П. В. Моисеенко¹, В. А. Танин¹,
Евгений Вячеславович Филиппов¹*

¹ ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ», Минск, Республика Беларусь

В работе представлены разработанные в ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ» способы защиты средств идентификации (штрих-кодов) от подделки. Описаны конструкции защитных элементов на основе саморазрушающейся полимерной плёнки с покрытием, содержащим флуоресцирующие волокна, а также стикеров со скрытыми поляризационными изображениями, визуализируемыми круговым и линейным поляризаторами. Рассмотрены физические принципы визуализации с применением изотропно-анизотропных пластин, четвертьволновых фазовых пластин и разнонаправленных синусоидальных голографических решёток, выступающих ориентантами жидких кристаллов с последующей их полимеризацией. Показано, что сочетание фотоориентации жидких кристаллов с голографическими решётками обеспечивает динамические эффекты при повороте поляризатора и существенно затрудняет подделку защитных элементов.

Ключевые слова: голография, защита от подделки, штрих-код, скрытое поляризационное изображение, голографические дифракционные решётки, жидкие кристаллы, фотоориентация, фазовая пластина.

4.4 Эффект переключения на двумерных дифракционных решетках

Алексей Александрович Щербаков¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматривается эффект переключения дифракционных порядков на резонансных решетках, заключающийся в резком перераспределении энергии дифрагированного излучения между нулевым и первыми порядками за счет взаимодействия волн через плазмона или волноводную моду при варьировании угла падения или длины волны падающего излучения, ранее описанный для одномерных решеток. Исследуется возможность и условия наблюдения аналогичного эффекта на двумерных решетках, проводится численное моделирование с целью получения наиболее выраженного эффекта, а также обсуждаются особенности и ограничения, накладываемые двумерной периодичностью. Эффект может быть использован для создания оптических защитных меток.

Ключевые слова: Резонансные дифракционные решетки, эффект переключения порядков, метод обобщенных источников.

4.5 Дифракционная эффективность тонких голограмм. Достижимый максимум

А.Ф. Смык, Александр В. Шурыгин

ООО «Джеймс Ривер Бранч», Москва, Россия

Цель работы. Оценка влияния пространственной частоты, глубины и формы профиля рельефа на дифракционную эффективность (ДЭ). Основные результаты. Проведено численное моделирование дифракционной эффективности рельефно-фазовых решеток в векторном приближении методом конечных элементов. В отличие от скалярной теории, показано, что для решеток с глубоким профилем ($> 0.3\lambda$) максимум ДЭ может смещаться в высокие порядки: получено значение 82% во втором порядке для синусоидальной решетки с глубиной 425 нм. Экспериментально на образцах с профилями, характерными для защитных голограмм, подтверждены результаты теоретического моделирования. Практическая значимость. Предложен критерий окончания проявки фоторезиста, основанный на минимуме интенсивности нулевого порядка. Для систем дот-матрикс обоснована методика выбора глубины рельефа под длину волны излучения, учитывающая контрастную кривую фоторезиста S1813.

Ключевые слова: Оптика, голография, дот -матрикс.

4.6 Использование смартфона для считывания аппаратного защитного признака распределённого по всей поверхности защитной голограммы

Чермен Борисович Кайтуков
АО "НТЦ "АТЛАС"

Секция 5 Интегральная фотоника

Устные доклады

5.1 Моделирование перестройки резонансной частоты МШГ-микрорезонатора при пьезоэлектрическом воздействии (Приглашенный)

В. И. Павлов³, М. К. Бражников³, Н. П. Хатырев³, Кирилл Николаевич Миньков^{1,2}, к. т. н.

¹Российский квантовый центр, 121205, г. Москва, Территория Инновационного Центра “Сколково”, Большой бульвар, д. 30, ст. 1.

²Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва
³ЗВНИИФТРИ, Московская область, Менделеево, Россия

Перестройка резонансных частот микрорезонаторов с модами шепчущей галереи (МШГ) представляет интерес для создания перестраиваемых лазеров, фильтров, сенсоров и систем интегральной фотоники. Одним из перспективных подходов является использование пьезоэлектрических актуаторов, обеспечивающих механическую деформацию резонатора и, как следствие, изменение его собственных частот. В большинстве работ используются осесимметричные конструкции, однако подобные решения ограничивают гибкость проектирования и усложняют быстрое прототипирование.

Ключевые слова: МШГ-микрорезонатор, пьезоэлектрический актуатор, перестройка резонансной частоты, MgF_2 .

5.2 Разработка электрооптической платформы на основе фотонных интегральных схем из тонкопленочного ниобата лития

*Али Шихалиевич Амирасланов¹, А.С. Бабурин^{1,2}, А.Е. Бушуева¹, Е.С. Лотков^{1,2},
К.А. Бузаверов^{1,2}, Е.В. Сергеев^{1,2}, О.И. Шмонина¹, С.В. Букатин¹, А.Б. Крамаренко¹,
Д.А. Баклыков^{1,2}, И.А. Рыжиков¹, И.А. Родионов^{1,2}*

¹ Шуховские лаборатории, Квантум парк, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, 127030, Россия

Цель работы – разработка элементной компонентной базы фотонных интегральных схем на основе тонкопленочного ниобата лития. Для проектирования компонентов фотонной интегральной схемы на основе тонкопленочного ниобата лития использовался метод численного моделирования. Метод сухого травления и электронно-лучевой литографии использовались для изготовления интегральных структур. Сканирующая электронная микроскопия и оптические измерения изготовленных фотонных интегральных схем использовались для оценки поставленной технологии изготовления и расчетных данных. Результаты работы могут быть применены в создании фотонных интегральных схем.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, Тонкопленочный ниобат лития, Электрооптический модулятор.

5.3 Применение микрокольцевых резонаторов для спектральной обработки РЧ-модулированных оптических сигналов в аналоговом фотонном вычислительном устройстве

*Дмитрий Александрович Рябов, А. И. Бобров, А. В. Нежданов, Д. В. Шестаков, А. А. Скрылев,
О. С. Вязанкин, А. В. Сухоруков, К. В. Сидоренко*

НИФТИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Микрокольцевые резонаторы применяются для фильтрации лазерного излучения с целью подавления побочных гармоник, возникающих при гетеродинировании. Это актуально для обеспечения условий когерентности при

последующей оптической обработке РЧ-сигналов с использованием аналогового фотонного вычислительного устройства, в частности при решении задачи формирования диаграммы направленности фазированной антенной решётки. В работе проведено исследование по изменению полосы фильтрации кремниевых микрокольцевых резонаторов за счёт термооптического эффекта. Продемонстрирована возможность применения предложенного подхода в диапазоне частот от 0,5 до 13,6 ГГц.

Ключевые слова: Радиофотоника, Фотонные интегральные схемы, Микрокольцевые резонаторы, Оптическая обработка РЧ сигнала.

5.4 Оптимизация технологии для гибкого изготовления фотонных схем с ультранизкими потерями на нитриде кремния

Евгений В. Сергеев^{1,2}, К. А. Бузаверов^{1,2}, А. С. Бабурин^{1,2}, С. С. Авдеев^{1,2}, С. В. Букатин², Е. С. Лотков^{1,2}, А. Б. Крамаренко², Е. В. Зикий^{1,2}, И. А. Рыжиков², И. А. Родионов^{1,2}

¹ ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

² Шуховские лаборатории, Квантум парк, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В данной работе представлены две технологии для гибкого изготовления фотонных интегральных схем (ФИС) с ультранизкими потерями с использованием токоснимающего полимера и жесткой металлической маски. Нами было проведено исследование влияния сшивок волноводов на оптические потери в зависимости от выбора материала токосъема, а также предложен способ повышения быстродействия изготовления таких фотонных схем. Характеризация полученных ФИС проводилась по спектральным измерениям добротности кольцевых резонаторов и оптических потерь в длинных спиральных волноводах.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, нитрид кремния, сшивки полей, кольцевые резонаторы, электронно-лучевая литография.

5.5 Эффективные термооптические фазовращатели для фотонных интегральных схем

Дмитрий Павлович Серкин¹, К. А. Бузаверов^{1,2}, А. С. Бабурин^{1,2}, Е. В. Сергеев¹, С. С. Авдеев¹, Е. С. Лотков¹, С. В. Букатин¹, И. А. Степанов¹, А. Б. Крамаренко¹, А. Ш. Амирасланов¹, И. А. Рыжиков¹, И. А. Родионов^{1,2}

¹ Шуховские лаборатории, Квантум парк, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, 127030, Россия

В данной работе проведено моделирование и экспериментальная характеристика интегральных термооптических фазовращателей с изолирующими траншеями для телекоммуникационного диапазона длин волн. Изготовленные устройства обеспечивают сдвиг фазы на при потребляемой мощности 65 мВт, времени отклика 35 мкс и коэффициенте ослабления сигнала более 80 дБ. В работе демонстрируется совместимость с фотонными интегральными схемами на основе нитрида кремния с низкими потерями, измерены микрорезонаторы с наиболее вероятной внутренней добротностью более 5,9 миллионов, что соответствует потерям на распространение 0,06 дБ/см.

Ключевые слова: Фазовращатель, Фотонные интегральные схемы, Нитрид кремния.

5.6 Генерация второй гармоники в протонообменных волноводах в ниобате лития

Алексей Владимирович Сосунов¹, М. А. Чувакова², Е. Д. Савельев², А. Р. Ахматханов², В. Я. Шур²

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

² Институт естественных наук и математики, Екатеринбург, Россия

Работа посвящена изготовлению и тестированию периодически-поляризованных оптических волноводов в ниобате лития для исследования эффективности генерации второй гармоники. Методом протонного обмена с последующим отжигом были изготовлены одномодовые каналные волноводы на длину волны 1550 нм с периодом полинга 18 мкм в

ниобате лития Z-среза. Максимальная эффективность генерации второй гармоники на длине волны 766,5 нм составила 6,4 %/Вт·см².

Ключевые слова: генерация второй гармоники, волновод, ниобат лития.

5.7 Исследование процесса формирования полосковых структур из TiO₂ с целью создания нагруженных планарных оптических волноводов на основе TFLN

Елизавета Игоревна Юртова¹, А.И.Бобров¹, Д. Е. Николичев¹, П.В.Волков²

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

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

Исследованы закономерности формирования планарных волноводных структур из диоксида титана (TiO₂), получаемого путем термической обработки титановых полосков. Формирование оптических элементов осуществлено методом совмещенных контактной и электронной литографий. Продемонстрировано, что процесс окисления в контролируемой газовой среде обеспечивает снижение шероховатости боковых стенок волноводов. Определены оптимальные режимы получения однородных структур TiO₂, совместимые с процессами обработки тонкопленочного ниобата лития (TFLN).

Ключевые слова: Диоксид титана, Волноводные структуры, Шероховатость, Тонкопленочный ниобат лития, Электронная литография.

5.8 Малошумящий термооптически перестраиваемый микроволновый генератор на основе интегрального кремниевого резонатора

А. С. Смирнов, Д. С. Земцов, А. К. Земцова, К. Н. Гарбузов, С. С. Косолобов, В. П. Драчев

Сколковский Институт Науки и Технологии, Москва

Компактные, с низким фазовым шумом, высокостабильные и широкополосные перестраиваемые микроволновые генераторы необходимы для различных применений. Интегральная кремниевая фотоника позволяет миниатюризировать микроволновые генераторы на основе оптоэлектроники. В докладе рассмотрен многомодовый режим резонатора типа «стадион». Наша конструкция состоит из перестраиваемого микроволнового фотонного фильтра с лазером непрерывного излучения, амплитудным модулятором и фотодетектором. Многомодовый режим обеспечивает равномерную перестройку частоты выходного микроволнового сигнала и более низкий фазовый шум по сравнению с одномодовым случаем. Для оптоэлектронного генератора достигнут фазовый шум -90,6 дБн/Гц при смещении 10 кГц относительно несущей и диапазон перестройки 0,5-10 ГГц.

Стендовые доклады

С.5.1 Моделирование и изготовление высокоэффективных дифракционных решеток из нитрида кремния

Анастасия Евгеньевна Бушуева

Шуховские лаборатории, Квантум парк, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

В работе представлены результаты численного моделирования и оптических измерений параметров дифракционных решеток из нитрида кремния для ввода и вывода излучения. Рассмотрены основные конструкции дифракционных решеток, увеличивающие эффективность ввода. В результате моделирования были получены значения периода, коэффициента заполнения и толщин оптических слоев, обеспечивающие эффективность ввода более 30% для фокусирующей дифракционной решетки и более 60% для решетки с отражателем. Проанализировано влияние погрешности изготовления дифракционных решеток на эффективность ввода. Для изготовленных дифракционных решеток базовой конструкции была получена эффективность 27,8% на длине волны 1550 нм, полоса пропускания 24 нм.

С.5.2 Титановые волноводы в подложках ниобата лития, легированного магнием, для генерации запутанных пар фотонов

Александр Александрович Богданов¹, И. В. Ильичев¹, А. В. Шамрай¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена оптимизации технологии изготовления оптических волноводов методом термической диффузии титана в подложку ниобата лития, легированного магнием (Ti:MgO:LiNbO_3), для эффективной генерации запутанных пар фотонов. Исследовано влияние технологических параметров термической диффузии титана на характеристики волноводного канала на двух длинах волн (775 и 1550 нм) для двух ортогональных поляризаций (ТМ и ТЕ). Определены оптимальные условия, обеспечивающие одновременно минимальные внутренние оптические потери и хорошее перекрытие фундаментальных мод, а также предложены методы согласования оптического волновода с подводящими оптическими волокнами.

Ключевые слова: Интегральная оптика, Нелинейная оптика, Квантовая оптика, Ниобат лития, Волноводы, Диффузия титана, Перепутанные фотоны.

С.5.3 Влияние параметров сверхпроводникового однофотонного детектора на разрешающую способность по числу фотонов

Оксана Игоревна Шмонина¹, И.А. Степанов^{1,2}, А.С. Бабурин^{1,2}, И.А. Родионов^{1,2}

¹Шуховские лаборатории, Квантум парк, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, 127030, Россия

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы традиционно используются в квантовых технологиях как бинарные устройства, не способные определять число фотонов в импульсе. В данной статье представлена модель, связывающая время нарастания импульса детектора с числом поглощённых фотонов, геометрией и свойствами материала детектора, а также условиями его работы. Модель демонстрирует, как добавление последовательной индуктивности позволяет значительно повысить точность разрешения числа фотонов. Апробация модели на экспериментальных данных показала среднюю относительную погрешность менее 6%, подтверждая ее точность и перспективность для оптимизации высокоскоростных детекторов с разрешением по числу фотонов.

Ключевые слова: сверхпроводниковый однофотонный детектор, разрешение числа фотонов, индуктивность, скорость счёта

Секция 6 Интерферометрия и оптическая метрология

Устные доклады

6.1 Метод нелинейной интерферометрии для инфракрасной метрологии (Приглашенный)

А.С. Сабанин¹, С.П. Кулик^{1,2}, Анна Владимировна Патерова¹, PhD

¹ Лаборатория «Квантовая инженерия света», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Центр квантовых технологий, Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе представлен метод широкополосной инфракрасной спектроскопии, основанный на нелинейной интерферометрии с использованием коррелированных пар фотонов. Метод позволяет определять инфракрасное поглощение газовых сред при детектировании видимого излучения без применения дорогостоящих компонентов. Экспериментально продемонстрировано детектирование углекислого газа и закиси азота по их фундаментальным полосам поглощения на длинах волн 4,27 мкм и 4,5 мкм соответственно, при регистрации длин волн видимого диапазона.

Ключевые слова: Квантовая оптика, интерферометрия, инфракрасная спектроскопия

6.2 Микрорезонаторы с модами шепчущей галереи: технологии изготовления и области применения (Приглашенный)

Кирилл Николаевич Миньков^{1,2}, к. т. н., Е.И. Леденёв³

¹ Российский квантовый центр, 121205, г. Москва, Территория Инновационного Центра “Сколково”, Большой бульвар, д. 30, ст. 1.

