ХОЛОЭКСПО
наука и практика

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ХОЛОЭКСПО НАУКА И ПРАКТИКА»

ХОЛОЭКСПО 2025

XXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГОЛОГРАФИИ И ПРИКЛАДНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Уфа, 8–12 сентября 2025 г.

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

BAUMAN PRESS
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

ХОЛОЭКСПО 2025

XXII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям

(Уфа, 8–12 сентября 2025 года)

Тезисы докладов

BAUMANPRESS
Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2025

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1
ББК 22.343.4
Х73

Издание доступно в электронном виде по адресу
https://press.bmstu.ru/catalog/item/8540/

Х73 **ХОЛОЭКСПО 2025** : XXII Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям (Уфа, 8–12 сентября 2025 года) : тезисы докладов / Общество с ограниченной ответственностью «Холоэкспо наука и практика». — Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. — 403, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6678-8

В сборнике представлены тезисы докладов XXII Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям ХОЛОЭКСПО 2025 (Уфа, 8–12 сентября 2025 г.) по следующим тематикам: тенденции развития оптических технологий, дифракционные и градиентные оптические элементы и системы, оптика лазерных пучков и структурированного света, системы визуализации и отображения информации для AR/VR, оптические защитные технологии, интегральная фотоника, интерферометрия и оптическая метрология, квантовые оптические технологии, технологии микро- и наноструктурирования, цифровая голография и методы визуализации, современные функциональные оптические материалы, биофотоника, новые прикладные оптические технологии, оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации, нейросетевые технологии в фотонике.

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

УДК 681.7+004.315.7+535.317.1
ББК 22.343.4

Издается в авторской редакции.

© ООО «Холоэкспо наука и практика», 2025
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025

ISBN 978-5-7038-6678-8

ХОЛОЭКСПО 2025

XXII Международная конференция по голографии и оптическим технологиям

Спонсоры и партнеры

Платиновый спонсор

АО «НПО «КРИПТЕН»

Бронзовые спонсоры

АО «НТЦ «Атлас»

ЗАО «ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДУСТРИЯ»

ООО «ХолоГрэйт»

Спонсоры

ООО «Джеймс Ривер Бранч»

ООО «Компания «АЗИМУТ ФОТОНИКС»

АО «СЛС Прайм Технолоджи»

ООО «ЕТМ Фотоника»

Партнеры

ООО «Альянс Оптических Систем»

ООО «Оптико голографи-ческие приборы»

АО «НПО «ГИПО»

ООО «Лазерный центр»

ООО «Специальные Системы. Фотоника»

ООО «Центр Компьютерной Голографии»

Информационные партнеры

Лазерная ассоциация

Оптическое общество имени Д. С. Рождественского

Научно–техническое издание «Оптический журнал»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Журнал «Фотоника»

Журнал «Мир техники кино»

«Голографика»

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

Программный комитет

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

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

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

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

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

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

Голубева Татьяна Юрьевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры Общей физики-1 Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

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

Драчев Владимир Прокопьевич, доктор физико-математических наук, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

Кутлуяров Руслан Владимирович, кандидат технических наук, директор Школы перспективных исследований и технологий фотоники Уфимского университета науки и технологий, Уфа, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Пленарные доклады «Тенденции развития оптических технологий»

Интегральные устройства на платформе КНИ

В.П. Драчев

АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологий» Сколтех, Москва, Россия

Рассмотрены технологии изготовления с использованием электронной литографии, плазменного травления, вакуумного нанесения материалов, и интегральные устройства на кремнии: планарный широкополосный электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе, компактные анализаторы сигналов волоконно-оптических датчиков, кремниевые дифракционные решетки ввода/вывода позволяющей изготовление за однократное травление, упорядоченные волноводные решетки, микрокольцевые резонаторы с термооптической перестройкой.

Ключевые слова: *фотонные интегральные схемы, кремний на изоляторе, кремниевые технологии изготовления*

Интегральная кремниевая фотоника демонстрирует высокий конкурентный уровень среди технологических платформ, ориентированных на производство фотонных интегральных схем (ФИС) и устройств на их основе. За последние десятилетия интерес к исследованиям в области кремниевой фотоники неуклонно растет благодаря многочисленным применениям, таким как телекоммуникации и высокоскоростная передача данных, радиофотоника, а также сенсоры, включающие фотодетекторы, лидары, гироскопы, биосенсоры, спектрометры и др. Современный уровень кремниевых технологий предоставляет огромные возможности для изготовления фотонных интегральных схем, поскольку базируется на отработанных технологических процессах кремниевой микроэлектроники. По многим параметрам кремниевая интегральная фотоника конкурирует с альтернативными платформами на основе фосфида индия, нитрида и оксида кремния и других материалов.

В докладе будут рассмотрены современные подходы, используемые в технологиях кремниевой интегральной фотоники, и описаны разработанные на их основе компоненты фотонных интегральных схем и устройств, а также проведено сравнение с альтернативными технологическими платформами. Набор технологий, как правило, включает разработку и расчет дизайна, изготовление с использованием электронной литографии, плазменного травления, вакуумного нанесения материалов, тестирование экспериментальных макетов, желательно в рамках одной лаборатории. Обсудим разработанные компоненты фотонных интегральные схемы и интегральных устройств [1], таких как планарный широкополосный (40 ГГц) электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе; компактные анализаторы сигналов волоконно-оптических датчиков; кремниевые дифракционные решетки ввода/вывода с рекордными параметрами для прямой решетки, позволяющей изготовление за однократное травление; упорядоченные волноводные решетки; микрокольцевые резонаторы с термооптической перестройкой по длине волны 2 нм/мкс.

Список источников

[1] *Косолобов С.С., Пшеничнюк И.А., Тазиев К.Р., Земцова А.К., Земцов Д.С., Смирнов А.С., Жигунов Д.М., Драчев В.П.* Кремниевая интегральная фотоника // УФН. 2024. Т. 194. С. 1223–1239. https://doi.org/10.3367/UFNr.2024.09.039762

Integrated devices on the SOI platform

V.P. Drachev

Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

The article discusses manufacturing technologies using electron lithography, plasma etching, vacuum deposition of materials, and integrated devices on silicon: a planar broadband electro-optical light modulator based on the field effect of excitation of angular plasmons in a hybrid waveguide, compact analyzers of fiber-optic sensor signals, silicon diffraction input/output gratings that allow manufacturing in a single etching, ordered waveguide gratings, and microring resonators with thermo-optical tuning.

Keywords: *photonic integrated circuits, silicon-on-insulator, silicon manufacturing technologies*

Оптические квантовые вычисления в дискретных переменных

Е.А. Вашукевич, В.А. Леонов, Р. Сурмай, Е.Н. Башмакова, Т.Ю. Голубева

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен современному состоянию исследований в области квантовых вычислений в дискретных переменных. Основной акцент будет сделан на оптических квантовых вычислителях и симуляторах. При этом будут теоретически рассмотрены преимущества и недостатки использования фотонов в качестве носителей информации, а также продемонстрированы модели вычислений не только с использованием бинарной логики (кубитов), но и на системах более высокой размерности (кудитах). Будет проведен подробный анализ существующих экспериментальных реализаций, а также затронут вопрос области их применимости для решения сложных вычислительных задач.