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

³ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Университетский просп. 13, 119234, Москва, Россия

В статье рассмотрена технология изготовления высокодобротных микрорезонаторов с модами шепчущей галереи методом трёхстадийного алмазного точения с последующим высокотемпературным отжигом. Описаны этапы формирования геометрии резонатора, включая черновую, промежуточную и финишную обработку с нанометровой глубиной резания. Показано влияние технологических факторов на качество поверхности и добротность резонаторов. Для кристаллов MgF_2 и $BaMgF_4$ продемонстрирована эффективность отжига в атмосфере азота, обеспечивающего снижение дефектности и повышение стабильности параметров. Разработанный подход обеспечивает воспроизводимость характеристик и перспективен для серийного производства микрорезонаторов.

Ключевые слова: микрорезонаторы; моды шепчущей галереи; алмазное точение; высокотемпературный отжиг; добротность; MgF_2 ; $BaMgF_4$.

6.3 Субволновые оптические волокна для приложений ультрафиолетовой фотоники (Приглашенный)

С.В. Власов^{1,3}, Г.Ю. Левкин⁴, Д.С. Моисеев⁴, М.А. Лобанова⁵, Кирилл Николаевич Миньков^{1,2}, к. т. н.

¹ Российский квантовый центр, 121205, г. Москва, Территория Инновационного Центра “Сколково”, Большой бульвар, д. 30, ст. 1.

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

⁵ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”», Москва, Россия

В работе рассмотрена технология изготовления субволновых оптических волокон на основе одномодового волокна 405-НР методом растяжения с линейным изменением длины зоны нагрева. Исследовано влияние параметров вытяжки на диаметр перетяжки и оптическое пропускание. Показано, что предложенный подход позволяет получать субволновые волокна с диаметром перетяжки порядка 385 нм при относительном пропускании до 97%. Полученные результаты подтверждают перспективность использования субволновых оптических волокон 405-НР в системах ультрафиолетовой фотоники и связи с высокодобротными микрорезонаторами.

Ключевые слова: субволновые оптические волокна; ультрафиолетовая фотоника; эванесцентное поле; микрорезонаторы.

6.4 Компактная система лазерного охлаждения для транспортируемого оптического стандарта частоты на основе атомов иттербия

Антон Павлович Вялых^{1,2}, А. В. Семенко¹, А. В. Коханов^{1,2}, Г. С. Белотелов¹

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево, Московская область, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

В работе представлена компактная система лазерного охлаждения для транспортируемого оптического стандарта частоты на холодных атомах ^{171}Yb . Ключевым элементом системы является вторичная магнитооптическая ловушка, работающая на интеркомбинационном переходе. В отличие от классических конфигураций подобных систем, загрузка данной ловушки в компактной системе лазерного охлаждения осуществляется без использования первичной магнитооптической ловушки на дипольном переходе. Указанное свойство позволило значительно упростить систему и уменьшить её габариты. Для эффективной загрузки атомов во вторичную магнитооптическую ловушку был разработан зеемановский замедлитель. Установка позволяет захватить $\sim 10^6$ атомов ^{171}Yb с температурой ~ 35 мК. Достигнутые параметры позволяют загрузить в оптическую решётку $4 \cdot 10^3$ атомов, что достаточно для работы оптического стандарта частоты.

Ключевые слова: Лазерное охлаждение, Оптический стандарт частоты, Транспортируемый оптический стандарт частоты, Магнитооптическая ловушка, Холодные атомы, Зеемановский замедлитель, Иттербий.

6.5 Эффект Вернье в спектральной интерферометрии и его применение для измерения тонких пленок (Приглашенный)

А. А. Маркварт¹, Л. Д. Завалишина¹, А. В. Петров¹, Николай Александрович Ушаков¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Измерение расстояний является важной задачей во многих областях науки и техники. Спектральная интерферометрия выделяется среди множества других методов высокой точностью и возможностью измерения абсолютных расстояний. Во многих работах для улучшения её чувствительности применяется эффект Вернье, возникающий при наличии двух интерференционных компонент с близкими разностями оптических путей. В работе анализируется точность и

разрешающая способность таких измерений с учетом реальных экспериментальных шумов для различных параметров интерферометров. С использованием соотношений Рао-Крамера показан сложный характер влияния шумов на результаты обработки интерференционных сигналов в случае использования эффекта Вернье. Выявлено, что в условиях, обеспечивающих экстремальное увеличение чувствительности критически возрастает влияние шумов, что определяет оптимальные параметры при проектировании сверхточных интерферометрических измерителей. Отдельно анализируется возможность применения эффекта Вернье для измерения толщины прозрачных тонких пленок произвольной толщины.

Ключевые слова: Спектральная интерферометрия, оптическая когерентная томография, неразрушающий контроль, разрешающая способность

6.6 Применение жидкого эталонного зеркала для коррекции аберраций оптической системы широкоапертурного интерферометра со совмещенными схемами Тваймана-Грина и Физо

Иван Юрьевич Фандиенко^{1,2}, Г.Н. Вишняков¹, В.Л. Минаев¹

¹ ООО "Электростекло", Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

В работе рассматривается опыт применения жидкого зеркала для измерения топограмм передней и задней поверхностей плоскопараллельной пластины, используемой в качестве эталона в широкоапертурном интерферометре со совмещенными схемами Тваймана-Грина и Физо. Измерение топограмм поверхностей плоскопараллельной пластины происходит в режиме Тваймана-Грина, жидкое зеркало при этом выступает в качестве идеальной эталонной поверхности. Измеренные топограммы позволяют произвести коррекцию аберраций оптической системы интерферометра при работе в схеме Физо, что в свою очередь позволяет повысить точность измерений.

Ключевые слова: Оптика, Метрология, схема Тваймана-Грина, схема Физо, интерферометрия, жидкое зеркало

6.7 Расчет влияния позиционирования первой поверхности линзы на децентрировку второй в прямом ходе луча

Ян Владимирович Терло, Н.О. Прохоренков, А.Б. Острун

ООО «Опто-Технологическая Лаборатория», Санкт-Петербург, Россия

При проектировании высокотехнологичных оптических приборов зачастую необходимо применять самоцентрирующуюся конструкцию. При таком типе конструкции линзы сначала фиксируются в оправе, затем устанавливаются на специальный станок и смещением и наклоном линзы в оправе устраняют биение автоколлимационных точек относительно оси вращения шпинделя. После этого выполняется проточка торцевой и цилиндрической поверхностей линз, формируя базовые поверхности относительно оптической оси линзы. Важным этапом является последующий контроль остаточной децентрировки относительно этих баз. При этом большинство приборов контроля оснащены только одним автоколлиматором, поэтому приходится контролировать децентрировку второй поверхности линзы через толщину стекла с учетом позиционирования первой поверхности. В данной работе предоставляются результаты исследования влияния позиционирования одной поверхности на децентрировку другой для сферических линзовых элементов посредством геометрического отображения лучей, а также демонстрируется принцип работы алгоритма расчета истинной децентрировки поверхности с учетом влияния аберраций. Примеры измерений реализуются с помощью «Прибора для контроля центрировки OptoTL – С1».

Ключевые слова: Оптика, Децентрировка, Геометрическое отображение лучей, Аберрации.

6.8 Фотополимерное прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – катализатор кардинальных преобразований в серийном оптическом производстве и объективостроении

М. М. Ахметов¹, Н. А. Гурин^{2,3}, Л. В. Бордюжа⁴, С. В. Косковский¹, Анатолий Васильевич. Лукин¹, д. т. н., А. Н. Мельников¹, Д. Р. Нурмухаметов⁴, О. Б. Яковлев⁵

1 – Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия;

2 – Акционерное общество «Новосибирский приборостроительный завод», Новосибирск, Россия;

3 – Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской Академии наук, Новосибирск, Россия;

4 – Акционерное общество «Казанский оптико-механический завод», Казань, Россия;

5 – Акционерное общество «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» им. Э.С. Яламова», Екатеринбург, Россия

В докладе обсуждаются результаты исследования пробных партий комбинированных оптических элементов-линз нескольких типоразмеров, изготовленных в Государственном институте прикладной оптики методом прецизионного реплицирования по техническим требованиям предприятий.

Ключевые слова: Метод прецизионного реплицирования, Малоусадочная полимерная композиция холодного отверждения, Комбинированный оптический элемент-линза, Модуль оптической передаточной функции.

6.9 Сенсор внутриглазного давления на контактной линзе на основе волноводного лазера с распределенной обратной связью

Екатерина Мусихина, С. Иванов, И. Фрадкин, А. Вишневы, А. Хребтов, Р. Куртаев, И. Радько, А. Арсенин, В. Волков

Emerging Technology Research Center, XPANCEO, Dubai, UAE

Измерение внутриглазного давления представляет собой сложную задачу, обусловленную необходимостью определения малых деформаций мягкого материала (роговицы), модуль упругости которого < 0.5 мПа. Мы представляем решение данной проблемы в виде волноводного лазера с распределенной обратной связью (РОС) на полимерном красителе F8BT. Решетка для РОС-лазера изготовлена методом голографической УФ-литографии. Структура лазера представляет собой слой эластичного материала, поверх которого нанесен слой красителя с решеткой второго порядка дифракции. Лазер перенесен на поверхность контактной линзы, проведены измерения длины волны генерации РОС-лазера при изменении давления в модели глаза. Полученная чувствительность сенсора составила 27 пм на 1 мм рт ст, при длине волны около 570 нм, ширина линии 0,4 нм. Энергия импульса накачки < 10 мкДж/см².

Ключевые слова: Оптика, Голография, Лазер с распределенной обратной связью, Полимерный краситель F8BT, Сенсор внутриглазного давления

6.10 Метод спекл-картин для прецизионного измерения длин волн лазерного излучения в оптическом диапазоне

Алексей Валерьевич Коханов^{1,2}, И. Н. Новиков¹, А. А. Ерофеева¹, Г. С. Белотелов¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе описывается метод измерения длины волны лазерного излучения путем формирования и анализа изображений спекл-картин – случайных многолучевых интерференционных картин, образующихся вследствие прохождения когерентного излучения через нелинейную рассеивающую среду. Продемонстрирована экспериментальная установка для исследования спекл-картин, сформированных в интегрирующей сфере и изолированных от влияния нецелевых параметров. Определена разрешающая способность, составившая 2 МГц на длине волны 556 нм. Реализована классификация спекл-картин по длинам волн с помощью сверточной нейронной сети. Продемонстрированы результаты обучения нейросети, позволяющие классифицировать длины волн с шагом в 10 МГц.

Ключевые слова: Спекл-изображение, Измерение длин волн, Оптика, Оптическая метрология, Нейросеть.

6.11 Совершенствование записи интерферограмм колеблющегося объекта при использовании кольцевой диафрагмы в оптической схеме мобильного спекл-интерферометра

Алексей Викторович Ивченко¹, А. И. Жужукин¹, Р. Н. Сергеев¹

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

Исследован процесс регистрации форм колебаний тестируемого объекта при использовании кольцевой диафрагмы в оптической схеме мобильного спекл-интерферометра с диффузно-рассеянным опорным пучком. Определены оптимальные условия записи интерферограмм при значительном сужении кольцевой апертуры (≈ 0.8) входного зрачка объектива цифровой камеры. В этом случае отмечается повышение контраста интерференционных полос на изображении объекта.

Ключевые слова: Спекл-интерферометр, объектив, кольцевая диафрагма, регистрация, объект вибрация

6.12 Двухканальное устройство имитации динамических сцен

Денис Юрьевич Васильев, В. И. Курт, Д. А. Егошин

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

Доклад посвящен вопросам обеспечения испытаний двухканальных оптико-электронных систем. Указан способ снижения объема натурных испытаний. Представлено устройство, генерирующее статические и динамические имитационные изображения в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Описаны его оптическая схема и принцип работы.

Ключевые слова: Оптико-электронные системы, Микрзеркальная матрица, Широтно-импульсная модуляция.

6.13 Аппаратура для измерения энергетических характеристик источников излучения

Денис Алексеевич Егошин, В. И. Курт, Д. Ю. Васильев

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

Доклад посвящён решению актуальной задачи измерения энергетических характеристик источников излучения, применяемых для настройки и калибровки оптико-электронных приборов в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Для проведения измерений разработаны яркомер и фотометр. Описаны их схемы и конструктивные особенности. Приведены результаты экспериментальных исследований, включающих определение диапазона измеряемой яркости и энергетической освещённости, а также оценку погрешностей измерений. Представлены относительные спектральные характеристики чувствительности приборов.

Ключевые слова: Энергетические характеристики, Ультрафиолетовое излучение, Инфракрасное излучение, Фотометр, Яркомер, Яркость, Энергетическая освещённость, Относительная спектральная характеристика чувствительности.

Стендовые доклады

С.6.1 Разработка прецизионных лазерных интерферометров и исследования на эталоне единицы длины ГЭТ 199

Евгений Александрович Лавров

ФГУП «ВНИИФТРИ», пгт. Менделеево, Россия

В работе приведены результаты разработки и исследований метрологических характеристик одноволнового и двухволнового лазерных интерферометров, предназначенных для измерений приращений длин в диапазоне до 60 м. В работе описаны оптические схемы интерферометров и приведены результаты экспериментальных исследований на базе Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199. Разработанные интерферометры обеспечивают необходимый запас точности относительно серийно выпускающихся интерферометрических систем измерений линейных перемещений, используемых потребителями.

Ключевые слова: Лазерный интерферометр, Прецизионные измерения длины, Оптическая Метрология.

С.6.2 Исследование многоциклового усталости композита металл-полимер методами спекл-интерферометрии

Константин Вячеславович Наумов^{1,2}, А.П. Владимиров¹, И.С. Каманцев¹, Н.А. Друкаренко¹, М.А. Никифоров²

¹ Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Были исследованы на многоцикловую усталость образцы, в которых две части металлической сетки вводились на поверхность оргстекла прямоугольной формы их нагревом. Развитие усталостных процессов во времени изучали с использованием новой широгрaфии, позволяющей бесконтактно определять деформации материалов на минимальной базе порядка 1 мкм. Во время испытаний амплитуда цикла последовательно увеличивалась. При постоянной амплитуде цикла необратимые деформации на всех участках увеличиваются по механизму циклической ползучести. По распределению деформаций на поверхности образца выявлено, что с самого начала опытов на всех этапах циклического нагружения максимальное приращение деформаций наблюдается в одном месте на стыке металл-полимер, где в итоге из-за разрушения металлической сетки и возникла усталостная трещина.

Ключевые слова: Усталость, диагностика, спекл-интерферометрия.

С.6.2 Компьютерная симуляция интерферограмм в схемах с дифракционными оптическими элементами

Федор Сергеевич Смык^{1,2}, Н. А. Путилин^{1,2}, А. Н. Путилин^{1,2}, С. С. Копёнкин^{1,2}

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В работе представлены результаты разработки компьютерных моделей, описывающих различные интерферометрические установки, в том числе – с использованием дифракционных оптических элементов. Принцип действия модели заключался в использовании непоследовательной трассировки лучей с передачей информации о длине оптического пути, который прошёл каждый луч. Интерференция рассматривалась путём обратной фильтрации лучей, попавших на заданную поверхность, с восстановлением по отдельным лучам данных о фазе волны и её интенсивности. Метод показал работоспособность для описания интерференции пространственно-когерентных волн с плавно изменяющимся волновым фронтом. Ключевым допущением рассматриваемого подхода являлось отсутствие учёта дифракции на апертурах компонентов, а также невозможность передачи информации об объектах типа транспарант или рассеиватель.

Ключевые слова: Интерферометры, Непоследовательная трассировка лучей, Оптическая длина пути, Дифракционные решётки

С.6.4 Методика оценки длины когерентности газовых лазеров для голографии

Алексей Станиславович Кузнецов¹, М. В. Волкова¹, В. В. Маркин¹, И. А. Кузнецов²

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² ГБОУ «Школа № 354 имени Д.М. Карбышева», Москва, Россия

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования длины когерентности газового гелий-неонового лазера ГН-15-1 на экспериментальной установке, построенной по схеме интерферометра Майкельсона. Показана согласованность экспериментальных и теоретических результатов исследований.

Ключевые слова: Когерентность лазера, Интерферометр Майкельсона, Интерференционная картина, Голография.

Секция 7

Квантовые оптические технологии

Устные доклады

7.1 Multimode squeezed light and its applications (Приглашенный)

Шарапова Полина Родионовна, к. ф.-м. н. (РФ), д. ф.-м. н. (Германия), Руководитель группы "Мультимодовая квантовая оптика"
Российский Квантовый Центр, Москва

7.2 Орбитальный угловой момент квантовых векторных оптических вихрей (Приглашенный)

Вашукевич Евгений Александрович¹, к.ф.-м.н., В. А. Леонов¹, Е.В. Малютина¹, Д.Д. Решетников¹, Т.Ю. Голубева¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе аналитически рассчитаны непараксиальные поправки к орбитальному и спиновому угловым моментам для векторных вихревых полей с использованием формализма калибровочно-инвариантного векторного потенциала. Продемонстрировано, что для векторных оптических вихрей существует два вклада в орбитальный угловой момент, пропорциональных разным топологическим зарядам, один из которых описывает порядок фазовой неоднородности, а другой - поляризационной. Также в работе обсуждается подход к квантованию векторных оптических вихревых полей через выделение набора ортогональных полевых мод с неоднородным пространственным распределением поляризации.

Ключевые слова: квантовая оптика, орбитальный угловой момент, оптические вихри, топологических заряд

7.3 Генерация сжатого состояния Фока атомного ансамбля в гауссовом свето-атомном взаимодействии с измерением

Эдуард Рустемович Зинатуллин, С.Г. Григорьев, Е.Н. Башмакова, Е.А. Вашукевич
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен исследованию схемы генерации сжатых состояний Фока в гауссовом свето-атомном взаимодействии с измерением числа частиц. Рассмотрены основные преимущества и особенности генерации таких состояний в свето-атомных системах, когда над светом проводится процедура измерения числа частиц, а сжатое состояние Фока оказывается записано на спиновую когерентность ансамбля атомов.

Ключевые слова: сжатые состояния Фока, атомно-световое взаимодействие, процедура измерения фотонов

7.4 Передача и усиление негауссовости с помощью атомно-полевого интерфейса

Хуан Карлос Бенхамин¹Луна Веронико¹, К. С. Тихонов^{1,2,3}, П. Р. Шарапова⁴, О. В. Тихонова⁵

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

³ Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴ Падерборнский университет, Падерборн, Германия

⁵ Московский государственный университет, Москва, Россия

В данной работе рассматривается процесс переноса негауссовых квантовых состояний между двумя световыми полями, взаимодействующими друг с другом через ансамбль атомов с лямбда-конфигурацией энергетических уровней. Мы анализируем динамику системы и оцениваем отрицательность функции Вигнера для различных комбинаций входных

гауссовых и негауссовых квантовых состояний. Мы показали, что если одно из полей было в негауссовом состоянии, то в результате такого взаимодействия возможен не только перенос этого состояния на состояние второго поля, но и усиление его квантовых свойств. Кроме того, данную систему можно также использовать для генерации негауссовых полевых состояний из гауссовых за счет нелинейного характера взаимодействия в рассматриваемом атомно-полевом интерфейсе.

Ключевые слова: Негауссовость, Атомно-световой интерфейс, Инженерия квантовых состояний, Квантовая оптика.

7.5 Использование сжатых состояний света в оптических сенсорах на основе микрорезонаторов

Дария Игоревна Салыкина^{1,2}, Д. К. Шахбазьянц^{1,3}, Ф. Я. Халили¹

¹ Российский квантовый центр, Сколково, Большой бульвар 30, стр. 1, Москва, 121205, Россия

² Физический факультет, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва 119991, Россия

³ Московский Институт Физики и Технологий, Институтский переулок 9, Долгопрудный, 141701, Россия

Высокодобротные оптические микрорезонаторы сочетают в себе низкие потери и высокую концентрацию оптической энергии в небольшом эффективном объеме излучения, что делает их привлекательной платформой для создания оптических сенсоров. В то время как свет удерживается в микрорезонаторе за счет полного внутреннего отражения, часть оптического поля, известная как выпадающее поле, выходит наружу, делая резонансную частоту моды резонатора чувствительной к изменениям окружающей среды.

В этой работе мы исследуем пределы квантовой чувствительности сенсоров такого типа. Мы теоретически показываем, что, приготовив пробный луч в сжатом квантовом состоянии и используя дополнительное сжатие внутри резонатора, можно превзойти предел дробового шума. В этом случае чувствительность схемы оказывается ограничена только оптическими потерями и доступной степенью сжатия. Мы применяем этот подход к квантово невозмущающим сенсорам числа частиц.

Ключевые слова: квантовая метрология, квантовые невозмущающие измерения, сжатые состояния света, оптические сенсоры

7.6 Генерация состояний кота Шредингера с использованием негауссовых ресурсных состояний в схемах с измерениями

Александра Вячеславовна Баева, И. В. Соколов, Т. Ю. Голубева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Мы рассматриваем схемы генерации оптических состояний кота Шредингера, основанные на смешении сигнального поля с полем, подготовленным в негауссовом ресурсном состоянии, и последующем гомодинном измерении. Анализируется множество схем, построенных по данному принципу, различающихся выбором ресурсного и сигнального квантовых состояний, а также типом смешивающей операции. Наряду с точным квантовым описанием затворов предлагается наглядный полуклассический подход к анализу таких схем. Исследуются верность и вероятность генерации выходных состояний. Показано, как варьирование параметров схемы позволяет оптимизировать эти характеристики.

Ключевые слова: негауссовы состояния света, состояние кота Шредингера, состояние кубической фазы, состояние Фока.

7.7 Оптимальные сжатые состояния Фока для коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки

Елизавета Николаевна Башмакова, Э.Р. Зинатуллин, Т. Ю. Голубева
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В рамках доклада рассматриваются квантовые протоколы коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки, где в качестве кодовых слов используются различные сжатые состояния Фока. Рассмотрены оптимальные и экспериментально достижимые параметры сжатых состояний Фока для протоколов коррекции ошибок с точки зрения Petz верности канала. Продемонстрирована конкурентоспособность сжатых состояний Фока в защите квантовой информации в канале с ошибкой потери фотонов и дефазировкой.

Ключевые слова: Коррекция ошибок квантовых вычислений, Бозонные коды коррекции, Сжатые состояния Фока, ошибка потери фотонов, ошибка дефазировки.

7.8 Полностью оптические управляемые резонансные ячейки памяти. Теория.

Игорь Анатольевич Чехонин¹, М. А. Чехонин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Предложена простая ячейка оптической памяти, состоящая из слоя резонансной среды и зеркала. Такая голографическая ячейка имеет несколько состояний с оптической памятью. При использовании бихроматического импульса лазерной накачки появляется возможность полностью оптического управления свойствами ячейки памяти, вплоть до её полного включения и отключения. На основе решения связанных уравнений Максвелла-Блоха показано, что существует несколько степеней свободы для управления её свойствами: "площадь" бихроматического импульса с резонансными частотами ω_1 и ω_2 , величина расстройки $|\omega_1 - \omega_2|$ и расстояние между слоем резонансной среды и зеркалом. Показано, что наиболее перспективной областью использования таких ячеек памяти является применение в энерго-эффективных оптических нейроморфных системах.

Ключевые слова: Оптическая память, Голография, Резонансная среда, Оптические нейроморфные системы.

7.9 Полностью оптические управляемые резонансные ячейки памяти. Эксперимент.

В. С. Егоров¹, И. А. Чехонин¹, Игорь Анатольевич Чехонин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведена экспериментальная верификация принципа действия ячейки оптической памяти, состоящей из слоя резонансной среды и зеркала. В качестве резонансной среды использовались метастабильные атомы в разрядной трубке с импульсным разрядом в Ne. Бихроматический наносекундный импульс лазерной накачки среды с резонансными частотами ω_1 и ω_2 создавался перестраиваемым лазером на красителе. В полном соответствии с теорией было показано, что параметры ячейки оптической памяти периодически изменяются при изменении величины расстройки $|\omega_1 - \omega_2|$ и расстояния между слоем резонансной среды и зеркалом. Для наносекундных импульсов накачки с мощностью ≈ 1 мВт наиболее перспективной областью использования предложенных ячеек памяти является применение в энерго-эффективных оптических нейроморфных системах.

Ключевые слова: Оптическая память, Голография, Резонансная среда, Оптические нейроморфные системы.

Стендовые доклады

С.7.1 Разработка оптической системы адресации света к ионам кальция на основе интегрально-оптических элементов

Ксения Олеговна Седых^{1,2}, К. В. Осадчий³, А. Д. Голиков^{2,4}, А.С. Подлесный⁵, С.Ю. Заруцкий⁵, А.А. Невзоров², В.В. Ковалюк^{1,2}, К.Е. Лахманский⁵ Г. Н. Гольцман^{1,5}

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

² Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

³ Московский физико-технический институт, Москва, Россия

⁴ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁵ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Интегрально-оптические элементы позволяют реализовать процессы подготовки и инициализации квантового состояния ионного кубита. Однако, их параметры должны быть оптимизированы индивидуально под конкретную реализацию. Основными параметрами, влияющими на эффективность и центральную длину волны света у дифракционных решеток являются значения периода и фактора заполнения, которые могут быть подобраны для его энергетических переходов. В данной работе представлен численный расчет, технологический маршрут изготовления и экспериментальные данные по исследованию центральной длины волны устройств в зависимости от периода и фактора заполнения при фиксированном угле ввода/вывода, равному 8 градусов. Полученные значения параметров будут использованы для создания оптической системы адресации света в поверхностных ионных ловушках.

Ключевые слова: Фотоника, Дифракционные решетки, Оптическая система адресации, Квантовый компьютер, Поверхностная ионная ловушка.

С.7.2 Генерация многоголовых котов Шредингера в схемах с измерением гауссовых состояний

Елизавета Алексеевна Нестерова¹, С. Б. Королев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе будет предложена схема генерации суперпозиции состояний Фока с номерами кратными четырем или восьми. Предложенный протокол основан на измерении многомодовых гауссовых состояний с помощью детекторов числа частиц. В работе проведен сравнительный анализ полученных состояний с состояниями многоголовых котов, получена оценка верности и ее зависимость от количества измеренных частиц. Определена оптимальная схема генерации таких состояний.

Ключевые слова: Состояния Фока, состояния компаса, многоголовые коты.

С.7.3 Сверхчувствительный фотодиод в бортовом терминале лазерной связи

Д. О. Севрюков^{1,2}, Р. М. Бахшалиев^{1,2}, С. Д. Левашов^{1,2}, В. Е. Мерзлинкин^{2,3}, К. А. Барбышев^{2,3}, Владимир Леонидович Курочкин³, Р. В. Ожегов^{1,3}

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

² КуСпэйс Технологии, Москва, Россия

³ Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", Москва, Россия

С.7.4 Спонтанное параметрическое рассеивание векторных оптических вихрей

Владислав Андреевич Леонов¹, Е.А. Вашукевич¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлено теоретическое исследование параметрического рассеивания векторных оптических вихрей в двух тонких нелинейных кристаллах с ортогональными оптическими осями и с квадратичной нелинейностью восприимчивости. Показано, что управление поляризацией и пространственной структурой накачки позволяет селективно создавать кукуартные коррелированные по неоднородной поляризации состояния Белла векторных оптических вихрей. Также в работе обсуждаются особенности квантования полей с неоднородной пространственной поляризацией, то есть выделение независимых мод набора ортогональных осцилляторов, соответствующие векторным вихрям.

Ключевые слова: квантовые векторные оптические вихри, неоднородная поляризация, куквартные состояния Белла, топологический заряд.

С.7.5 Подходы к томографии квантовых кудитных состояний на основе векторных оптических вихрей

Тимофей Константинович Король¹, Д. Д. Решетников¹, Е. А. Вашукевич¹, Т. Ю. Голубева¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе обсуждаются подходы к реализации процедуры томографии квантовых кудитных состояний, базисными векторами гильбертова пространства которых являются состояния векторных оптических вихрей. Показаны методы построения набора симметричных информационно-полных (SIC-POVM) операторов в четырехмерном пространстве куквартов при помощи выбора доверительного вектора и применения операторов сдвига Гейзенберга-Вейля. Данный подход сравнивается с построением полного набора взаимно-несмещенных базисов (MUB) для куквартного пространства векторных оптических вихрей.

Ключевые слова: Векторные оптические вихри, Томография квантового состояния, MUB-измерения, SIC-POVM операторы.

С.7.6 О проблемах реализации квантовых алгоритмов в непрерывных переменных.

Степан Геннадьевич Григорьев¹, Е.А. Вашукевич¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В данной работе рассматривается подход к построению алгоритмов в непрерывных переменных, таких как алгоритмы Гровера, Дойча-Йожи, Вазирани, в непрерывных переменных, который нивелирует недостатки их дискретных аналогов: накопление ошибок и сложность реализации. Существующие формулировки содержат оператор проекции на фазовое пространство. Для построения такого оператора необходимо иметь возможность выполнять нелинейные операции с высокой точностью, что делает реализацию алгоритмов крайне нетривиальной задачей. Предлагается использовать негауссовы состояния в качестве ресурсных состояний.

Ключевые слова: непрерывные переменные, квантовые алгоритмы, алгоритм Гровера, негауссовы состояния, оператор проекции.

С.7.7 Анализ влияния структуры входных состояний на вычислительные ресурсы в задаче бозонного сэмплинга

Жанна Суреновна Карапетян, Е. Н. Башмакова, Т. Ю. Голубева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен сравнительному анализу ресурсной эффективности в задаче бозонного сэмплинга для различных типов входных состояний. Рассматриваются три класса квантовых состояний: однофотонные состояния, сжатые состояния осцилляторов и сжатые состояния Фока. Основное внимание уделяется количественной оценке ресурсной эффективности, под которой понимается способность достичь заданной вычислительной сложности при минимизации экспериментальных затрат таких как число используемых мод, средней энергии входного состояния и требования к эффективности детектирования.

Ключевые слова: сжатые состояния осцилляторов, сжатые состояния Фока, однофотонные состояния, бозонный сэмплинг

Секция 8 Технологии микро- и наноструктурирования

Устные доклады

8.1 Реинжиниринг штампового электронно-пучкового нанолитографа (Приглашенный)

Наумов Андрей Витальевич, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва
МПГУ, Москва

8.2 Двухслойные регистрирующие среды для лазерной записи дифракционных и маскирующих структур (Приглашенный)

Виктор Павлович Корольков, д. т. н., Д.А. Белоусов, Р.И. Куц, Д.Е. Капустина, А. И. Мальшев, К.А. Окотруб
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Плёнки металлов активно используются в качестве регистрирующих сред в технологии изготовления амплитудных дифракционных и маскирующих структур. В настоящее время наиболее распространённым материалом для формирования таких структур являются плёнки хрома. Тем не менее задача разработки и исследования новых пленочных регистрирующих сред для безрезистной лазерной записи является актуальной. В последнее время активно исследуются термохимическая лазерная запись на двухслойных материалах, в частности с покровным слоем кремния. В докладе сделан обзор результатов работ в данной области, выполненных в России и за рубежом за последние годы. Рассмотрены перспективы применения двухслойных сред для изготовления различных дифракционных структур, компьютерно-синтезированных голограмм и координатно-измерительных шкал.

Ключевые слова: Двухслойные среды, Термохимическая лазерная запись, Дифракционные структуры, Компьютерно-синтезированные голограммы, Координатно-измерительные шкалы.

8.3 Лазерная инженерия поверхности кремния для расширения инфракрасной фоточувствительности

Виктория Игоревна Пряхина¹, П. А. Палецких¹, Д. Е. Ткачук¹, А. А. Шерстобитов¹,
А. Р. Ахматханов¹, С. И. Кудряшов^{1,2}

¹ Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

² Физический институт им. П. Н. Лебедева, Москва, Россия

Импульсное лазерное облучение – перспективный метод создания современных оптоэлектронных компонентов, интегрируемых в кремниевую микро- и нанoeлектронику. Сильнонеравновесные условия при воздействии лазерного импульса приводят к структурированию поверхности кремния и внедрению высокой концентрации примесей (сверхлегирование) из нанесенной на поверхность тонкой металлической пленки. Контроль процесса возможен за счет изменения параметров длительности импульса и плотности энергии излучения. Наносекундные импульсы приводят к глубокому легированию, фемтосекундные – к поверхностному структурированию. Образующиеся примесные зоны обеспечивают внутризонное поглощение фотонов и фотоотклик кремния во всем ближнем ИК-диапазоне. Продемонстрирована возможность создания на основе модифицированной пластины кремния ИК-фотодетектора с фоточувствительностью 10-100 мА/Вт на длине волны 1550 нм.