Ключевые слова: *квантовые вычисления, квантовая информатика, оптические кубиты, оптические кудиты, логические вентили.*

Разработка теоретической и экспериментальной базы для осуществления квантовых вычислений, изучение протоколов хранения и обработки информации, и, в конечном итоге, решение проблемы масштабируемости для достижения уверенного квантового превосходства являются на сегодняшний день одними из важнейших задач квантовой оптики и информатики.

Свет обладает несколькими критическими аспектами для его использования в рассматриваемой области, например большим временем декогеренции и огромным количеством разработанных методов передачи квантового состояния света на расстояния [1]. Сегодня при построении теории квантовых вычислений с использованием квантовых состояний света существуют два принципиально различных подхода — это вычисления в дискретных и в непрерывных переменных. Вычисления в дискретных переменных используют в качестве ресурса дискретные степени свободы фотона, например, поляризацию (которая кодирует состояние бинарного логического объекта — кубита) [2] или орбитальный угловой момент света (ОУМ) (который используется для создания многомерного логического состояния — кудита) [3]. Для построения произвольной унитарной вычислительной операции в дискретных переменных нам необходимо уметь совершать как минимум две однокубитных (однокудитных) операции и одну двухчастичную управляемую операцию [4]. Однако, создание двухкубитного управляемого квантового вентиля представляет собой сложную задачу, так как фотоны не взаимодействуют непосредственно, а комплексные устройства, предложенные для этой цели в настоящий момент имеют достаточно низкую вероятность успешного срабатывания [5].

Квантовые вычисления на кубитах, детально и полно исследованные теоретически, сейчас широко исследуются экспериментально. Однако, для достижения квантового превосходства необходимо уметь оперировать большим количеством кубитов, что является крайне сложной задачей в силу неизбежной декогеренции квантовых систем. В связи с этим, были предложены способы решения проблемы масштабируемости путем использования многомерных квантовых систем — кудитов. Кудиты позволяют существенно увеличить информационную емкость канала — количество информации, которое можно закодировать в одном физическом носителе, что оказывается весьма полезным в задачах квантовой коммуникации [6]. Были продемонстрированы также значительные преимущества кудитов над кубитами в протоколах квантовой криптографии, где защищенность протокола оказывается тем выше, чем больше размерность системы [7]. Однако способы реализации однокудитных и двухкудитных операций пока что разработаны далеко не так детально, как операции для кубитов.

В работе представлен обзор основных теоретических и экспериментальных наработок в области оптических вычислений в дискретных переменных. В частности, будет дано введение в теорию однокудитных квантовых гейтов в дискретных переменных и показана возможность преобразования ОУМ света в схеме рамановской квантовой памяти на холодных атомах. Мы показали, что, варьируя пространственный профиль управляющего поля на этапах записи и считывания, ОУМ квантового поля можно изменять на определенную величину в широком диапазоне значений. Такая схема преобразования обладает достаточно высокой эффективностью (того же порядка, что и протоколы рамановской памяти для света без ОУМ), а также, что немаловажно, позволяет осуществлять хранение информации одновременно с преобразованием [8]. Разработанный протокол был использован нами для построения однокудитных квантовых логических операций. Было показано, что такие операции обеспечивают высокую верность когерентного преобразования квантового многомодового света с ОУМ [9]. Кроме того, в работах [10, 11] был продемонстрирован протокол, позволяющий перепутывать оптические и атомные кубиты между собой. Расширение протоколов на случай дискретных переменных высокой размерности также будет обсуждаться в докладе.

Список источников

[1] *DiVincenzo D.P.* Quantum computation // Science. 1995. Vol. 270. No. 5234. P. 255–261.

[2] *Barrett S.D., Kok P.* Efficient high-fidelity quantum computation using matter qubits and linear optics // Physical Review A. 2005. Vol. 71. No. 6. Art. no. 060310.

[3] *Gottesman D.* Fault-tolerant quantum computation with higher-dimensional systems // NASA International Conference on Quantum Computing and Quantum Communications. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. P. 302–313.

[4] *Deutsch D.E., Barenco A., Ekert A.* Universality in quantum computation // Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences. 1995. Vol. 449. No. 1937. P. 669–677.

[5] *Nemoto K., Munro W.J.* Nearly deterministic linear optical controlled-NOT gate // Physical review letters. 2004. Vol. 93. No. 25. Art. no. 250502.

[6] *Erhard M. et al.* Twisted photons: new quantum perspectives in high dimensions // Light: Science & Applications. 2018. Vol. 7. No. 3. P. 17146–17146.

[7] *Sheridan L., Scarani V.* Security proof for quantum key distribution using qudit systems // Physical Review A. 2010. Vol. 82. No. 3. Art. no. 030301.

[8] *Vashukevich E.A., Golubeva T.Y., Golubev Y.M.* Conversion and storage of modes with orbital angular momentum in a quantum memory scheme // Physical Review A. 2020. Vol. 101. No. 3. Art. no. 033830.

[9] *Vashukevich E.A., Bashmakova E.N., Golubeva T.Y., Golubev Y.M.* High-fidelity quantum gates for OAM single qudits on quantum memory // Laser Physics Letters. 2022. Vol. 19. No. 2. Art. no. 025202.

[10] *Bashmakova E.N., Vashukevich E.A., Golubeva T.Y.* Parallel multi-two-qubit swap gate via quantum nondemolition interaction of orbital-angular-momentum light and an atomic ensemble // Physical Review A. 2024. Vol. 109. No. 1. Art. no. 012428.

[11] *Vashukevich E.A., Golubeva T.Y.* Parallel two-qubit entangling gates via a quantum nondemolition interaction controlled by rotation // Physical Review A. 2024. Vol. 110. No. 3. Art. no. 032616.

Optical quantum computations in discrete variables

E.A. Vashukevich, V.A. Leonov, R. Surmay, E.N. Bashmakova, T.Y. Golubeva

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

The paper is devoted to the current state of quantum computing in discrete variables. special emphasis will be placed on optical quantum computers and simulators. The advantages and disadvantages of using photons as information carriers will be theoretically considered. We demonstrate the computational models not only using binary logic (qubits), but also on higher-dimensional systems (qudits). A detailed analysis of existing experimental implementations as well as the question of their applicability to solving complex computational problems will be carried out.

Keywords: *quantum computations, quantum computer science, optical qubits, optical qudits, logic gates*

Тенденции в развитии сенсибилизаторов фотополимерных материалов

В.В. Шелковников[1, 2]

[1] *Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Рассмотрены основные направления в развитии сенсибилизации реакций фотополимеризации с участием органических фотоинициаторов и гибридных фотоинициирующих структур с акцентом на применение в голографической и объемной стереолитографической записи.

Ключевые слова: *фотополимерные материалы, сенсибилизация, ближняя ИК-область*

В докладе рассмотрены основные направления в развитии сенсибилизации реакций фотополимеризации с участием органических фотоинициаторов и гибридных фотоинициирующих структур с акцентом на применение в голографической и объемной стереолитографической записи. Приведены типы фотоинициаторов с внутримолекулярным разрывом связи и с фотопереносом электрона и основные механизмы сенсибилизации свободно-радикальной и катионной полимеризации с раскрытием цикла. Даны примеры фотогенераторов кислот и оснований, катализирующих полимеризацию.

Сопоставлены подходы в создании фоторезистов для фотолитографии в области микроэлектроники и в области полиграфической фотополимеризации. Основной тенденцией на современно этапе является смещение интереса исследователей к сенсибилизации фотополимерных материалов в ближнюю ИК область спектра.