Ключевые слова: Фотоника, Оптоэлектроника, Лазерное структурирование, Оптическое легирование, Кремниевая электроника

8.4 Лазерная микро- и нанофабрикация сенсорных платформ для оптического и электрохимического определения биогенных аминов

Евгения Мусаевна Хайруллина¹, Д.В. Павлов¹, А.С. Левшакова², Ю.М. Бородаенко¹, Е. В. Мицай¹, Ю.Н. Кульчин, А.А. Кучмижак¹

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены лазерные подходы к созданию сенсорных платформ для определения биогенных аминов. Рассмотрены фемтосекундная печать плазмонных метаповерхностей на пленках золота и серебра для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света, а также лазерно-индуцированный синтез никель-графеновых электродов и золото-модифицированных электродов на основе лазерно-индуцированного графена для электрохимического детектирования. Результаты демонстрируют перспективность масштабируемой лазерной микро- и нанофабрикации для экспресс-сенсоров пищевого и биомедицинского контроля.

Ключевые слова: Лазерная фабрикация, Плазмонные метаповерхности, Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния света, Электрохимические сенсоры

8.5 Создание поляризационных оптических устройств на основе пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников фемтосекундным лазерным излучением

*Дмитрий Валерьевич Шулейко¹, П.П. Пахольчук^{1,2}, Д.А. Помазкин^{1,2}, П.И. Лазаренко³, С.А. Козюхин⁴
П.К. Кашкаров^{1,5}*

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

³ НИУ «МИЭТ», Зеленоград, Россия

⁴ Институт общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁵ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе продемонстрирована возможность формирования субмикронных оптически анизотропных лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на пленках халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП), а также управления оптическим запаздыванием и ориентацией оси анизотропии в этих структурах путем изменения параметров лазерного облучения. Подобные ЛИПСС на ХСП могут найти применение в качестве основы интегрированных оптических устройств для ближнего инфракрасного диапазона. Для повышения оптической анизотропии структур нами предложен подход, включающий последовательное осаждение и лазерное облучение слоев ХСП, чередующихся с прозрачными разделительными слоями, обладающими отличающимся показателем преломления.

Ключевые слова: халькогенидные стеклообразные полупроводники, фемтосекундное лазерное излучение, оптическая анизотропия.

8.6 Динамика периодического взрывного вскипания среды вокруг наночастицы при наносекундном лазерном облучении

Анастасия Владимировна Венедиктова, И. М. Кисляков, А. Ю. Власов, В. Ю. Венедиктов
Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

8.7 Лазерный синтез электрохимических сенсоров из глубоких эвтектических растворителей

*Левшакова Александра Сергеевна, к. х. н.^{1,2}, Е. Т. Сатымов^{2,3}, М. В. Канева²,
Е.М. Хайруллина³*

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

В данной работе представлен метод лазерного синтеза металлических структур из глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) для создания электрохимических сенсоров на гибких полимерных подложках (ПЭН, ПЭТ, ПИ). Использовано лазерно-индуцированное осаждение из жидкой фазы, оптимизированное методом Нелдера-Мида. Полученные гибкие электроды обладают высокой электропроводностью и механической стабильностью. Разработанный подход позволяет изготавливать бесферментные сенсоры и компоненты гибкой электроники с высокой эффективностью и масштабируемостью.

Ключевые слова: Лазерный синтез, электрохимические сенсоры, глубокие эвтектические растворители, гибкие подложки, дизайн эксперимента.

Стендовые доклады

С.8.1 Мультипериодные ЛИППС на тонких плёнках титана: контроль периода и ориентации структур

Александра Алексеевна Машарская¹, М. Д. Васильев¹, М. Г. Воробьев², Д.А. Синев¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Ресурсный центр Научного парка СПбГУ РЦ РМиКТ, Санкт-Петербург, Россия

Получены одномерные и двумерные мультипериодные лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС) с различной ориентацией повторным экспонированием кварцевой подложки с титановой плёнкой (30 нм) наносекундными импульсами. Наклон образца от 0 до 30 градусов позволяет управлять периодом от 720 ± 20 нм до 840 ± 20 нм для ЛИППС, формирующихся перпендикулярно направлению сканирования. Предварительно сформированная одномерная решётка влияет на параметры двумерного рельефа, а поворот полуволновой пластины – на ориентацию структур и позволяет воспроизводить ортогонально и гексагонально симметричные структуры при повторном экспонировании. Продемонстрирована возможность масштабирования записанных структур, и возможность формирования структур при тройном и четверном экспонировании плёнки. Результаты значимы для управляемого микроструктурирования поверхностей для плазмонных применений.

Ключевые слова: ЛИППС, наноструктуры, тонкие плёнки, мультипериодные решетки, 2.5D структурирование

Секция 9

Цифровая голография и методы визуализации

Устные доклады

9.1 Подводная цифровая голография частиц в арктических исследованиях (Приглашенный)

Виктор Валентинович Дёмин, к.ф.-м.н., доцент, первый проректор

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

9.2 Принцип фантомной визуализации в оптической микроскопии

Андрей Михайлович Вьюнышев^{1,2}, Н. Н. Давлетшин^{1,2}, А. С. Чиркин^{1,3}

¹ Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Техника оптической микроскопии модифицирована с использованием принципа фантомной визуализации, который основан на измерении корреляционной функции интенсивности и обладает рядом достоинств по сравнению с традиционным изображением. Исследованы зависимости качества и контраста изображения от положения объективов микроскопа в сравнении со стандартной оптической микроскопией. Определена роль оптических элементов в формировании изображения в фантомной микроскопии. Предложена псевдо-однопиксельная визуализация, сокращающая время восстановления изображения. Результаты исследований демонстрируют перспективность развитого подхода.

Ключевые слова: Оптическая микроскопия, Фантомная визуализация, Однопиксельная визуализация, Корреляции интенсивности, Глубина резкости.

9.3 Неоднозначность интерпретации реконструированных цифровых голограмм и их особенности: обзор методов реконструкции

Андрей Петрович Зиновьев, Н. И. Лапин

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина (Мининский университет), Нижний Новгород, Россия

На примере, общедоступных цифровых голограмм из открытых источников, рассматриваются артефакты, возникающие в процессе восстановления (реконструкции), которые являются сопутствующей информацией и не учитываются при дальнейшей интерпретации зафиксированных событий. Предложен алгоритм масштабирования цифровых голограмм для предварительной оценки корректности данных.

Ключевые слова: Оптика, Цифровая голография, Артефакты реконструкции голограммы

9.4 Двухдлинноволновая цифровая голографическая интерферометрия и система лазерного сканирования в диагностике первой стенки токамака Глобус-М2

Игорь Вячеславович Алексеенко, к. ф.-м. н.¹, А.А. Белокур², Д.И. Елец², А.М. Кожевникова¹, О.С. Медведев², А.Г. Раздобарин², Л.А. Снигирев²

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В работе описывается метод цифровой голографической интерферометрии (ДЦГИ) в сочетании с техникой лазерного сканирования (ЛИДАР) для оценки степени износа защитной стенки экспериментального токамака Глобус-М2.

Предложенные техники имеют разную чувствительность и, таким образом, дополняют друг друга в задачах оценки изменений поверхности обращенных к плазме защитных элементов токамака. Дополнительно метод ЛИДАР позволяет провести первичные измерения пространственной ориентации исследуемого элемента для компенсации фазового набега при использовании техники ДЦГИ, чувствительность которой достигает десятков микрон. Данный подход позволит простым способом откалибровать измерительный комплекс при проведении интерференционных измерений.

Ключевые слова: Цифровая голография, цифровая голографическая интерферометрия, система лазерного сканирования

9.5 Метод цифровой голографической интерферометрии для исследования плазмы искровых разрядов

Анастасия Михайловна Кожевникова¹, И. В. Алексеенко¹

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

В работе описывается метод цифровой голографической интерферометрии для наблюдения и оценки параметров плазмы, формирующейся при атмосферных условиях в импульсно-периодическом режиме генерации. Для исследования выбрана плазма искрового разряда, в том числе с формированием апокампического разряда, которые в оптическом диапазоне наблюдения являются прозрачными (фазовыми) объектами. Метод демонстрирует возможность оценки концентрации электронов в плазме, а также визуализации всего процесса формирования и деградации разряда.

Ключевые слова: Цифровая голография, голографическая интерферометрия, плазма искрового разряда.

9.6 Особенности аппаратной реализации и алгоритмов обработки в поляризационно-чувствительном цифровом голографическом микроскопе

Алексей Викторович Черных¹, В. Р. Гресько¹, Т. В. Резцов¹, М. М. Сергеев¹, Н. В. Петров^{1,3}

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются аспекты создания поляризационно-чувствительного цифрового голографического микроскопа для количественного анализа анизотропных микрообъектов. Представлена аппаратная реализация на основе двухлучевого интерферометра с разделением поляризационных компонент, обеспечивающая регистрацию цифровых голограмм, необходимых для восстановления матрицы Джонса. Обсуждаются алгоритмические решения: процедуры численной реконструкции комплексных амплитуд, стратегии фильтрации в Фурье-области для подавления фазового шума и аббераций при сохранении пространственного разрешения. Продемонстрирована возможность получения количественных распределений компонент матрицы Джонса в режиме реального времени при освещении образца сфокусированным пучком ближнего инфракрасного диапазона, управляемого с помощью ЖК пространственного модулятора света. Результаты показывают, что оптимальный выбор параметров обработки позволяет достичь высокой чувствительности к малой поляризационной анизотропии.

Ключевые слова: Цифровая голографическая микроскопия, Поляризация, Количественная фазовая визуализация, Лазерная обработка.

9.7 Гиперспектральная цифровая голография в SWIR-диапазоне для анализа биологических объектов

Николай Олегович Прохоренков, М. А. Волынский

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Данная работа посвящена исследованию возможностей гиперспектральной цифровой голографии в SWIR-диапазоне для оценки состояния биологических объектов. На базе интерферометра Маха-Цендера собрана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать голограммы различных биологических образцов в спектральном диапазоне 1260–1360 нм. Проведен амплитудно-фазовый и спектральный анализ зарегистрированных гиперкубов. В работе также обсуждаются перспективы дальнейшего совершенствования метода.

Ключевые слова: гиперспектральная цифровая голография, SWIR, интерферометр Маха-Цендера, биологические образцы, амплитудно-фазовый анализ

9.8 Восстановление изображений в терагерцовой однопиксельной визуализации при освещении пучком с неоднородным профилем интенсивности

Данил Андреевич Черноусов¹, Синько А. С.^{1,2}

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

Исследуется терагерцовая однопиксельная визуализация при пространственно неоднородном освещении с использованием квантово-каскадного лазера. Предложен самокалибруемый подход, в котором поле освещения оценивается непосредственно по однопиксельным измерениям и учитывается при реконструкции изображения. Метод протестирован для вычислительных фантомных изображений и сжатого зондирования с алгоритмами OMP и TVAL3. Численные и экспериментальные результаты показывают, что учет неоднородности освещения существенно повышает качество восстановления, особенно для сильно неоднородных пучков.

Ключевые слова: Однопиксельная визуализация, терагерцовое излучение, сжатое зондирование

Стендовые доклады

С.9.1 Анализ нелинейно-упругих свойств трех полимерных материалов на основе голографического мониторинга солитонов деформации

А. В. Белашов, А. А. Жихорева, Я. М. Бельтюков, Ирина Владимировна Семенова
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В работе проведено исследование нелинейных уединенных волн (солитонов) деформации в волноводах из трех широко используемых полимерных материалов – полистирола, ПММА и поликарбоната. Регистрация волновых картин в волноводах производилась методом внеосевой цифровой голографической интерферометрии. Фурье-анализ полученных данных, сглаживание и совмещение фазовых профилей позволили построить полную форму солитонов, определить их амплитуду и ширину. Было проведено сравнение полученных данных с теоретическими оценками и результатами измерения линейных и нелинейных модулей упругости этих материалов, полученных ультразвуковым методом, основанном на акустоупругом эффекте.

Ключевые слова: Солитоны деформации, голографическая интерферометрия, полимерные материалы.

Секция 10

Современные функциональные оптические материалы

Устные доклады

10.1 Прямая лазерная металлизация как новая технология производства электроники

(Приглашенный)

Логунов Лев Сергеевич, к.х.н., А.В. Вавилов, Е. М. Хайруллина, Д. С. Шестаков, Е. А. Афанасьева, А. В. Пилипчук
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

В работе представлены первые шаги по внедрению технологии прямой лазерной металлизации в прикладные и промышленные задачи. Предложена масштабируемая методология, включающая нанесение глубокого эвтектического растворителя методом doctor blade на подложки размером до 100 × 100 мм и последующую запись медных структур непрерывным диодным лазером с длиной волны 450 нм. Показано, что технология применима для создания проводящих элементов, востребованных в прототипировании печатных плат, межсоединений, RFID-компонентов и гибкой электроники. Отдельно рассмотрено применение технологии для создания катализаторов и сенсоров для задач микрофлюидного синтеза.

Ключевые слова: прямая лазерная металлизация; глубокие эвтектические растворители; медные структуры; печатные платы; многофункциональные микросистемы

10.2 Эффекты самовоздействия и динамической голографии в диффузионно-легированных медью конгруэнтных монокристаллах ниобата лития (Приглашенный)

Станислав Михайлович Шандаров¹, А. А. Колмаков¹, Э. Комов¹, Р. И. Анисимов¹, А. С. Акрестина¹, Н. И. Буримов¹, Н. Н. Половинкин¹, И.В. Салдин¹, М. Мишель¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

Описана технология термической диффузии меди в пластины X- и Z-срезов монокристаллического ниобата лития конгруэнтного состава. Представлены результаты экспериментального исследования распределений концентрации ионов меди по толщине пластин LiNbO₃:Cu и формирования в них динамических фоторефрактивных голограмм с различными пространственными периодами. Изучены особенности эффектов самовоздействия цилиндрических и эллиптических лазерных пучков с длиной волны 532 нм в структурах LiNbO₃:Cu.

Ключевые слова: Термическая диффузия, Ниобат лития, Фоторефрактивные голограммы, Самовоздействие лазерных пучков.

10.3 Разработка доступной системы наноимпринт литографии

Д. Ф. Гиндуллина¹, Д. В. Минив², В. А. Попова¹, В. А. Асеев¹, Н. В. Никоноров¹, И. С. Мухин², А. М. Алексеев¹, Евгений Михайлович Алексеев¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

Наноимпринт литография (НИЛ) широко применяется в промышленности для изготовления дифракционных оптических элементов, используемых в устройствах дополненной реальности. Вместе с тем высокая стоимость литографического оборудования и расходных материалов ограничивает использование данного метода в научных исследованиях. В настоящей работе предложен процесс НИЛ, основанный исключительно на широкодоступных компонентах потребительского класса. Экспериментальная установка была сконструирована на базе стереолитографического (SLA) 3D-принтера, а в качестве резиста была использована прозрачная SLA смола.

Тестирование на структуре углублений DVD диска показало возможность копирования элементов размером до 400 нм. Изготовленная реплика дифракционной решётки продемонстрировала оптические характеристики, практически не уступающие оригинальному образцу, что подтверждает эффективность разработанного подхода для экономичного производства наноструктур.

Ключевые слова: наноимпринт литография, нанофабрикация, дифракционный оптический элемент, дифракционная решётка, дополненная реальность

10.4 Поляризационно-фазовые преобразования излучения с помощью топологических структур в хиральных нематических жидких кристаллах

Тихон Вадимович Резцов¹, А. В. Черных¹, Н. В. Петров^{1,2}, Т. Орлова³

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Школа физики, Харбинский политехнический университет, Харбин, Китай

³ Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

В работе рассматривается поляризационно-фазовое преобразование световых полей, проходящих через топологические структуры в хиральных нематических жидких кристаллах. С помощью поляризационного голографического микроскопа восстанавливаются элементы матрицы Джонса, описывающие локальный оптический отклик исследуемых структур. Показано, что тороны и родственные конфигурации могут проявлять свойства пространственно-неоднородных фазово-поляризационных элементов, перспективных для формирования структурированных световых полей, включая вихревые пучки.