Рассмотрены варианты инициирования фотополимеризации акриловых мономеров за счет эффекта конверсии вверх на частицах комплексов лантаноидов в растворах с участием катионного цианинового красителя связанного с лигадом лантаноида и явления триплет-триплетной аннигиляции при возбуждении сенсибилизаторов в ИК области с передачей энергии на аннигилятор. Обсуждены структуры эффективных сенсибилизаторов с термически активированной задержанной люминесценцией. Приведен пример сенсибилизации в ближней ИК области радикальной полимеризации с переносом атома катализатора.

Продемонстрированы примеры использования сенсибилизаторов с поглощением на основном переходе в ближней ИК области и с поглощением на синглет-триплетном переходе для фотогенерации синглетного кислорода. Приведены данные по применению олигомерных и дендрообразных сенсибилизаторов фотополимеризации при двух-фотонном поглощении.

Trends in the development of photopolymer material sensitization

V.V. Shelkovnikov[1, 2]

[1] *N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The main trends of photopolymerization sensitization development on the base of organic photoinitiators and hybrid structures are considered in the report with an emphasis on holography or stereolithography application.

Keywords: *photopolymer material, sensitization, near infrared region*

Голографическое TV и 3D-дополненная реальность в зеркале ГОЛОЭКСПО

С.А. Шойдин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Показаны пути и основные результаты создания систем голографического TV и 3D-дополненной реальности. Все этапы исследований были впервые представлены на конференциях ГОЛОЭКСПО за последнее десятилетие. Проблема голографического TV и 3D-дополненной реальности широко воспринята научной общественностью, что вызвано возможностью использования предложенных научно-технических решений как в развитии ряда научных, так и ряда прикладных технических задач, в том числе в задачах стыковки беспилотных аппаратов в космосе и под водой или управления работами в опасных производствах. Наряду с уже реализованными этапами проекта показаны этапы, которые предстоит пройти для реализации проекта и открывающихся им новых направлений исследований.

***Ключевые слова**: голография, передача информации, дополненная реальность, голографическое TV, структурированный свет*

Введение

Поиск путей создания голографического телевидения и связанные с этим проектом вопросы 3D-дополненной реальности (AR, VR, MR & XR) постоянно поднимались нами на регулярных встречах ГОЛОЭКСПО с 2015 года и по настоящее время. Многое было получено под непрестанным вниманием первого основателя и организатора ГОЛОЭКСПО, Сергея Борисовича Одинокова. Одно десятилетие, много это или мало? Ровно за эти 10 лет, пройдя через множество препятствий] удалось собрать в единое целое понимание законов голографии и основ теории информации, пригласить к участию в проекте выдающихся членов команды ГОЛОЭКСПО и на этой основе получить весьма значимые результаты. И каждый раз, продвигаясь на этом трудном пути, мы приносили все новое, полученное за очередной год на нашу традиционную конференцию ГОЛОЭКСПО, где нас ждали, принимали и помогали.

Проблема **голографического TV и 3D-дополненной реальности** сегодня широко обсуждается в научных кругах, и интерес к ней постоянно растет. Это не случайно, ибо практическое применение результатов даст взрывной эффект в следующих областях:

1. Стыковка с космическими объектами, не имеющими стыковочных узлов:
   1.1. Кометы
   1.2. Абордаж недружественных искусственных спутников
   1.3. Абордаж потерявших управление искусственных спутников
   1.4. Посадка на поверхность планет с учетом ее неровностей
2. Подводная стыковка с аппаратом, не имеющим стыковочных узлов
   2.1. Абордаж недружественных подводных объектов
   2.2. Абордаж терпящих бедствие подводных объектов
3. Взаимодействие с продуктом искусственного интеллекта
   3.1. Зрительное восприятие синтезированных ИИ 3D объектов
4. Работа в опасных зонах и зонах заражения
   4.1. На АЭС
   4.2. На химических производствах
   4.3. В зонах хранения и утилизации опасных веществ
5. Автономная навигация
   5.1. Автоматическая посадка и взлет беспилотной авиации и дронов.
   5.2. Взаимодействие в воздухе аппаратов и групп аппаратов беспилотной авиации (дронов и др.), в т. ч. решение задач контактов аппаратов и избегания их столкновений.
6. Удаленная медицина:
   6.1. Операции в космосе при нахождении хирурга в Москве
   6.2. ИК наблюдение за 3D опухолевыми процессами
7. Реклама, воздействующая на человека на подсознательном уровне, посредством противоречия между двумя органами чувств - зрением и осязанием
   7.1. на TV
   7.2. в смартфонах
   7.3. в планшетах
   7.4. на компьютерах
8. Компьютерные 3D игры и развлечения

С таким широким применением и преимуществами голографической технологии не может соперничать ни одна другая.

За рубежом в прогнозах возникновения голографического TV называются 2100–2150 годы, что основывается на понимании факта, что голограммы содержат большие объемы информации [1].

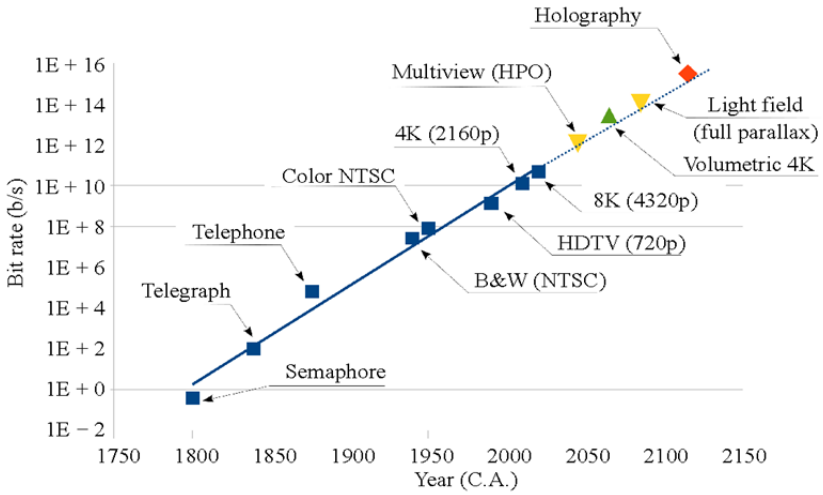


Рис. 1. Прогноз Blanche о времени достижения скоростей передачи данных для осуществления проекта голографического TV

Удалось подтвердить предположения Ю.Н. Денисюка о возможности выделения в структуре голограмм только той информационной составляющей, которую способен воспринимать человек [2]. На этой основе мы разработали ряд голографических методов удаленного воспроизведения динамических объемных изображений. Реализовали регистрацию голографической 3D-информации, экспериментально передали по стандартному радиоканалу 3D Full HD видеосюжет с частотой кадровой развертки 25 Гц и на приемном конце канала связи синтезировали отдельные голографические кадры, создав виртуальный голографический сюжет из 291 3D-кадра, восстановленного из этих виртуальных голограмм. Для доказательства реализуемости каждой голограммы такого видео мы синтезировали несколько материальных голограмм доступными голографическими технологиями на голопринтерах Dot Matrix, имеющихся у коллег из «James River Branch», Ltd [3].

В ходе работ с голографическими 3D-изображениями открылось видение новых научных направлений в части изучения следующих свойств 3D-изображений [4, 5] и основных предстоящих этапов работ по развитию технического направления голографического телевидения (рис. 2).

1. 3D-аберрации, принципиально отличающиеся от аберраций 2D-изображений тем, что они часто не приводят к уменьшению разрешения в изображении, а только к его малой деформации, аналогично известной в 2D дисторсии.