Ключевые слова: Жидкие кристаллы, Хиральные нематики, Топологические структуры, Тороны, Поляризационная голография, Цифровая голография, Матрица Джонса, Фазовая модуляция

10.5 Упрочнение оптических стеклянных элементов фотоники методом низкотемпературного ионного обмена (Приглашенный)

Николай Валентинович Никоноров, В. А. Попова, А. М. Алексеев, Е. М. Алексеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены вопросы повышения механической, термической и оптической прочности оптических стеклянных элементов фотоники методом ионного обмена. Показано, что обмен ионов натрия из стекла на ионы калия, рубидия или цезия из расплава солей позволяет создавать в поверхностном слое оптических элементов сжимающие механические напряжения, достигающие единиц ГПа, которые приводят к повышению микротвердости, стойкости к термоудару и оптической прочности. Показано, что метод ионного обмена позволяет упрочнять оптические элементы, изготовленные из классических стекол оптических промышленных каталогов, а также из активных стекол (лазерных, фото-термо-рефрактивных). Показано, что ионообменная технология позволяет реализовывать монолитную интеграцию волноводных и голографических структур на единой подложке для задач AR-систем и интегральной фотоники.

Ключевые слова: Стеклянные оптические элементы, Голографические элементы на стекле, Ионный обмен, Диффузионные напряжения, Механическая прочность стекла, Термическая прочность стекла, Оптическая прочность стекла

10.6 Особенности рассеяния голографических диффузоров в фото-термо-рефрактивном стекле

Гавриш Михаил Владимирович^{1,2}, Розанов П.К.^{1,2}, Прохорова У.В.¹, Никоноров Н.В.², Борейшо А.С.¹,
Погода А.П.¹

1 Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

2 НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследованы особенности рассеяния лазерного излучения голографическими диффузорами, записанными в фото-термо-рефрактивном стекле. Рассмотрены методы формирования диффузоров методом голографической записи и влияние параметров интерференционной структуры на угловые характеристики рассеяния. Проведён анализ распределения интенсивности рассеянного излучения в зависимости от длины волны и геометрии записанной структуры. Экспериментально показана возможность формирования устойчивых голографических диффузоров с заданными параметрами рассеяния для применения в лазерных системах, задачах гомогенизации излучения и оптической обработки пучков.

Ключевые слова: голографический диффузор; фото-термо-рефрактивное стекло; голографическая запись; объёмные голограммы; лазерные системы; дифракционные структуры.

10.7 Влияние постоянного магнитного поля на оптические переходы в кристаллах GaP

Анна Аркадьевна Скворцова

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Данная работа продолжает исследования магнитостимулированных процессов в легированных образцах фосфида галлия. Изначально нами было обнаружено влияние предварительной экспозиции легированных кристаллов фосфида галлия GaP(Zn,O:N) в постоянном магнитном поле на спектры фотолюминесценции образцов. Цель данной работы – исследование влияния постоянных магнитных полей на коэффициент пропускания рассматриваемых кристаллов, а также на процессы послесвечения на различных длинах волн (565 нм и 700 нм). В результате исследований установлено, что коэффициент пропускания монокристаллов GaP(Zn,O:N) после предварительной экспозиции на воздухе (в течение 30 минут при комнатной температуре) в постоянном магнитном поле ($B < 0,8$ Тл) увеличивался более чем в 2 раза. Экспериментально определены также характерные времена затухания фотолюминесценции образцов ($\tau \sim 0,1-100$ мс).

Ключевые слова: Фосфид галлия, Фотолюминесценция, Магнитное поле, Коэффициент пропускания, Послесвечение, Время затухания.

10.8 Стоксовая и антистоксовая люминесцентная термометрия для задач микроэлектроники

М. А. Курочкин, Илья Евгеньевич Колесников

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Монофазные нанокристаллические частицы $Gd_2O_3:Er^{3+}, Yb^{3+}$, синтезированные с помощью метода вспенивания, показали интенсивную люминесценцию как в стоксовом, так и в антистоксовом режимах. В спектрах люминесценции присутствовали переходы с температурно-связанных возбужденных уровней $^2H_{11/2}$ и $^4S_{3/2}$. Данный факт позволил реализовать ратиометрическую термометрию в температурном диапазоне 298–383 К с использованием стоксовой и антистоксовой люминесценции. Люминесцентная термометрия позволила достичь относительной тепловой чувствительности около $1.3\% K^{-1}$ и субградусной точности детектирования температуры. Практическая применимость метода люминесцентной термометрии продемонстрирована при *in situ* измерении температуры графического процессора при различных нагрузках.

Ключевые слова: Er^{3+} , Люминесцентная термометрия, Ратиометрическая стратегия, Первичная термометрия, Микроэлектроника.

10.9 Разработка комплексной методики тестирования качества цветных изобразительных голограмм и материалов для их получения (Приглашенный)

*Андреева Ольга Владимировна¹, С.С. Семенов², С. А. Сизова¹, А. А. Барышников²,
Н. В. Андреева¹, В. В. Чащин², И. К. Волков², В. И. Юрченкова³, К. А. Орехов⁴*

¹ Университет ИТМО, СПб

² Лаборатория Волнографии, Томск

³ НИ ТГУ. Томск

⁴ ООО "Гео Сервис", Томск

Приведены результаты совместных исследований коллектива специалистов, посвященных рассмотрению вопросов оценки качества цветных изобразительных голограмм, полученных по методу Ю.Н.Денисюка на тонкослойных галогенидосеребряных фотоматериалах. Обсуждаются теоретические и экспериментальные подходы, используемые для выявления закономерностей связи параметров фотоматериала и процессов его обработки с качеством голографического изображения.

10.10 Генерация синглетного кислорода тиоксантеновыми красителями при возбуждении разрешённых и запрещённых переходов

Владимир Владимирович Шелковников^{1,2}, Е.В. Васильев¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Проведено экспериментальное исследование эффективности генерации синглетного кислорода тиоксантеновыми красителями, содержащими тяжёлый атом при фотовозбуждении разрешённых S_0-S_1 и запрещённых S_0-T_1 переходов. Спектроскопическим методом измерена кинетика расхождения ловушки синглетного кислорода 1,3-дифенилизобензофурана при возбуждении фотогенераторов синглетного кислорода и определён его квантовый выход. Показана высокая эффективность некоторых тиопроизводных красителей ксантенового ряда в качестве генератора синглетного кислорода, как в полосе основного поглощения, так и в плече синглет-триплетного поглощения. Результаты демонстрируют значительное влияние гетероциклического атома серы на фотоактивность триплетного уровня при воздействии на краситель излучением ближнего ИК диапазона. Рассмотрена связь между современными вариантами генерации синглетного кислорода и записью голограмм в материалах типа «Реоксан».

Ключевые слова: Тиоксантеновые красители сенсбилизаторы, генерация синглетного кислорода, реакции окисления при записи голограмм

10.11 Азобензолсодержащие жидкокристаллические полимеры как основа для создания голографических дифракционных решеток различных типов

Мирон Александрович Бугаков¹, Н. И. Бойко¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, Москва, Россия

Изучены процессы голографической записи дифракционных решеток (поляризационных и поверхностно-рельефных) в пленках азобензолсодержащих жидкокристаллических (ЖК) полимеров различного строения. Установлено, что при голографической записи в пленках данных полимеров одновременно формируются как поляризационные, так и поверхностно-рельефные решетки вследствие процессов фотоиндуцированного массопереноса. Показано, что уменьшение длины алифатического спейсера, соединяющего основную полимерную цепь и фотохромный фрагмент, и увеличение полярности заместителя в фотохромном фрагменте повышают дифракционную эффективность (ДЭ) записанных решеток. Получены кинетические зависимости описывающие запись каждого типа решеток и проанализировано влияние строения полимеров на эти зависимости. Продемонстрировано, что термический отжиг пленок полимеров с записанными решетками повышает ДЭ последних до значений близких к теоретическим вследствие образования ЖК фазы.

Ключевые слова: Голография, Дифракционные оптические элементы, Жидкие кристаллы, Азобензолсодержащие полимеры.

10.12 Фотоэмульсия Славич для научных исследований

Юлия Анатольевна Березкина

ООО «Славич Нойа Технологии», Переславль-Залесский, Россия

ООО «Торговый Дом «Славич»», Переславль-Залесский, Россия

В данном докладе представлена история российского предприятия «Славич» начиная со строительства фабрики, строительством новых корпусов с размещением крупных производств фотобумаги и фотопластин, заканчивая работой в сегодняшние дни. Изложено описание подразделения «МИКРОН», производство которого не имеет аналогов в отечественной фотохимии и является специфическим наукоемким предприятием. Подразделение специализируется на выпуске фотопластинок и фотопленок для науки, спектрального анализа черных и цветных металлов, космических исследований, астрономии, масок цветных телевизоров, а также фотопластин для изобразительной голографии.

На сегодняшний момент подразделение Микрон, кроме производства фотопластин и фотопленок для голографии: ВРП-М, ПФГ-01, ПФГ-03М, ПФГ-03Ц и ПФГ-04, освоило выпуск нового вида эмульсии – ядерной фотографической эмульсии (ЯФЭ). Представлено описание и виды продукции на основе ЯФЭ. Описаны основные технологические стадии изготовления продукции на основе ЯФЭ и оборудование для изготовления ЯФЭ. Дано описание продукта, как детектора для мюонной радиографии. Описан метод мюонной радиографии. Представлены примеры практического применения ЯФЭ как детектора. Описаны работы, которые провели с применением нашей ЯФЭ. Представлены работы, которые планируется провести в ближайшее время.

Ключевые слова: Ядерная фотографическая эмульсия, продукция для научных исследований, детектор, мюонная радиография, производство, поливные столы, сепаратор, основные стадии, сотрудничество.

Стендовые доклады

С.10.1 Влияние фото-термо-индуцированной кристаллизации на процесс ионообменной диффузии в ФТР стекле

В. А. Попова¹, Николай Валентинович Никоноров¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фото-термо-индуцированная кристаллизация влияет на процесс ионообменной диффузии в ФТР стекле. Низкотемпературный ионный обмен $Na \rightarrow Ag$ дает большой прирост показателя преломления в области без кристаллической фазы. Показано, что данный эффект увеличивает дифракционную эффективность брэгговских решеток, записанных в ФТР стекле, от 20% до 70%. Эффект обратим при проведении обратного ионного обмена $Ag \rightarrow Na$. Также ионный обмен $Na \rightarrow Ag$ приводит к появлению поглощения в видимой области спектра брэгговских решеток. Объединение двух технологий, фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена, позволяет создать ионообменный планарный волновод с голографическими оптическими элементами ввода и вывода излучения.

Ключевые слова: Фото-термо-рефрактивное стекло, Фото-термо-индуцированная кристаллизация, Низкотемпературный ионный обмен, Брэгговская решетка

С.10.2 Диселенид палладия как универсальная платформа для интегральной фотоники: каналирование, модуляция и детектирование света

Александр Вячеславович Сюй¹, А. В. Арсенин¹, В. С. Волков¹

¹ ООО «КСПАНСЕО», Москва, Россия

Развитие современных оптоэлектронных устройств сдерживается необходимостью гетерогенной интеграции материалов с взаимно исключающими свойствами: металлов (для межсоединений), диэлектриков (для волноводов) и полупроводников (для излучения и детектирования). Существующие подходы к объединению этих компонентов усложняют технологические процессы и увеличивают стоимость производства. Поиск и характеристика единого материала, способного реализовать множественный оптоэлектронный отклик, устраняющего необходимость в сложной интеграции разнородных структур. В ходе исследования показано, что диселенид палладия ($PdSe_2$) обладает уникальной зонной структурой, сочетающей полуметаллические характеристики с большой шириной запрещенной зоны для межзонных переходов. Эта двойственность позволяет материалу одновременно функционировать как фотодетектор и

оптический волновод, интегрируя традиционно несовместимые отклики в одной платформе. Полученные данные дают полную картину оптоэлектронных свойств PdSe₂. Выявленная многофункциональность открывает путь к созданию компактных устройств нового поколения, способных работать в различных режимах без необходимости сложной материальной интеграции.

Ключевые слова: оптоэлектроника, PdSe₂, зонная структура, интеграция, фотодетектор, волновод.

С.10.3 Сегнетоэлектрические кристаллы PMN-PT и PGO как функциональные материалы управления свойствами оптического луча

Андрей Дмитриевич Ушаков¹, М. А. Чувакова¹, И. А. Купенко¹, А. П. Турыгин¹, J. Li², W. Huang², X. Liu², Y. Zhang², Y. Zhang², Q. Hu², Y. Zhuang², X. Wei², В. Я. Шур¹

¹ Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Сианьский транспортный университет, Сиань, Китай

Сегнетоэлектрические кристаллы PMN-PT и германат свинца (PGO) рассматриваются как материалы для электрооптического управления параметрами оптического луча. Для PMN-PT продемонстрирована возможность создания каскадных оптических фазированных решеток (ОФР) с помощью доменной инженерии. Получена эффективность управления лучом 0,32°/В/мкм, а также реализована высокоскоростная модуляция интенсивности ($\tau \approx 15$ мкс) за счет обратимого фазового перехода R → O при комнатной температуре. Для кристаллов PGO впервые предлагается подход, сочетающий два физических механизма: формирование доменных структур с помощью фемтосекундного лазерного облучения и использование естественной оптической активности. Обсуждаются управляющие напряжения, времена отклика и перспективы создания на основе этих материалов компактных электрооптических устройств.

Ключевые слова: оптика, электрооптический эффект, управление лучом, PMN-PT, PGO, доменная инженерия, оптическая активность.

С.10.4 Формирование доменной структуры в оптических волноводах, созданных методом мягкого протонного обмена в монокристаллах ниобата лития

Евгений Дмитриевич Савельев¹, У. Муштак¹, А. П. Турыгин¹, А. Р. Ахматханов¹, А. Р. Корнилицын², А. В. Сосунов², И. В. Петухов², Э. Тронц³, Ф. Дотр³, Т. Лунги³, П. Балди³, В. Я. Шур¹

¹ Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Пермский государственный университет, Пермь, Россия

³ Университет Лазурного Берега, Ницца, Франция

Оптические волноводы с регулярной структурой сегнетоэлектрических доменов, созданной методами доменной инженерии, рассматриваются как наиболее перспективные элементы интегральной оптики для преобразования частоты лазерного излучения и генерации спутанных фотонных пар. В работе изготовлены планарные волноводы методом мягкого протонного обмена в конгруэнтном ниобате лития. Измерены профиль приращения показателя преломления, глубина волноводного слоя и фазовый состав слоёв. Изучен эффект аномального формирования и анизотропного роста полосовых доменов в поверхностном слое. Полученные результаты представляют интерес для развития методов создания элементов интегральной оптики на основе нелинейно-оптических фотонных кристаллов.

Ключевые слова: Оптика, Градиентные волноводы, Мягкий протонный обмен, Доменная инженерия.

Секция 11

Биофотоника

Устные доклады

11.1 Квантовая динамика резонансного ИК-возбуждения моды амид-I макромолекул бактерий интенсивным фемтосекундным лазерным импульсом (Приглашенный)

Сергей Иванович Кудряшов, д. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной нанофизики и биомедицины, С.Н. Шельгина,^{1} В.О. Компанец,² С.В. Чекалин,² И.М. Ефремов,³ А.В. Столяров,³ Э.Р. Толордава¹*

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

² Институт спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

³ Химический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

Резонансное возбуждение фемтосекундным инфракрасным (ИК) лазерным импульсом моды амид-I, связанной с C=O-группой белков и нуклеиновых кислот бактерий *P. aeruginosa*, вызывает сильную спектральную модуляцию поглощения. Для полос при ~ 1655 см⁻¹, 1850 см⁻¹ и < 1600 см⁻¹ наблюдается квазипериодическая однополярная зависимость коэффициента поглощения от напряжённости поля, соответствующая эффекту Раби. По периоду модуляции впервые оценён матричный элемент дипольного момента перехода 0–1. Показан когерентный перенос населённости на верхние колебательные уровни, связанный с одноимпульсной инактивацией бактерий вследствие резонансного ИК-нагрева и денатурации макромолекул.

Ключевые слова: ИК фемтосекундные лазерные импульсы, бактерии, эффект Раби, амид-I.

11.2 Биофотонные кристаллы в листьях высших растений: от упорядоченности наноструктур к управлению светом (Приглашенный)

Евгений Романович Буханов

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярск, Россия

Представлены результаты исследования эпикутикулярных восков и хлоропластов высших растений с использованием сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, оптической и конфокальной микроскопии, а также спектрофлуориметрии. Выявлена связь между наноразмерной упорядоченностью структурных элементов и их оптическими свойствами. Эпикутикулярный воск голубой ели обеспечивает структурную окраску в синей области спектра и усиленную флуоресценцию. Форма спектров флуоресценции хвои изменяется при удалении воска с иголок голубой ели. Подобные изменения наблюдаются при агрохимических обработках листьев растений сельскохозяйственных культур наряду с перестройкой гран. Результаты открывают перспективы для создания биомиметических оптических материалов и неинвазивной диагностики состояния растений.