2. Ограничения по критерию Найквиста для 3D объектов принципиально не устранимы полностью, что имманентно проявляется в появлении эффекта алиасинга по их видимому краю [13].

3. Формфактор голограмм, как эффект, определяющий ограничения дифракционной эффективности голограмм сложных изображений, но помогающий оперативно и точно измерять кинетику вновь разрабатываемых голографических материалов.

4. Методы преодоления ограничений скорости интегральных двумерных преобразований, типа интегралов Рэлея-Зоммерфельда, Френеля-Кирхгофа и преобразования Фурье, включая проблемы потери фазы в БПФ.

5. Предложенный метод передачи кадров 3D цифрового голографического видео без несущей пространственной частоты двумя 2D модальностями картой высот и текстурой поверхности 3D объекта, показал существенную разницу в количестве информации, содержащейся в них.

6. Инвариантность ядра преобразования Френеля относительно произведения длины волны и расстояния от голограммы до объекта позволяет существенно сокращать RGB вычисления и открывает новый раздел в области гиперспектрального мультиплексирования 3D изображений.

После выполнения работ по пп. 4–13 мы будем готовы выйти на квалифицированного заказчика *(в терминологии Указа Президента о стратегии НТР от 28.02.2024, Общие положения, п. 1з.)* для разработки ТЗ на КД опытного экземпляра системы голографической передачи 3D-видео, а также для прототипирования голографической связи в космосе и на опасных производствах.

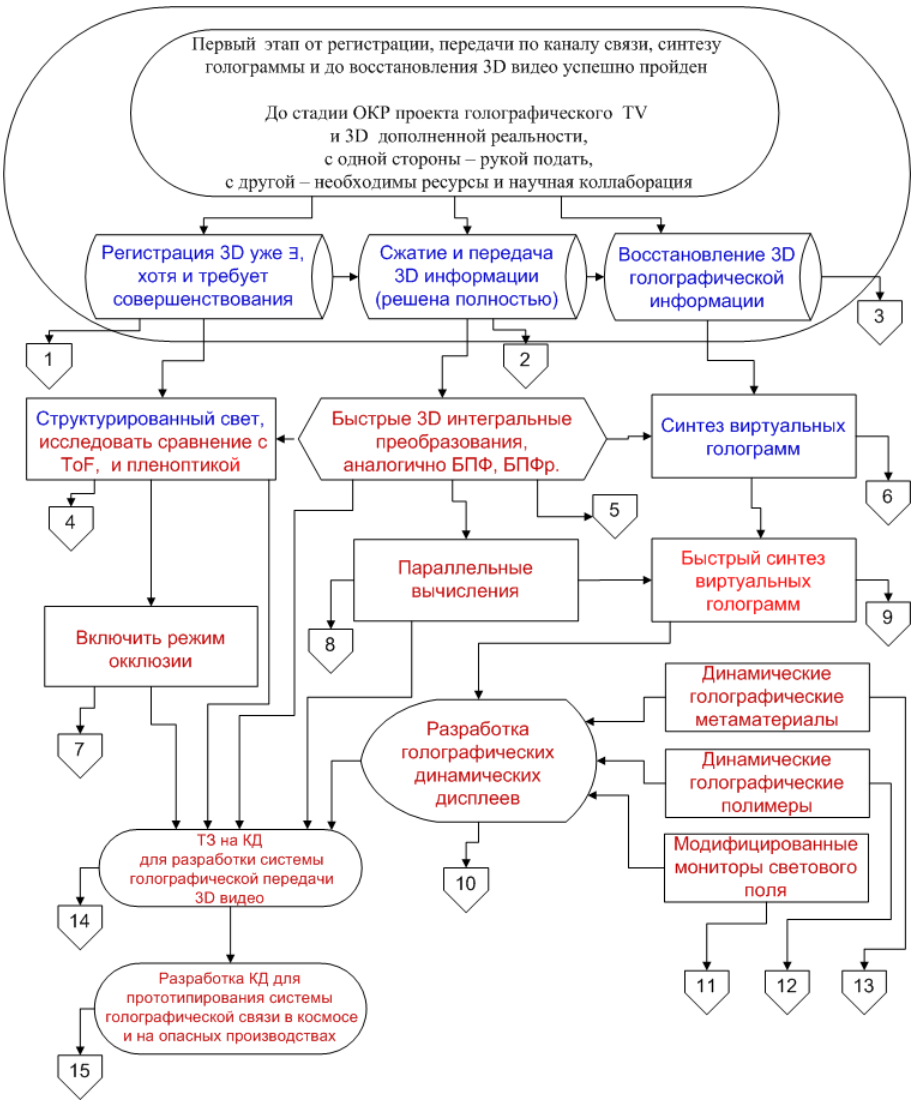


Рис. 2. Этапы работ по развитию технического направления голографического телевидения

Обсуждение и основные выводы

Представленная работа вышла из небольшой, хотя и входящей в международные справочники лаборатории голографии, и мы благодарны всем, кто имея соответствующую материальную базу участвовал в реализации нашего проекта. Однако на этом новом этапе требуются значительно бóльшие коллективные усилия.

Мы приглашаем коллег, постоянных участников нашей конференции ГОЛОЭКСПО, к консолидации совместных усилий в обозначенных выше направлениях исследований. Их актуальность уже все в большей степени видна многим, в т. ч. и зарубежным исследователям. Считаем, что продолжение этих работ по-прежнему является пионерным, обещает быть результативным как в научном, так и в технологическом, конструкторском плане.

Список источников

[1] *Blanche P.-A.* Holography, and the future of 3D display // Light: Advanced Manufacturing. Published Review. 2021. Vol. 2 (4). P. 446–459. https://doi.org/10.37188/lam.2021.028

[2] *Денисюк Ю.Н.* Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объемного кинематографа и искусственного интеллекта? // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 8. С. 155, 157.

[3] *Шойдин С.А., Пазоев А.Л., Цыганов И.К., Дроздова Е.А.* Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе // Тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям ГОЛОЭКСПО 2021. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 109–117.

[4] *Shoydin S.A., Pazoev A.L.* Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images // Photonics. 2021. Vol. 8. No. 10. P. 448–471. https://doi.org/10.3390/photonics8100448

[5] *Shoydin S.A., Pazoev A.L.* Structured Light Patterns Work Like a Hologram // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 6. Art. no. 4037. https://doi.org/10.3390/app13064037

Holographic TV and 3D augmented reality in the HOLOEXPO mirror

S.A. Shoydin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia

The ways and main results of creating holographic TV and 3D augmented reality systems are shown. All stages of research were first presented at HOLOEXPO conferences over the past decade. The problem of holographic TV and 3D augmented reality has been widely accepted by the scientific community, which is caused by the possibility of using the proposed scientific and technical solutions both in the development of a number of scientific and a number of applied technical problems, including in the tasks of docking unmanned vehicles in space and under water or managing work in hazardous industries. Along with the already implemented stages of the project, the stages that need to be completed to implement the project and the new research areas it opens up are shown.

Keywords: *holography, information transfer, augmented reality, holographic TV, structured light*

Секция 1
Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы

Компактное устройство для коллимации лазерного пучка для межспутниковой связи на основе дифракционных оптических элементов

Ю.В. Ханенко, Р.В. Скиданов, И.С. Пронин

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

Представлены результаты экспериментального исследования коллимации лазерного излучения на основе двух дифракционных оптических элементов: бинарного дифракционного аксикона и кольцевой дифракционной линзы. Рассматривается два эксперимента: на основе полноформатной системы и на основе системы с большим количеством внутренних отражений для уменьшения продольных габаритов коллиматора. Данная система позволяет решить две задачи: снижение расходимости лазерного пучка на 25–30 % и уменьшение габаритов коллиматора до размеров достаточных для использования на спутниках формата кубсат. Приведены результаты моделирования и натурного эксперимента.