Ключевые слова: биофотонный кристалл, эпикутикулярный воск, хлоропласт, структурная окраска, флуоресценция, упорядоченность наноструктур, электронная микроскопия.

11.3 Определение кинетики оптических и радиочастотных свойств биологических тканей для контроля процессов термической деградации

Владимир Станиславович Анпилов^{1,3}, Н. В. Коваленко^{1,3}, Р. И. Шайдуллин^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт, Московская область, Россия

² Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Московская область, Россия

³ ООО «ВПГ Лазеруан», Московская область, Россия

Термодинамическая температура является одним из важнейших параметров состояния биологических тканей, поэтому в современных методах термической терапии точный контроль температуры и степени термической деградации является ключевым условием обеспечения безопасности и эффективности процедур. Для контроля процессов деградации в данной работе было проведено исследование кинетики оптических и радиочастотных свойств печени курицы, полученных при условии одновременной записи, при разогреве радиочастотным полем до температуры 100 градусов.

Ключевые слова: Деградация, Оптические свойства, Радиочастотное поле.

11.4 Возможности анализа гистологических образцов методами цифровой голографической микроскопии и томографии (Приглашенный)

Ирина Владимировна Семенова, А. В. Белашов, А.А. Жихорева

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

В докладе представлен подход к исследованию гистологических образцов на основе статистического анализа фазовых изображений, полученных с помощью цифровой голографической микроскопии. Предложенный подход позволяет получать количественную информацию об оптических параметрах и характерных размерах структурных элементов ткани гистологического образца и оценивать их изменение в результате внешнего терапевтического воздействия. Метод апробирован на гистологических образцах мышечной ткани и опухоли Эрлиха лабораторных животных, подвергшихся воздействию HIFU.

Ключевые слова: Гистологические образцы, HIFU, опухоль Эрлиха, голографическая микроскопия, томография.

11.5 Волоконно-оптическая маломодовая игла для измерения показателя преломления внешней среды

Александр Александрович Маркварт, Л. Д. Завалишина, В.Д. Филонов, О.Г. Бобылева, А.Л. Граждан, А.В. Петров Л. Б. Лиокумович, Н. А. Ушаков

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

Предложен миниатюрный датчик показателя преломления внешней среды на основе межмодового волоконного интерферометра с тэйпированным маломодовым волокном. Размеры чувствительной области составляют менее миллиметра в продольном сечении и менее 125 микрометров в поперечном сечении. Работоспособность датчика верифицирована экспериментально путем измерения его интерференционного отклика в водных растворах глицерина в диапазоне концентраций от 0 до 100%.

Такой интерферометр может иметь на порядок меньшую длину чувствительного к внешней среде участка, позволяющую наблюдать интерференционную картину в спектральной области, по сравнению с интерферометрами с тэйпированным одномодовым волокном

Ключевые слова: датчик показателя преломления, маломодовое волокно, тэйпер, конус, интерферометр.

11.6 Оптические сенсоры для анализа жидких сред на основе комбинации фотонных интегральных схем и микрофлюидных устройств (Приглашенный)

*Алексей Юрьевич Кузин^{1,2,3}; В.С. Чернышёв^{4,5}; И.Н. Флоря¹, С.Н. Васильев^{1,4}; П.П. Ан^{1,6};
А. Д. Голиков^{1,2}; А.С. Бреусова², Д.Д. Аржанова¹, А.Н. Семёнов¹, В.В. Ковалюк^{1,3}, Г.Н. Гольцман^{3,6};
Д.А. Горин⁴*

¹Университет науки и технологий МИСИС, Москва

²Московский педагогический государственный университет, Москва

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

⁴Сколковский институт науки и технологий, Москва

⁵Национальный медицинский исследовательский центр акушерства, гинекологии и перинатологии имени академика В. И. Кулакова, Москва

⁶Российский квантовый центр, Москва

В настоящее время существенно выросла потребность в высокочувствительных оптических сенсорах для анализа жидких сред, которые необходимы для определения химического состава и концентрации компонентов растворов, прецизионного контроля модификации поверхности молекулами, обеспечивающими необходимую специфичность, а также для определения концентрации маркеров патологического состояния в биологических жидкостях с целью оценки эффективности лечения и задач биомедицинской диагностики. В данной работе представлена разработка высокочувствительных оптических сенсоров на основе фотонных интегральных схем в комбинации с микрофлюидными каналами для анализа жидких сред. Платформа позволяет детектировать компоненты в широком диапазоне концентраций (от десятков ppm), обеспечивает контроль модификации поверхности и извлечение комплексного показателя преломления. Продемонстрировано специфичное детектирование экзосом с белком HER2. Практическая значимость – ранняя диагностика и оценка эффективности лечения онкологических заболеваний.

Стендовые доклады

С.11.1 Исследование липидных рафтов в градиенте OptiPrep с помощью фотонных интегральных схем, рефрактометрии и время-разрешенной флуоресценции

*Ирина Николаевна Флоря¹, И. А. Андриевская², Е. М. Устинов², А.Н. Семенов¹, А. Ю. Кузин^{1,3,5},
А. Д. Голиков⁴, В. В. Ковалюк^{1,5}, Г. Н. Гольцман^{5,6}*

¹ Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания», Благовещенск, Россия

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁴ Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁶ Российский квантовый центр, Москва, Россия

Сенсоры на основе фотонных интегральных схем с микрофлюидными каналами позволяют без меток, в реальном времени и с высокой чувствительностью определять комплексный показатель преломления малых объемов аналита. В работе проведено измерение показателя преломления, включая стандартную рефрактометрию, и времени жизни флуоресценции для серии фракций, полученных детергент-флотацией в градиенте OptiPrep. Исследованы как фракции, содержащие липидные рафты, так и контрольные фракции градиента без добавления липидного материала. Обнаружены различия, коррелирующие с изменением состава и микроокружения липидных доменов. Предлагаемый подход перспективен для оценки концентраций липидных рафтов, изучения их физико-химических свойств, а так же роли в функционировании иммунных клеток при инфекционно-воспалительных заболеваниях.

Ключевые слова: Фотонные интегральные схемы, Микрофлюидные каналы, Комплексный показатель преломления, Липидные рафты, Время жизни флуоресценции.

С.11.2 Оптотермическое манипулирование в различных средах

Александра Михайловна Майорова¹, В. К. Урюпина^{1,2}, Н.Н. Лосевский¹, Н. А. Горбунов³, С. П. Котова¹

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

³Медицинский университет «Реавиз», Самара, Россия

Приводятся результаты оптотермического манипулирования микросферами на основе полистирола в различных средах, включая альбумин и буферные растворы. Исследуется влияние характеристик используемых растворов (коэффициента вязкости, показателя преломления) и параметров лазерного излучения на скорости перемещения микросфер в ловушку, возможность их точного позиционирования, а также их выстраивание в различные структуры. Показана возможность управления параметрами растворов и, следовательно, эффективностью лазерного манипулирования, за счет добавления ПАВ в растворы.

Ключевые слова: оптотермическое манипулирование, полимерные микросферы, вязкость раствора, буферные растворы

Секция 12

Опτικο-цифровые информационные системы и оптические коммуникации

Устные доклады

12.1 Вклад нелинейных эффектов третьего порядка на оптические характеристики амплитудно-фазово модулированного сигнала при распространении по многопролетной волоконно - оптической линии связи

Владимир Станиславович Анпилов^{1,3}, Я. А. Техадов³, Р. И. Шайдуллин^{1,2}

¹ Московский физико-технический институт, Московская область, Россия

² Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Московская область, Россия

³ ООО «ВПГ Лазеруан», Московская область, Россия

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения пропускной способности многопролетных линий связи с передачей амплитудно-фазово модулированного сигнала с высокой информационной плотностью, что приводит к необходимости создания математических моделей, позволяющих рассчитывать оптические характеристики сигнала для многоканальных линий связи с высокой пропускной способностью. В данной работе представлены исследования для выявления вклада отдельных нелинейных эффектов третьего порядка на основе эффекта Керра на оптические характеристики сигнала для волоконно – оптической линии связи протяженностью 5000 км.

Ключевые слова: Нелинейные эффекты, Эффект Керра, Линия связи.

12.2 Исследование перестройки оптоэлектронного-генератора на основе оптической линии задержки

Захар Денисович Евсюхин^{1,2}, М.В.Казьмин¹, В. А. Небавский¹, Р.С. Стариков¹

¹ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

² ООО «Т8», Москва, Россия

Экспериментально исследовано влияние ширины линии лазера на фазовый шум и перестройку частоты двухконтурного оптоэлектронного генератора (ОЭГ) с перестраиваемой оптической линией задержки. Сравнивались узкополосный волоконный лазер «Инверсия» (< 2 Гц) и полупроводниковый TWT Optilab (10 кГц). Спектры фазовых шумов на 4 ГГц оказались практически идентичны, что указывает на доминирование шумов электронных компонентов. Измерен параметр S_{21} разомкнутой схемы, определена его амплитудно-частотная характеристика. Исследован характер частот генерации: их распределение относительно пиков и провалов передаточной функции, а также зависимость от величины оптической задержки. Перестройка частоты изучена с шагом 1 пс для резонаторов 10 м и 1 км. Диапазон перестройки ограничен СВЧ-фильтром (3.5–4.5 ГГц).

Ключевые слова: Оптоэлектронный генератор, Радиофотоника, СВЧ, перестройка частоты, Фотоника, Фазовые шумы.

12.3 Оптическая обратная связь в поляритонном микрорезонаторе для реализации RS-триггера

Иван Иванович Красионов¹, Д. А. Санников¹, П. Лагудакис¹

¹ Лаборатория гибридной фотоники, Сколковский институт науки и технологий, территория Инновационного центра «Сколково»

В работе исследуется оптическая обратная связь в органическом поляритонном микрорезонаторе как механизм управления состоянием конденсата при комнатной температуре. Методика основана на импульсном возбуждении экситон-поляритонов и возврате части выходного излучения в микрорезонатор после отражения от внешнего зеркала. Показано, что такая конфигурация приводит к усилению регистрируемого сигнала, что указывает на эффективное

поддержание поляритонного состояния за счет оптической реинжекции. Полученный результат может быть использован для создания полностью оптического RS-триггера и элементов поляритонной памяти.

Ключевые слова: экситон-поляритоны, оптическая обратная связь, RS-триггер, полностью оптическая память

12.4 Анализ переноса частоты в радиофотонном тракте и его эффективность при передаче сигналов.

Иван Сергеевич Почтарев¹, В. А. Небавский¹, Р. С. Стариков¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

В работе представлены результаты экспериментов по измерению характеристик радиофотонных трактов предназначенных для переноса частоты. Измерены ключевые метрики оценки качества переноса СВЧ сигнала.

Ключевые слова: перенос частоты, модулятор Маха-Цендера, микроволновая фотоника.

12.5 Численное моделирование электрооптических схем генерации comb-сигналов в системах микроволновой фотоники

Тимофей Дмитриевич Ненашев¹, Е. Ю. Злоказов¹, Р. С. Стариков¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

Приведены результаты генерации comb-сигнала с помощью различных электрооптических схем, а также исследовано влияние различных элементов радиофотонного тракта на фазовые шумы полученных сигналов и проведена оценка джиттера полученной последовательности импульсов.

Ключевые слова: comb-сигналы, модулятор Маха-Цендера, фотонный аналого-цифровой преобразователь.

12.6 Дизайн когерентной оптической системы для матричного умножения

Георгий Александрович Мотз^{1,2}, Л. Л. Досколович^{1,2}, Д. В. Сошников^{1,2}

¹ *Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия*

² *Самарский национальный исследовательский университет имени академика*

С.П. Королёва, Самара, Россия

Предложен дизайн оптической системы, предназначенной для оптического выполнения операции умножения матриц. Система работает с когерентным излучением, распространяющимся в свободном пространстве, и включает ряд дифракционных оптических элементов (ДОЭ). За счёт объединения нескольких оптических функций в одном ДОЭ удалось достичь более простой конфигурации оптической системы по сравнению с аналогами, основанными на использовании «обычных» (не дифракционных) оптических элементов. Для моделирования работы оптической системы в рамках скалярной теории дифракции разработана компьютерная программа (симулятор оптического умножения), основанная на эффективном методе вычисления дифракционных интегралов Френеля-Кирхгофа. С использованием разработанного симулятора исследованы рабочие характеристики предложенной системы. Проведенное численное исследование включает анализ влияния технологических погрешностей изготовления ДОЭ на рабочие характеристики системы. На основе данного анализа предложен метод, позволяющий минимизировать влияние технологических ошибок изготовления ДОЭ на качество выполнения операции оптического умножения.

Ключевые слова: Оптические вычисления, Оптическое матричное умножение, Скалярная теория дифракции, Дифракционный оптический элемент.

Стендовые доклады

С.12.1 Оценка фоновой засветки в задачах наведения на наземный лазерный маяк с низких околоземных орбит

Сергей Дмитриевич Левашов^{1,3}, В. Е. Мерзлинкин^{1,2}, Р. М. Бахшалиев^{1,3}, К. А. Барбышев^{1,2}

¹ КуСпэйс Технологии, Москва, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия

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

В лазерной связи космос-земля требуется точное наведение на приемную станцию на земле, для чего используются лазеры маяки. Маяк должен иметь такую мощность и расходимость, чтобы на низкой околоземной орбите формировать пятно, покрывающее находящийся там спутник с учетом погрешности вычисления его положения и одновременно достоверно регистрироваться небольшой камерой на борту на фоне остального излучения. В работе рассматривается использование матриц камер бортовых систем наведения на маяк для вычисления реальной фоновой засветки в местах, где предполагается установка базовой станции. Фоновая засветка во многом зависит от окружающих условий, ландшафта, времени года и дня, что определяет время, в которое можно использовать наземную станцию.

Ключевые слова: Лазерная связь, лазер маяк, спутник, космос, низкая околоземная орбита

С.12.2 Оценка влияния точности наведения на величину битовой ошибки в оптическом канале "Спутник-Земля"

Руслан Бахшалиев

НИУ "ВШЭ", Москва

Секция 13 Новые прикладные оптические технологии

Устные доклады

13.1 Новые стекл-технологии для биомедицины и авиационной техники (Приглашенный)

Александр Петрович Владимиров^{1,2,3}

¹ Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук им. Э. С. Горкунова, Екатеринбург, Россия

² Федеральный научно - исследовательский институт ВИРОМ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Екатеринбург, Россия

³ Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Целью доклада является обзор исследований, посвященных использованию нового механо-оптического эффекта для определения локальных деформаций в газовых, жидких и твердых средах. Таковыми средами являлись турбулентные потоки, живые клетки и периодически деформируемые конструкционные материалы. Разработаны методики, впервые позволяющие в режиме реального времени количественно определять: 1) параметры турбулентного потока, 2) активность участков клетки в норме и при внешних воздействиях, 3) усталостные многоцикловые повреждения конструкционных материалов. На основе полученных новых результатов обсуждаются новые методы диагностики и контроля для биомедицины и авиационной техники.

Ключевые слова: Стеклы, турбулентность, биомедицина, многоцикловая усталость, диагностика и контроль.

13.2 Проектирование оптического элемента для стекл-томографии внутриклеточной активности

Виктор Николаевич Милов, А. П. Владимиров

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² ФБУН ФНИИВИ «Виром», Екатеринбург, Россия

Представлены результаты проектирования многопризменного оптического элемента для будущего стекл-томографа функций живой клетки. По данным численного поиска углов микропризм, выполненного с погрешностью фокусировки менее 10^{-2} мкм, в среде «Компас 3D» построена твердотельная модель диска с концентрическими призматическими зонами и выпущен комплект чертежей. Приведён фрагмент чертежа, иллюстрирующий точное воспроизведение расчётной геометрии. Элемент предназначен для одновременной многокурсовой регистрации стекл-изображений и открывает возможности четырёхмерного анализа внутриклеточных процессов.

Ключевые слова: стекл-томография, живые клетки, оптический элемент, Компас 3D, микропризмы, проектирование, фармакологический скрининг.

13.3 Разработка макета оптико-электронного прибора функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (Приглашенный)

Валерий Викторович Коротаев, д. т. н., профессор, В. А. Рыжова, Р. Д. Хлынов
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

13.4 Разработка алгоритма поиска и локализации дефектов оптических элементов жесткого медицинского эндоскопа

Анна Бобановна Мудриц¹, К. В. Ежова¹, Н. В. Ценеков², Д. А. Ценеков^{1,2}

¹ Научно-исследовательский Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «Юни-тек», Санкт-Петербург, Россия

Целью данного исследования является разработка алгоритма для обнаружения и определения расположения физических дефектов оптических элементов жестких медицинских эндоскопов. Технический контроль состояния элементов оптической системы эндоскопов производится с помощью разработанного оптико-электронного комплекса, состоящего из лабораторной установки и специального программного обеспечения для обработки изображения с эндоскопа. Разработанный алгоритм позволяет находить расстояние до обнаруженного дефекта вдоль оптической оси эндоскопа и в поперечном сечении на изображении. Таким образом, данный подход позволяет точно определить положение и характер повреждения элементов и оценить возможность их замены.

Ключевые слова: Медицинские эндоскопы, оптические элементы эндоскопов, технический контроль, эндоскопическая визуализация, дефекты оптических элементов

13.5 Анализ и контроль характеристик при юстировке и сборке объективов

Виктория Михайловна Соловьева, С.В. Маврин

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»,
Казань, Россия

Рассмотрена и реализована методика достижения оптимального качества сборки и юстировки высокоточных оптических систем, включающих в себя элементы с асферическими поверхностями. Целью методики является подбор асферических элементов на основе результатов измерения отклонений этих поверхностей и последующего математического моделирования объективов во всех возможных вариантах сборки. А так же результаты моделирования используется в качестве шаблона для юстировки объективов.

Ключевые слова: Синтезированные голограммы, Интерференционные картины, Функция рассеяния точки, Асферическая поверхность.

13.6 Самосогласованный термодинамический подход к спектральной оптимизации селективных излучателей для ТФЭ систем

Простодушев Андрей Олегович

АО "НИИ НПО "ЛУЧ"

Представленная модель расширяет традиционное описание ТФЭ систем путём самосогласованного учёта теплового баланса эмиттера при ограниченной подводимой мощности. Полученные результаты показывают, что оптимальные параметры эмиттера для систем с $P_{in} = const$ могут существенно отличаться от предсказаний изотерических моделей, а фотонная рециркуляция играет активную роль в формировании рабочей температуры и спектра. Эти выводы представляются достаточно новыми для доклада на конференции.

13.7 Природный запрет на голографическое TV и 3D дополненную реальность снят, настала эпоха конструкторских решений (Приглашенный)

Сергей Александрович Шойдин¹, А. Л. Пазоев¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий 630108, Российская Федерация,
Новосибирск

Огромные массивы информации в голограммах поставили запрет на пути голографического телевидения. При передаче голографического видеоряда по радиоканалу традиционным методом строчной и кадровой развёртки необходима полоса частот, превышающая весь доступный человечеству радиодиапазон. Ещё в 1992 г. академик Ю. Н.

Денисюк писал о необходимости исследований по «воспроизведению процесса движения голографических изображений» и «разработке методов устранения избыточности информации, т. е. к исключению из голографического изображения той информации, которая не используется при зрительном восприятии». В настоящей работе показаны решения поставленной задачи методами синтеза голограммы с помощью технологии структурированного света, что сокращает требуемую полосу передачи сигнала и снимает запрет на передачу голографического видеоряда в радиодиапазоне.

Ключевые слова: голография, передача информации, дополненная реальность, голографическое ТВ.

13.8 Использование метода геометрического отображения лучей для синтеза «линзы-бабочки» для камеры мобильного телефона

Ян Владимирович Терло, А.О. Вознесенская, А.В. Бахолдин

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Расчет и моделирование объективов камер мобильных телефонов представляет собой трудоемкий процесс. В исследовании рассматривается возможность синтеза оптической системы объектива на примере расчета «линзы-бабочки» по методу геометрического отображения луча. Массивы лучей трассируются через систему в прямом и обратном ходе, и для последнего элемента итерационно подбирается форма поверхностей, обеспечивающие коррекцию аберраций высоких порядков посредством поиска нормалей, обеспечивающих совмещение лучей, трассируемых в прямом и обратном ходе.

Ключевые слова: Оптика, Проектирование оптических систем, Геометрическое отображение лучей, Аппроксимация, Аберрации.

13.9 Анализ передаточных характеристик радиодифракционного тракта на основе лазера с прямой модуляцией

Олег Юрьевич Князев^{1,3}, Т. Д. Ненашев^{2,3}, А. Н. Дорожкин³

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³ Т8 НТЦ, Москва, Россия

В работе описаны методы расчета и моделирования параметров радиодифракционного тракта на основе лазера с прямой модуляцией. Представлены аналитические подходы к линейному и гармоническому приближению зависимости выходной оптической мощности от тока накачки лазерного диода, а также результаты численного моделирования. Проведена экспериментальная верификация и представлены результаты сравнения передаточных характеристик тракта: коэффициента усиления, коэффициента шума и динамического диапазона без паразитных составляющих.

Ключевые слова: Радиодифракционный тракт, лазер с прямой модуляцией, коэффициент передачи, коэффициент шума, динамический диапазон без паразитных составляющих.

13.10 Разработка и исследование двухдиапазонной сканирующей оптико-электронной системы поиска и обнаружения браконьерского промысла лесного хозяйства

Григорий Николаевич Маркушин

Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод», Екатеринбург, Россия

Разработана и исследована двухдиапазонная сканирующая оптико-электронная система поиска и обнаружения браконьерского промысла лесного хозяйства, результаты летных испытаний которой по определению эффективности применения метода комплексирования разноматричных и разноразрешающих изображений, показали возможность поиска и обнаружения субъектов браконьерского промысла в лесном массиве на дистанции до 5 км даже при сумерках. Разработана и исследована двухконтурная система стабилизации линии визирования оптических каналов, содержащая угломестный и азимутальный приводы подслеживания, датчики углов азимутального и угломестного приводов подслеживания, гиросtabilизированную платформу, гироскоп платформы и устройство управления стабилизацией

линии визирования, позволяет уменьшить погрешность стабилизации линии визирования оптических каналов до значений, не превышающих 5".

Ключевые слова: Оптико-электронная система, Комплексообразование и представление информации, Системы стабилизации линии визирования.

Стендовые доклады

С.13.1 Оптический сенсор влажности

Юрий Дмитриевич Лантух, С. Н. Летута, Э. К. Алиджанов, Д. А. Раздобреев
Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Предлагается новый оптический сенсорный элемент для бесконтактного (удаленного) измерения влажности воздуха. Сенсорный элемент выполнен в виде полимерной композиции, включающей гиалуроновую кислоту, обладающую высокой сорбционной способностью по отношению к парам воды и органический краситель-люминофор. Сенсор реагирует на изменение влажности окружающего воздуха сигналом люминесценции и не требует электропитания. Оптический датчик измерения уровня влажности воздуха на основе предлагаемого сенсора может быть использован при исследованиях атмосферы, в замкнутых объемах, в производственных и бытовых помещениях.

Ключевые слова: Оптический датчик влажности, сигнал люминесценции, полимерная пленка, бесконтактный сенсор.

С.13.2 Применение стереолитографии для быстрого прототипирования линз свободной формы

Артём Алексеевич Слобожанинов¹, Н. В. Никоноров¹, Е. М. Алексеев¹, А. М. Алексеев¹, В. А. Асеев¹
¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена технология быстрого прототипирования оптических линз свободной формы на примере каустических линз, предназначенных для формирования изображения. Изготовление каустических линз выполнялось методом стереолитографии на коммерческом фотополимерном 3D принтере с применением прозрачных смол. В ходе работы экспериментально исследовано влияние параметров трехмерной печати и постобработки на качество получаемого проекционного изображения. Установлены оптимальные режимы производства, устраняющие эффект ступенчатости и минимизирующие рассеяние света. Предложенный подход обеспечивает оптическое качество деталей и существенно сокращает затраты и сроки проведения этапов НИОКР.

Ключевые слова: аддитивные технологии, линзы свободной формы, каустические линзы, стереолитография, фотополимерная печать

С.13.3 Виртуальная лаборатория Спекл-интерферометрии

Виктор Николаевич Милов, А. П. Владимиров
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Представлена концепция и архитектура разрабатываемой виртуальной лаборатории спекл-интерферометрии — программной платформы, нацеленной на сокращение времени проектирования экспериментальных установок. Платформа объединяет символичные вычисления, численное моделирование, автоматическую генерацию конструкторской документации и связь с САПР в единый управляемый конвейер. Спроектированы компонентная модель и сценарии взаимодействия, визуализированные в нотации UML. Ожидается, что внедрение лаборатории

уменьшит продолжительность цикла «расчёт-чертёж-спецификация» с 3–8 месяцев до нескольких дней при сохранении субмикронной точности, достигнутой в предшествующих работах по динамической спекл-интерферометрии.

Ключевые слова: Спекл-интерферометрия, искусственный интеллект, чат-бот, RAG, автоматизация научных исследований, виртуальная лаборатория, обработка данных.

С.13.4 Моделирование распределенного волоконного датчика температуры на основе Битовой последовательности

Захар Денисович Евсюхин^{1,2}

¹ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

² ООО «Т8», Москва, Россия

Секция 14

Нейросетевые технологии в фотонике

Устные доклады

14.1 Применение каскадной сверточной нейронной сети для реконструкции изображений с голограмм

Семен Алексеевич Кирий¹, А. С. Свистунов¹, Д. А. Рымов¹, А. В. Шифрина¹, П. А. Черёмхин¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе представлен каскадный метод восстановления бинарных и полутоновых изображений с цифровых и компьютерных голограмм трехмерных сцен на основе современных сверточных нейронных сетей, обучаемых последовательно. Для повышения точности реконструкции использованы этапы предварительного восстановления и уточнения структуры объектов. Выполнена численная и визуальная оценка качества результатов, а также сравнение с существующими нейросетевыми подходами.

Ключевые слова: цифровая голография, восстановление изображений, генеративно-состязательные нейросети, каскадные нейросети, глубокое обучение, полутоновые изображения, компьютерная голография, 3D-сцена.

14.2 Оценка aberrаций волнового фронта на основе анализа дифракционных картин с использованием свёрточной нейронной сети

Захар Сергеевич Марков, Е. Ю. Злоказов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Представлен метод оценки aberrаций волнового фронта для когерентных дифракционных систем на основе ПВМС с использованием свёрточной нейронной сети. Входными данными служит набор из трёх дифракционных картин, формируемых при модуляции лазерного пучка фазовыми масками. На основе двухветвевой CNN-архитектуры, обученной на синтетическом датасете из 80 000 элементов, выполняется регрессия 12 параметров: коэффициентов полиномов Цернике и геометрических характеристик пучка. Среднее значение коэффициента детерминации на тестовой выборке составило 0,993. Экспериментальная верификация на оптической установке с жидкокристаллическим пространственно-временным модулятором света подтвердила способность метода идентифицировать дефокус и другие aberrации. Подход обеспечивает высокую скорость и точность без итерационных процедур.

Ключевые слова: волновой фронт, aberrации, полиномы Цернике, свёрточная нейронная сеть, дифракционные картины, фазовая модуляция, голографические системы.

14.3 Распознавание изображений в 4F-системе с использованием фазовых голограмм

*Е. Ю. Злоказов¹, Ю. С. Ленкова¹, Д. В. Павленко¹, Р. С. Стариков¹, П. А. Черёмхин¹,
Федор Антонович Ушаков¹*

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе представлена экспериментальная реализация инвариантного распознавания изображений в 4F-корреляторе с использованием модифицированных МАСЕ-фильтров. Особенностью подхода является манипуляция формой отклика: формирование двумерного сигнала заданной формы, классификация базируется на двумерной мере сходства. Экспериментальная установка создана на базе одномодового лазера SSP-SLM-473 на длину волны 473 нм, амплитудный пространственно-временной модулятор света Holoeye LC 2012 для ввода распознаваемого изображения и фазовый LCOS ПВМС Holoeye GAYA-2 для вывода синтезированных полутоновых голограмм инвариантного фильтра. Сигнал регистрируется камерой Retiga R6. В докладе рассматриваются методика реализации фильтров в частотной плоскости, влияние аппаратных характеристик на качество отклика и перспективы 4f-систем для предварительной генерации признаков в нейросетевых задачах машинного зрения.

Ключевые слова: Распознавание изображений, 4F-система, Пространственно-временные модуляторы света, Машинное зрение, Инвариантные фильтры.

14.4 Нейросетевая классификация растриваемых изображений по сигналам свертки, формируемым оптико-цифровой системой пространственной фильтрации

Е. Ю. Злоказов¹, Ю. С. Ленкова¹, Дарья Владимировна Павленко¹, Е. К. Петрова¹, Р. С. Стариков¹, П. А., Черёмхин¹, Ф. А. Ушаков¹, А. В. Шифрина¹

¹ Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия

В данной работе представлены результаты нейросетевой классификации бинарных растриваемых изображений размерностью 512×512 пикселей по сигналам свертки размерностями 64×64, 32×32, 16×16 пикселей, получаемых в высокоскоростной когерентной оптико-цифровой системе пространственной фильтрации с фильтром в плоскости пространственных частот. Оптическая система выполняет свертку входного растриваемого изображения с функцией, задаваемой ей импульсным откликом, который формируется компьютерно-синтезированной голограммой Фурье. Выходной набор свертки обрабатывается с помощью сверточной нейронной сети для решения задачи бинарной классификации. Реализованная гибридная оптико-цифровая система позволяет достигать точности распознавания растриваемых изображений до 99%.

Ключевые слова: Компьютерно-синтезированная голограмма, Оптические нейронные сети, Пространственная фильтрация, Распознавание изображений, Сверточные нейронные сети.

14.5 Нейросетевые методы коррекции аберраций волнового фронта в оптических схемах с пространственным модулятором света

Анна Алексеевна Кротова¹, Д. Д. Решетников¹, А. А. Фоминова¹, К. С. Тихонов^{1,2,3}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

Пространственные модуляторы света (SLM) широко используются в экспериментах в открытой оптике, однако их использование неизбежно сопряжено с искажениями волнового фронта, вносимыми неидеальностью оптических элементов. Коррекция таких искажений может быть осуществлена путём внесения компенсирующих изменений в фазовую маску, подаваемую на SLM. В настоящей работе рассматривается оптическая схема с SLM, формирующая в плоскости камеры изображение массива точек, и предлагаются методы адаптивной коррекции аберраций, нарушающих равномерность распределения интенсивности. В частности, реализуются и сопоставляются два подхода, основанные на применении нейронных сетей: сверточной и физически-информированной. Кроме того, выделены как их преимущества, так и ограничения, связанные с их проектированием и экспериментальным применением.

Ключевые слова: Квантовые коммуникации, Квантовые генераторы случайных чисел, Юстировка оптических схем, Коррекция волнового фронта, Машинное обучение.

14.6 Разработка программного приложения для выделения структурной информации из полосатых изображений на основе частотного анализа и нейросетевой сегментации

Егор Алексеевич Селезнев, С. Н. Хонина

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

В работе представлена программная система для автоматизированного анализа полосатых изображений, ориентированная на обработку отпечатков пальцев. Методология включает двумерное быстрое преобразование Фурье для получения пространственного спектра, нейросетевую сегментацию кольца средних частот на основе архитектуры

U-Net, а также последующее разделение на ориентационные сектора с вычислением порождающей функции. Полученные результаты демонстрируют высокую точность выделения частотных и угловых характеристик на тестовых данных FVC2002. Разработанное веб-приложение обеспечивает интерактивную визуализацию всех этапов анализа. Значение работы – автоматизация извлечения структурных параметров для биометрических систем.

Ключевые слова: полосатые изображения, преобразование Фурье, нейросетевая сегментация, U-Net, отпечатки пальцев, частотный анализ, порождающая функция, веб-интерфейс.