Ключевые слова: *коллимация, лазерный пучок, межспутниковая связь, дифракционные оптические элементы*

Введение

В последнее время появляется все больше систем межспутниковой лазерной связи. Особенно актуальна задача организации такой связи между спутниками формата кубсат. Однако небольшие размеры таких спутников препятствуют использования в терминалах лазерной связи классических коллиматоров. Действительно, для минимизации расходимости необходимо максимально увеличивать апертуру коллиматора, при этом существенно растет также его фокусное расстояние. Единственный способ увеличения апертуры коллимирующей системы при условии попадания в габариты спутника формата Кубсат использование кольцевых гармонических дифракционных линз [1]. В [1] такие линзы были предложены для изображающих систем. В настоящей работе такие линзы используются для коллимации лазерного излучения. Это применение являет даже более обоснованным поскольку коллимируется одна длина волны, следовательно, такая система может быть идеально с ней согласована.

Разработка математической модели процесса трассировки лучей через многоэлементные изображающие системы с кольцевой диафрагмой

Коллимирующая система на основе кольцевой гармонической линзы дает существенный выигрыш по габаритам. При определенном подборе параметров такой системы можно добиться уменьшения габаритов системы вдоль оптической оси на один-два порядка. Схематичный разрез кольцевой изображающей системы с гармонической дифракционной линзой представлен на рис. 1.

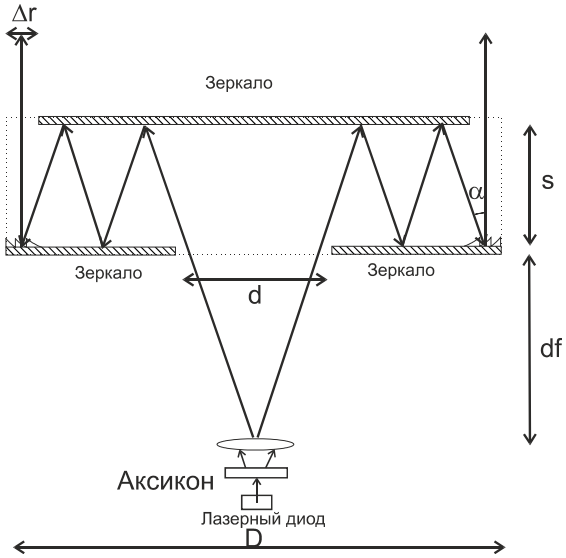


Рис. 1. Схематичный разрез кольцевой изображающей системы с гармонической линзой

Для моделирования прохождения луча через гармоническую дифракционную линзу используется подход, когда в каждой точке рассматривается аппроксимация рельефа линзы дифракционной

решеткой. Таким образом, решетка влияет на ход луча, отразившегося от гармонической линзы, отклоняя луч на угол, который рассчитывается по формуле закона дифракции:

$$\sin\alpha = \lambda/d, \quad (1)$$

где λ — длина волны; d — локальный период в точке; α — угол отклонения луча.

Кольцевая коллимирующая система представляет собой тонкую круглую пластину, которая выполнена из прозрачного материала с показателем преломления n. Источник света — лазерный диод, после лазерного диода установлен аксикон и линза, которые формируют кольцевое распределение. После нескольких переотражений внутри двух зеркал коллимированный кольцевой пучок выходит наружу. Такая система при определенном подборе параметров D, d, Δr, s, df, может быть довольно компактной. Так при апертуре 85 мм, шириной 3мм и фокусном расстоянии гармонической дифракционной линзы 1000 мм, в эксперименте удавалось сумму s+df сделать меньше 100 мм. Таким образом, суммарный размер коллиматора укладывается в 1U (объем стандартного модуля) спутника формата Кубсат.

На рис. 2 представлен трассировка лучей через кольцевой коллиматор.

Рис. 2. Двумерная схема трассировки лучей через кольцевую коллимирующую систему с гармонической линзой

Лучи проходят через кольцевую апертуру, затем доходят до гармонической дифракционной линзы, после чего следует серия отражений. Отражения происходят от внутренних стенок кольцевой коллимирующей системы до тех пор, пока лучи не дойдут до выходной кольцевой апертуры. Кольцевой коллиматор позволяет за счет своих дифракционных свойств получать примерно на 25–30 % меньшую расходимость по сравнению с обычной круглой апертурой.

На рис. 3 представлено распределение интенсивности на расстоянии 40 м от коллиматора.

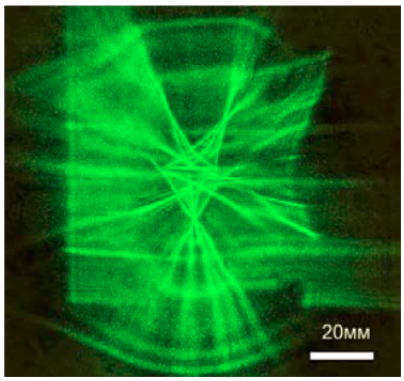


Рис. 3. Распределение интенсивности на расстоянии 40 м от коллиматора

Заключение

В работе было проведено исследование кольцевой коллимирующей системы. Проведено моделирование методом трассировки лучей. Проведен эксперимент с кольцевой апертурой диаметром 85 мм и шириной 3 мм. Показано, что можно сократить объем коллимирующей системы до 1U.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального физико-математического центра, секция № 1 «Национальный центр исследования суперкомпьютерной архитектуры. Этап 2023–2025».

Список источников

[1] *Skidanov R.V., Strelkov Yu.S., Volotovsky S. et al.* Compact Imaging Systems Based on Annular Harmonic Lenses // Sensors. 2020. Vol. 20, Iss. 14. P. 1–15.

Compact device for laser beam collimation for inter-satellite communication based on diffractive optical elements

Yu.V. Khanenko, R.V. Skidanov, I.S. Pronin

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

The paper presents the results of an experimental study of laser radiation collimation based on two diffractive optical elements: a binary diffractive axicon and a ring diffractive lens. Two experiments are considered: one based on a full-format system and one based on a system with a large number of internal reflections to reduce the longitudinal dimensions of the collimator. This system allows solving two problems: reducing the divergence of the laser beam by 25–30 % and reducing the dimensions of the collimator to sizes sufficient for use on CubeSat satellites. The results of modeling and a full-scale experiment are presented.

Keywords: *collimation, laser beam, inter-satellite communication, diffractive optical elements*

Метод опорных квадрик в задаче синтеза дифракционных оптических элементов в приближении скалярной теории дифракции

Д.В. Сошников[1, 2], Л.Л. Досколович[1, 2], А.А. Мингазов[1, 2], Е.А. Безус[1, 2], Д.А. Быков[1, 2]

[1] *Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия*
[2] *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия*

Разработан вариант метода опорных квадрик (МОК) для решения обратной задачи расчета фазовой функции дифракционного оптического элемента (ДОЭ), формирующего заданное распределение интенсивности, в рамках скалярной теории дифракции. В рамках метода фазовая функция ДОЭ представлена в параметрическом виде, соответствующем суперпозиции фазовых функций линз (квадрик). Расчет параметров квадрик основан на градиентном методе минимизации функции ошибки, представляющий отличие формируемого и требуемого распределений интенсивности в рамках скалярной теории дифракции. При этом производные функции ошибки по параметрам квадрик получены в аналитическом виде. Представленные примеры расчета ДОЭ для формирования заданных распределений интенсивности демонстрируют хорошие рабочие характеристики метода.