14.7 Оптимизация CZ операции на эффекте ридберговской блокады с помощью PINN

Кирилл Сергеевич Тихонов^{1,2,3,4}, Х. К. Б. Луна Веронико^{1,4}, Л. В. Герасимов^{4,5}, Н.А.Мороз^{4,5}, Д.В. Куприянов^{4,5} И.Б. Бобров^{2,5}, С.С. Страуне^{2,5}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Российский квантовый центр, Сколково, Москва, Россия

³ Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁴ Центр междисциплинарных фундаментальных исследований ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Центр квантовых технологий, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Нейтральные атомы в оптических микроловушках являются одной из наиболее перспективных платформ для масштабируемого универсального квантового компьютера. Однако для полной реализации их потенциала необходима разработка надежных двухкубитных запутывающих вентилях, функционирующих на основе механизма ридберговской блокады. Точность таких вентилях ограничена главным образом спонтанным рассеянием на промежуточных электронных состояниях и конечным временем жизни ридберговских состояний. Эти факторы делают актуальной разработку активных методов подавления ошибок, которые работают в условиях реальных экспериментальных ограничений. Для решения этой задачи мы предлагаем физически информированную нейронную сеть (PINN), способную подбирать гладкие управляющие импульсы, активно подавляющие указанные источники шума.

Ключевые слова: физически информированная нейронная сеть, квантовые вычисления, методы машинного обучения, PINN, ридберговские состояния, квантовые вентилях, квантовое запутывание.

14.8 Оценка влияния снижения размерности взаимнокорреляционных функций, сформированных в 4f-корреляторе на качество распознавания

Дарья Владимировна Павленко¹, Р. С. Стариков¹, А. В. Шифрина¹

¹ Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия

Представлены результаты нейросетевого распознавания изображений объектов с использованием взаимнокорреляционных функций, формируемых с применением инвариантных фильтров. Выполнено моделирование распознавания контурных изображений нескольких классов. В качестве фильтра рассматривается инвариантный фильтр, реализованный в оптической системе в виде компьютерно-синтезированной голограммы Фурье. Для снижения размерности взаимнокорреляционных функций применены различные методы интерполяции. Получены соответствующие оценки влияния снижения размерности взаимнокорреляционных функций на качество распознавания.

Ключевые слова: Компьютерно-синтезированная голограмма Фурье, Инвариантный фильтр, 4f-коррелятор, Распознавание изображений.

14.9 Гибридный нейросетевой алгоритм выделения быстроизменяющихся слабоконтрастных образов в оптических видеопоследовательностях на квазистационарном фоне

Владимир Дмитриевич Козырев¹, М. В. Вязовых¹, А. С. Кузнецов¹, А. А. Ковтун¹

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Представлены результаты разработки гибридного нейросетевого алгоритма выделения быстроизменяющихся слабоконтрастных образов в оптических видеопоследовательностях на квазистационарном фоне. Показана эффективность сочетания адаптивной обработки изображений, компенсации фоновых изменений и нейросетевых методов для повышения устойчивости выделения динамических областей при варьируемом контрасте изображения.

Ключевые слова: Нейросети, Машинное обучение, Оптические видеопоследовательности, Слабоконтрастные образы, Квазистационарный фон, Адаптивная обработка изображений.

Стендовые доклады

С.14.1 SVETIANNa 2.0: открытая библиотека для проектирования нейроморфных оптических компьютеров

Семён Сергеевич Чузунов¹, В. Д. Игошин¹, С. Н. Волчков¹, А.Ю. Кохановский¹, А. А. Щербаков¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлено программное обеспечение SVETIANNa с открытым исходным кодом, разработанное для моделирования систем дифракционной оптики и проектирования оптических вычислителей. Реализованы методы решения прямой задачи дифракции и инструменты автоматического дифференцирования для решения задач обратного проектирования и оптимизации дифракционных оптических элементов. Проведено моделирование дифракционных нейронных сетей различной архитектуры для решения задачи классификации изображений. Продемонстрирована возможность оптимизации параметров оптических систем и применения методов машинного обучения к задачам вычислительной оптики.

Ключевые слова: Оптические вычислители, дифракционные нейронные сети, моделирование оптических систем, обратная задача дифракции.

С.14.2 Распознавание бинарных растриванных изображений нейрореподобной оптико-цифровой системой на основе схемы пространственной фильтрации

Юлия Сергеевна Ленкова¹, Д. В. Павленко¹, Ф. А. Ушаков¹, Е. К. Петрова¹, А. В. Шифрина¹, П. А. Черёмхин¹, Е. Ю. Злоказов¹, Р. С. Стариков¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Предложен метод формирования бинарного представления изображений, основанный на методе растривания, адаптированный для вывода на микрозеркальный пространственно-временной модулятор света (МЗ ПВМС). Каждый пиксел заменяется блоком 2×2 пиксела с псевдослучайным распределением единиц и нулей, пропорциональным исходной яркости, что обеспечивает сохранение средней интенсивности и исключает возникновение регулярных периодических структур. В 4f-схеме осуществляется операция свертки растриванных изображений с набором голографических фильтров, представленных в виде синтезированных внеосевых голограмм Фурье. Полученные выходные сигналы классифицируются с помощью нейронной сети. Показано, что предложенный метод бинарного представления изображений, основанный на методе растривания, сохраняет информативные признаки, достаточные для распознавания, что позволяет использовать МЗ ПВМС, как наиболее быстродействующий.

Ключевые слова: микрозеркальный пространственно-временной модулятор света, 4f-схема, оптические свёртки, свёрточная нейронная сеть.

Секция 15 Терагерцовая фотоника

Устные доклады

15.1 ТГц–ИК спектроскопия лабораторных аналогов межзвездных и околозвездных льдов (Приглашенный)

А.А. Гавдуш. Кирилл Игоревич Зайцев, д.ф.-м. н.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

Знание оптических свойств астрофизических льдов в ТГц–ИК диапазоне важно для моделирования теплового излучения газопылевых облаков и переноса излучения в плотных и холодных областях межзвездной среды. Отсутствие этого знания осложняет анализ современных астрофизических наблюдений. Для решения отмеченной проблемы создана экспериментальная установка, позволяющая выращивать лабораторные аналоги астрольдов при криогенных температурах и измерять их широкополосный отклик с помощью ТГц импульсной спектроскопии и ИК фурье спектроскопии. С помощью этой установки уже изучены различные льды: CO, CO₂, N₂ и H₂O (Ih, Ic и аморфной фаз).

Ключевые слова: ТГц технологии, ТГц лабораторная астрофизика, ТГц импульсная спектроскопия, ИК фурье спектроскопия, широкополосные оптические свойства, межзвездные и околозвездные льды, газопылевые облака.

15.2 Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения однопериодных терагерцовых импульсов высокой интенсивности (Приглашенный)

Сергей Борисович Бодров^{1,2}, д. ф.-м. н., М. И. Бакунов¹

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

² Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова, Нижний Новгород, Россия

Представлен обзор современных схем генерации квазиоднопериодного терагерцового излучения, основанных на оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах в условиях коллинеарного и неколлинеарного оптико-терагерцового синхронизма. Основное внимание уделено оптико-терагерцовой конверсии в кристалле LiNbO₃ при накачке остросфокусированными лазерными импульсами и слабосфокусированными импульсами со скошенным фронтом интенсивности. Рассмотрены нелинейные методы диагностики различных материалов, основанные на эффектах индуцированной терагерцовым полем второй оптической гармоники и люминесценции.

Ключевые слова: Терагерцовое излучение, Фемтосекундные лазерные импульсы, Электрооптические кристаллы, Генерация второй гармоники, Люминесценция.

15.3 Восстановление терагерцового волнового фронта по серии распределений интенсивности зарегистрированных с использованием перестраиваемого дифракционного оптического элемента на углеродных нанотрубках

Елизавета Георгиевна Циплакова^{1,2}, А. В. Черных¹, И. И. Раков³, Н. И. Рагинов³, Д.В. Красников³, А. В. Радивон^{4,5}, М. Г. Бурданова⁴, Н. В. Петров^{1,6}

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

³ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

⁴ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁵ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

⁶ Харбинский технологический университет, Харбин, Китай

Представлены результаты экспериментального восстановления волнового фронта терагерцового (ТГц) трехзарядного вихревого пучка, сформированного перестраиваемой спиральной зонной пластиной (СЗП) на основе углеродных нанотрубок. Восстановление фазы выполнено по набору распределений интенсивности, зарегистрированных при динамическом растяжении СЗП для одного фиксированного расстояния до детектора. Обработка данных проведена с помощью итерационного алгоритма, основанного на настройке кривизны волнового фронта при изменении механического состояния пластины. Предложенный подход заменяет традиционную многоплоскостную регистрацию с продольным перемещением детектора растяжением оптического элемента, обеспечивая компактность измерительной схемы. Продемонстрировано восстановление амплитуды и фазы пучка на частоте 0,329 ТГц. Рассчитаны нормированные спектры орбитального углового момента из восстановленных экспериментальных комплексных амплитуд и соответствующих численных данных.

Ключевые слова: Терагерцовый диапазон, Восстановление фазы, Спиральная зонная пластина, Углеродные нанотрубки, Вихревой пучок, Орбитальный угловой момент

15.4 Полосовая фильтрация для систем визуализации на основе терагерцовой импульсной спектроскопии

Алина Анатольевна Рыбак^{1,2}, Н. А. Николаев^{1,2}, С. А. Кузнецов^{1,2,3}

¹ Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «КТИПМ», Новосибирск, Россия

В работе продемонстрирована реализация метода субдискретизации в терагерцовой импульсной спектроскопии с помощью специально разработанного полосового пропускающего фильтра на основе эталона Фабри-Перо. Спектральная характеристика фильтра определяется в соответствии с теорией субдискретизации, а геометрия частотно-селективной поверхности, служащей отражающим слоем, оптимизирована. После изготовления фильтров с использованием технологии контактной литографии метод субдискретизации был экспериментально протестирован, показав сокращение времени сбора данных без заметной потери точности. Данный подход может быть перспективным для узкополосных спектральных приложений визуализации, особенно в неразрушающем контроле и обнаружении скрытых терагерцовых меток или веществ с характерными спектральными отпечатками.

Ключевые слова: терагерцовая фотоника, частотно-избирательная поверхность, субдискретизация, импульсная терагерцовая спектроскопия, терагерцовая визуализация.

15.5 Изучение диэлектрических и термооптических свойств плёнок ИТО в спектральном диапазоне от видимого до терагерцового

Денис Сергеевич Грибанов^{1,2,3}, Н. Д. Осинцева², Л. Д. Микерин¹, Н. А. Николаев^{1,3}

¹ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

Работа посвящена исследованию диэлектрических и термооптических свойств плёнок оксида индия-олова (ИТО) на кварцевой подложке. Изучены образцы толщиной 41, 133 и 290 нм. Диэлектрические свойства исследованы в диапазоне от видимого до терагерцового (ТГц) методами импульсной ТГц-спектроскопии, инфракрасной Фурье-спектроскопии и спектрофотометрии; результаты аппроксимированы моделью Друде. Термооптические свойства плёнок ИТО и порог их оптического пробоя на длине волны 130 мкм исследованы методом термолинзовой спектрометрии с использованием интенсивного ТГц-излучения Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ). Регистрация индуцированных излучением НЛСЭ термолинзовых эффектов осуществлялась методами цифровой голографии.

Ключевые слова: Термолинзовая спектрометрия, Цифровая голография, Импульсная терагерцовая спектрокопия, Спектрофотометрия, Инфракрасная Фурье-спектроскопия

15.6 Свойства халькогенидных кристаллов в терагерцовом диапазоне частот

*Олеся Николаевна Шевченко^{1,2}, А. А. Рыбак^{1,2}, В. Д. Анцыгин¹, С. А. Журков³, А. П. Елисеев³,
В. Н. Веденяпин³, Л. И. Исаенко³, Н. А. Николаев^{1,2}*

¹ Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

В работе представлено исследование эффективности детектирования терагерцовых импульсов электрооптическим методом в халькогенидных кристаллах (LiGaS₂, LiGaSe₂, LiInS₂, LiInSe₂ с различными срезами и GaSe:S). Измерены показатели преломления и коэффициенты поглощения кристаллов при накачке лазерным излучением $\lambda = 775$ нм и в пределах 0,1 – 2,6 ТГц. Проведена оценка значения электрооптического коэффициента каждого кристалла по сравнению с эталонными кристаллами-детекторами при взаимодействии лазерного излучения на длинах волн 775 и 1550 нм и терагерцовых импульсов.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, электрооптический коэффициент, халькогенидные кристаллы, показатель преломления

Стендовые доклады

С.15.1 Исследование дисперсии глубины проникновения поля терагерцовых поверхностных волн в воздух

Валерия Дмитриевна Кукотенко¹, В.В. Герасимов^{1,2}, А.Г. Лемзяков^{1,3}, И.А. Азаров^{2,4}, А. К. Никитин⁵

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Центр коллективного пользования “Сибирский кольцевой источник фотонов” Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирская обл., р.п. Кольцово, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

⁵ Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

Терагерцовые технологии развиваются в сторону разработки компактных сенсоров и интегральных схем, которые могут быть реализованы с использованием поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Эффективность и компактность таких устройств зависит от энергетических потерь и глубины проникновения D поля ППП в воздух, однако достоверных экспериментальных данных о дисперсии D практически нет. В работе методом частичного экранирования с помощью Новосибирского лазера на свободных электронах ($\lambda = 141\text{--}356$ мкм) исследована дисперсия D над поверхностью золота, покрытой слоем ZnS толщиной 1.65 мкм. Наблюдаемый квадратичный рост $D(\lambda)$ согласуется с импедансной моделью для поверхностных волн. Из измеренных D и длины пробега L определена комплексная диэлектрическая проницаемость золота, совпадающая с данными поверхностной плазмонной интерферометрии. Предложенный подход прост, бесконтактен и может использоваться для характеристики проводящих поверхностей.

Ключевые слова: Терагерцовый диапазон, Поверхностные плазмон-поляритоны, Глубина проникновения, Металлические пленки, Эффективная диэлектрическая проницаемость.

С.15.2 Восстановление и анализ волнового фронта непрерывного терагерцового пучка квантового каскадного лазера

Илья Григорьевич Степанов¹, Е.Г. Циплакова^{1,2}, И.Е. Рыков⁴, М.В. Майтама⁴, И.А. Глинский⁴, Д.А. Белов^{4,5}, А.В. Иконников^{4,5}, Р.А. Хабибуллин⁴, А.В. Черных¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Харбинский инженерный университет, Циндао, Китай

³ Харбинский технологический университет, Харбин, Китай

⁴ Московский физико-технический институт, Россия

⁵ Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия

Представлены результаты восстановления дифракции волнового фронта непрерывного терагерцового пучка квантового каскадного лазера. Численное моделирование выполнено на основе экспериментальных данных с использованием семейства многоплоскостных итерационных методов восстановления фазы. Восстановленное распределение фазы позволяет определить пространственные характеристики пучка, в том числе кривизну волнового фронта и углы отклонения оси распространения относительно нормали к плоскости детектора. Это дает возможность прогностического моделирования распространения пучка в различных оптических конфигурациях. Полученные данные о волновом фронте формируют основу для детального анализа пространственных свойств и последующей коррекции терагерцового излучения и могут быть непосредственно использованы при решении задач визуализации в терагерцовом диапазоне.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, восстановление волнового фронта, восстановление фазы.

С.15.3 Терагерцовый детектор на основе графена, интегрированный на кремниевый волновод.

Анастасия Николаевна Тутченко¹, К. В. Шеин¹, И. А. Гайдученко¹

¹ Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва, Россия

Терагерцовые фотонные интегральные схемы на высокоомном кремнии — перспективная компактная платформа для приёмопередатчиков 6G, однако их развитию препятствует отсутствие эффективных монокристаллических детекторов, функционирующих при комнатной температуре. Графен благодаря слабому электрон-фононному взаимодействию и

способности к широкополосному поглощению терагерцового излучения является перспективным материалом для быстрого детектирования. В данной работе представлен графеновый терагерцовый детектор, интегрированный в кремниевый диэлектрический волновод. Графен, инкапсулированный гексагональным нитридом бора, вписан в коническую щелевую антенну. Измеренная вольт-ваттная чувствительность детектора составляет $\sim 11,5$ В/Вт, при ограниченной схеме считывания полосе пропускания 1,8 ГГц. Анализ зависимости фотонапряжения от напряжения смещения свидетельствует о том, что вблизи точки электронейтральности доминирующим механизмом детектирования является болометрический эффект.

Ключевые слова: Терагерцы, Графен, Кремниевая фотоника.