Ключевые слова: *дифракционный оптический элемент, обратная задача, метод опорных квадрик, приближение геометрической оптики, скалярная теория дифракции, градиентный метод*

Введение

В настоящей работе впервые разработан вариант метода опорных квадрик (МОК) для решения обратной задачи расчета фазы светового поля (или фазовой функции ДОЭ) в рамках скалярной теории дифракции. В рамках метода, в соответствии с методологией МОК, фазовая функция ДОЭ представлена в параметрическом виде, соответствующем суперпозиции фазовых функций линз (квадрик). Расчет параметров квадрик основан на градиентном методе минимизации функции ошибки, представляющей отличие формируемого и требуемого распределений интенсивности в рамках СТД. При этом производные функции ошибки по параметрам квадрик получены в аналитическом виде.

Метод опорных квадрик в приближении геометрической оптики

В приближении геометрической оптики более правильно работать не с фазовой функцией, определяющей высоту микрорельефа ДОЭ, а с функцией эйконала, которая равна фазовой функции, деленной на волновое число $k = 2\pi/\lambda$, где λ — длина волны.

Пусть в плоскости $z = 0$ задано световое поле с распределением интенсивности $I_0(\boldsymbol{u})$ и с функцией эйконала $\Phi(\boldsymbol{u})$. Задача состоит в расчете функции эйконала, обеспечивающей формирование заданного распределения интенсивности в выходной плоскости $z = f$.

В рамках МОК формируемое распределение интенсивности в плоскости $z = f$ задается в дискретном виде, соответствующем набору из N заданных значений интенсивности I_i, $i = 1\ldots N$ в N заданных точках $\boldsymbol{x}_i$.

Для фокусировки входного поля в некоторой одной точке $\boldsymbol{x}_i$ функция эйконала при $z = 0$ должна иметь вид эйконала сходящегося сферического пучка с фокусом в рассматриваемой точке:

$$\Phi_{\text{lens}}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}_i, \Psi_i) = \Psi_i - \rho(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}_i), \tag{1}$$

где $\rho(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}) \approx f + (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{u})^2 / 2f$ — расстояние между точками $(\boldsymbol{u}, 0)$ и $(\boldsymbol{x}, f)$ в параксиальном приближении, а Ψ_i — константа, представляющая эйконал в точке фокусировки. В рамках МОК для фокусировки в набор из N точек $\boldsymbol{x}_i$ функция эйконала в плоскости $z = 0$ задается в виде следующей непрерывной и кусочно-гладкой функции, состоящей из фрагментов эйконалов линз [1, 2]:

$$\Phi(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\Psi}) = \max(\Phi_{\text{lens}}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}_i, \Psi_i)), \tag{2}$$

где значения эйконала в точках фокусировки $\boldsymbol{\Psi} = (\Psi_1,\ldots,\Psi_N)$ рассматриваются как параметры. Из (2) легко видеть, что в области

$$C(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{\Psi}) = \{\, \boldsymbol{u} \mid \Phi_{\text{lens}}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}_i, \Psi_i) \geq \Phi_{\text{lens}}(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{x}_j, \Psi_j),\ \forall j = 1\ldots N \,\} \tag{3}$$

функция эйконала (2) совпадает с функцией эйконала линзы, обеспечивающей фокусировку входного поля в точке $\boldsymbol{x}_i$. В этой связи области $C(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{\Psi})$, на которых заданы эйконалы линз, образующие функцию эйконала $\Phi(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\Psi})$, можно называть апертурами линз. Значения $\boldsymbol{\Psi} = (\Psi_1,\ldots,\Psi_N)$ в (2) определяют интенсивности точек фокусировки и рассматриваются как параметры оптимизации в МОК.

Действительно, в приближении геометрической оптики значения интенсивности в точках $\boldsymbol{x}_i$ имеют вид:

$$I_{\text{est},i}(\boldsymbol{\Psi}) = \int_{C(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{\Psi})} I_0(\boldsymbol{u}) d^2\boldsymbol{u}. \quad (4)$$

Если параметры $\boldsymbol{\Psi} = (\Psi_1,\ldots,\Psi_N)$ выбраны таким образом, что рассчитанные при данных параметрах интенсивности $I_{\text{est},i}(\boldsymbol{\Psi})$ совпадают с требуемыми значениями I_i, то задача решена и функция эйконала, обеспечивающая формирование требуемого дискретного распределения, имеет вид (2). Вектор значений $\boldsymbol{\Psi} = (\Psi_1,\ldots,\Psi_N)$, обеспечивающих данное равенство, представляет стационарную точку функции

$$V(\boldsymbol{\Psi}) = \int \Phi(\boldsymbol{u},\boldsymbol{\Psi}) I_0(\boldsymbol{u}) d^2\boldsymbol{u} - \sum_{i=1}^{N} \Psi_i I_i. \quad (5)$$

Теперь, дифференцируя функцию (5) по переменным Ψ_j получим

$$\frac{\partial V(\boldsymbol{\Psi})}{\partial \Psi_j} = I_{\text{est},j}(\boldsymbol{\Psi}) - I_j. \quad (6)$$

Метод опорных квадрик в приближении скалярной теории дифракции

В данном пункте мы обобщим рассмотренный вариант МОК на случай скалярной теории дифракции. Пусть во входной плоскости $z = 0$ задано световое поле с комплексной амплитудой $w_0(\boldsymbol{u}) = A_0(\boldsymbol{u})\exp(i\varphi(\boldsymbol{u}))$, где $\varphi(\boldsymbol{u})$ — фазовая функция. В приближении СТД комплексная амплитуда поля в выходной плоскости $z = f$ описывается следующим интегралом Френеля:

$$w_{\text{est}}(\boldsymbol{x}) = \frac{e^{ikf}}{\lambda i f} \int w_0(\boldsymbol{u}) \exp\left(\frac{ik}{2f}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{u})^2\right) d^2\boldsymbol{u}.$$

Рассмотрим задачу расчета параметров $\boldsymbol{\Psi} = (\Psi_1,\ldots,\Psi_N)$ фазовой функции $\varphi(\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\Psi})$, обеспечивающих в рамках СТД формирование заданного распределения интенсивности. Отметим, что в приближении СТД, в отличие от приближения геометрической оптики, поля, формируемые в выходной плоскости апертурами линз $C(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{\Psi})$, уже не сосредоточены в дискретном наборе точек $\boldsymbol{x}_i$, а соответствуют некоторым непрерывным распределениям, которые складываются и интерферируют между собой. Поэтому в приближении СТД мы рассмотрим задачу формирования распределения интенсивности $I(\boldsymbol{x})$, заданного в некоторой области D, содержащей точки $\boldsymbol{x}_i$. Итак, пусть ошибка формирования заданного распределения интенсивности представляется следующей квадратичной функцией ошибки:

$$\varepsilon(\boldsymbol{\Psi}) = \int (I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) - I(\boldsymbol{x}))^2 \, d^2\boldsymbol{x} \to \min, \quad (7)$$

где $I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) = |w_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi})|^2$ — интенсивность поля в выходной плоскости.

Для решения данной задачи минимизации будем использовать градиентный метод. Производная $\varepsilon(\boldsymbol{\Psi})$ по некоторому параметру Ψ_j будет иметь вид:

$$\frac{\partial \varepsilon(\boldsymbol{\Psi})}{\partial \Psi_j} = \operatorname{Re}\left[\int_{C(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\Psi})} A_0(\boldsymbol{u}) i \exp\big(i\varphi(\boldsymbol{u},\boldsymbol{\Psi})\big) B^*(\boldsymbol{u},\boldsymbol{\Psi}) d^2\boldsymbol{u}\right], \quad (8)$$

где функциях

$$B(\boldsymbol{u},\boldsymbol{\Psi}) = \frac{-e^{-ikf}}{\lambda i f} \int U(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\Psi}) \exp\left(\frac{-ik}{2f}(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{u})\right) d^2\boldsymbol{x} \quad (9)$$

представляет собой результат обратного распространения поля ошибки $U(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) = 2w_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) \times$ $\times [I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) - I(\boldsymbol{x})]$ из плоскости $z = f$ в плоскость $z = 0$.

Расчетные примеры

В данном разделе представлены пример применения МОК для расчета фазовой ДОЭ, формирующих заданные распределения интенсивности в виде полутонового фрагмента портрета Карла Гаусса (рис. 1). Для расчета ДОЭ будем использовать гибридный подход. В рамках этого подхода сначала с использованием геометрооптического варианта МОК из раздела 1 производится расчет фазовой функции в приближении геометрической оптики, и затем полученная геометрооптическая фазовая функция используется в качестве стартовой точки для МОК из раздела 2, осуществляющего расчет фазовой функции в рамках СТД.

При расчете требуемое распределения интенсивности задавались в выходной плоскости $z = f = 20$ мм на квадратных сетках 600 × 600 с размером пикселя 5 × 5 мкм. В качестве исходного распределения интенсивности при $z = 0$ использовалось распределение интенсивности гауссова пучка $I_0(\boldsymbol{u}) = I_0\exp(-\boldsymbol{u}^2 / \sigma^2)$ при σ = 1,3 мм, заданное в квадратной области G со стороной 3 мм. Длина волны λ = 532 нм.

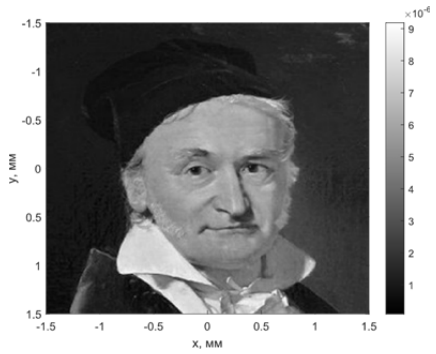
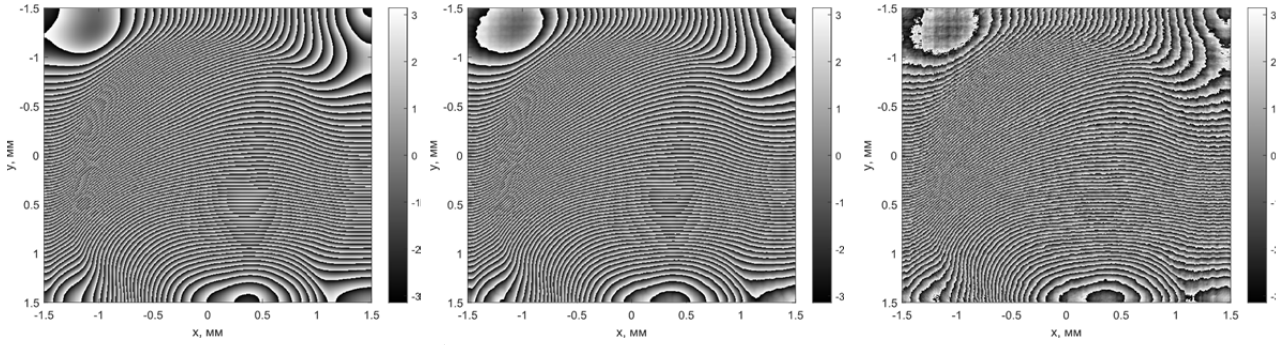


Рис. 1. Заданные распределения интенсивности в выходной плоскости в виде портрета Карла Гаусса

На рис. 2, *а* показана геометрооптическая фазовая функция, рассчитанная МОК из раздела 1. Расчет функции эйконала состоял в минимизации функции (5) методом ADAM [3], в котором расчет производных осуществлялся по формуле (6).



а *б* *в*

Рис. 2. Фазовая функция ДОЭ: *а* — геометрооптическая оптимизация МОК; *б* — оптимизация МОК в приближении СТД; *в* — дооптимизация фазовой функции при начальном приближении, полученной из МОК

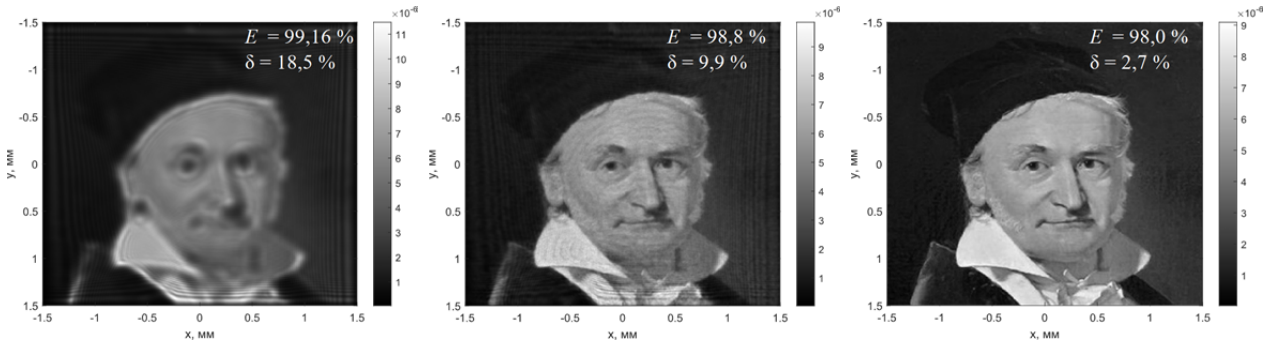
Далее для фазовой функции на рис. 2, *а* было рассчитано распределение интенсивности, формируемое в выходной плоскости в приближении СТД. Расчет распределений интенсивности состоял в численном расчете интеграла Френеля с помощью т. н. sinc-метода [4]. Рассчитанное распределение интенсивности приведены на рис. 3, *а*. Можно видеть, что распределение интенсивности имеет выраженные эффекты дифракции и достаточно сильно отличается от заданного распределения на рис. 1. Далее для характеристики качества формируемых распределений будем использовать значения энергетической эффективности E и среднеквадратичного отклонения (СКО) δ. Значение энергетической эффективности

$$E = \int_D I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) d^2\boldsymbol{x}$$

характеризуют долю энергии падающего пучка, попадающую в требуемую область $D = \{ \boldsymbol{x} \mid I(\boldsymbol{x}) \neq 0 \}$. Значение

$$\delta = \frac{1}{M}\sqrt{\frac{1}{\|D\|}\int_D [I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) - E \cdot I(\boldsymbol{x})]^2 \, d^2\boldsymbol{x}}$$

характеризует среднеквадратическое отклонение сформированного распределения от требуемого распределения и нормировано на среднее значение интенсивности $M = \frac{1}{\|D\|}\int_D I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\Psi}) d^2\boldsymbol{x}$, $\|D\|$ — площадь области D.



а *б* *в*

Рис. 3. Распределения интенсивности в выходной плоскости: *а* — геометрооптическая оптимизация МОК; *б* — оптимизация МОК в приближении СТД; *в* — дооптимизация фазовой функции при начальном приближении, полученной из МОК

Для учета и коррекции эффектов дифракции, рассчитанная геометрооптическая фазовая функция (рис. 2, *а*) была использованы в качестве стартовой точки для МОК из раздела 2. Рассчитанные фазовые функции и формируемые при них распределения интенсивности приведены на рис. 2, *б* и 3, *б*.

Интересно исследовать насколько можно улучшить формируемое распределение интенсивности при снятии ограничения на кусочно-гладкий вид фазовой функции. Для этого фазовая функция на рис. 3, *б*, была использована в качестве начального приближения для градиентного алгоритма, минимизирующего функционал ошибки

$$\varepsilon = \int [I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \varphi) - I(\boldsymbol{x})]^2 \, d^2\boldsymbol{x} \qquad (10)$$

в классе фазовых функций $\varphi(\boldsymbol{u})$ общего вида (т.е. без ограничений на непрерывность и гладкость), где $I_{\text{est}}(\boldsymbol{x}, \varphi)$ — интенсивность поля, формируемого в выходной плоскости в приближении Френеля при указанной фазовой функции. На рис. 2, *в* и 3, *в* показаны фазовая функция, рассчитанная при минимизации функционала ошибки (10) методом ADAM, и формируемое для нее распределение интенсивности в выходной плоскости. Можно видеть, что полученное распределение интенсивности (рис. 3, *в*) визуально фактически неотличимо от требуемого распределения на рис. 1.

Заключение

Для решения обратной задачи расчета фазовой функции ДОЭ в рамках СТД разработан новый вариант метода опорных квадрик. В разработанном методе, в соответствии с методологией МОК, фазовая функция представляется в специальном параметрическом виде, соответствующем суперпозиции фазовых функций линз (квадрик). Для расчета параметров квадрик используется градиентный метод минимизации функции ошибки, представляющий отличие формируемого и требуемого распределений интенсивности в рамках СТД.

Рабочие характеристики метода проиллюстрированы на примере расчета ДОЭ, формирующего заданное распределение интенсивности. Для расчета ДОЭ использовался гибридный подход. В рамках этого подхода сначала с использованием геометрооптического варианта МОК производится расчет геометрооптической фазовой функции и затем эта фазовая функция используется в качестве стартовой точки для МОК, работающего в приближении СТД. Результаты расчета показали, что разработанный вариант МОК для скалярной теории дифракции позволяет уменьшить ошибку геометрооптического решения почти в 2 раза. При этом дальнейшая оптимизация фазовых функций градиентным алгоритмом в классе функций общего вида позволяет сформировать заданные распределения интенсивности со среднеквадратичной ошибкой в единицы процентов.

Благодарность

Исследование было выполнено за счет средств государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSSS-2024-0014) в части решения задачи расчета функции эйконала в приближении геометрической оптики (раздел 1) и за счет средств гранта РНФ (проект № 24-19-00080) в части решения задачи расчета ДОЭ в приближении скалярной теории дифракции (разделы 2, 3).

Список источников

[1] *Doskolovich L.L., Moiseev M.A., Bezus E.A., Oliker V.* On the use of the supporting quadric method in the problem of the light field eikonal calculation // Optics Express. 2015. Vol. 23. Iss. 15. P. 19605–19617. https://doi.org/10.1364/OE.23.019605

[2] *Bykov D.A., Doskolovich L.L., Mingazov A.A., Bezus E.A., Kazanskiy N.L.* Linear assignment problem in the design of freeform refractive optical elements generating prescribed irradiance distributions // Optics Express. 2018. Vol. 26. Iss. 21. P. 27812–27825. https://doi.org/10.1364/OE.26.027812.

[3] *Kingma D.P., Ba J.* Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

[4] *Cubillos M., Jimenez E.* Numerical simulation of optical propagation using sinc approximation // Journal of the Optical Society of America A. 2022. Vol. 39. Iss. 8. P. 1403–1413. https://doi.org/10.1364/JOSAA.461355

Supporting quadric method for designing diffractive optical elements in the scalar diffraction theory framework

D.V. Soshnikov[1, 2], L.L. Doskilivich[1, 2], A.A. Mingazov[1, 2], E.A. Bezus[1, 2], D.A. Bykov[1, 2]

[1] *Image Processing Systems Institute, National Research Centre "Kurchatov Institute", Samara, Russia*
[2] *Samara National Research University, Samara, Russia*

We present a formulation of the supporting quadric method (SQM) taking into account diffraction effects and allowing one to calculate the phase function of a diffractive optical element (DOE) generating a prescribed intensity distribution. In the method, the DOE phase is represented as a piecewise smooth function constituted by the phase functions of lenses (quadrics) focusing the incident beam to the points of the required distribution. The quadric parameters are calculated using a gradient method minimizing an error function representing the difference between the generated and required intensity distributions. Importantly, we calculate the gradient of the error function with respect to the quadric parameters in the framework of the scalar diffraction theory (SDT) in an analytical form. The presented examples of DOE design demonstrate good performance of a hybrid approach based on using the geometrical-optics SQM solution as a starting point for the proposed SQM operating in the SDT framework.

Keywords: *diffraction optical element, inverse problem, method of reference quadrics, approximation of geometric optics, scalar theory of diffraction, gradient method*

Метод формирования гиперспектральных слоев на основе набора изображений, сформированных матрицей гармонических линз

А.С. Пронин, Р.В. Скиданов, Г.В. Успленьев, С.С. Подтихова

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

Рассмотрен метод формирования гиперспектральных слоев с использованием матрицы гармонических линз и фильтра Байера обычной цветной камеры. Разработан опытный образец, проведены эксперименты. Протестированы некоторые архитектуры нейронных сетей и алгоритмы машинного обучения для метода восстановления спектра по данным матричного гиперспектрометра. Результаты структурированы, проанализированы и представлены в работе.

Ключевые слова: *оптика, дифракционные оптические элементы, гармонические линзы, гиперспектрометр моментальной съемки*

Введение

В настоящее время огромное множество задач решаются посредством обработки изображений: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), медицина, автономные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), безопасность, искусство, агрокомплексы и так далее. Обработка гиперспектрального изображения дает возможность выделять отличия между очень близкими классами объектов, проводить оценку биохимических и геофизических параметров. Наиболее распространенными в настоящее время являются щелевые гиперспектрометры, обладающие, однако, рядом минусов, такие как большое время съемки и малая светосила. Концепция гиперспектрометра, рассматриваемая в данной работе, позволяет решить вышеупомянутые проблемы, при этом подразумевая уменьшение разрешения изображения с увеличением количества спектральных каналов.

Эксперимент с лабораторным макетом гиперспектрометра на основе матрицы гармонических линз

Был рассчитаны и изготовлены дифракционные оптические элементы (ДОЭ), представляющие собой матрицы гармонических линз 4×4 и 5×5, каждая из которых фокусирует определенную длину волны (гармонику) на матрицу. В таблице приведен перечень основных гармоник формируемых этой системой линз.

Высоты микрорельефов линз и соответствующие гармоники для матрицы гармонических линз 5×5

Номер	Высота (мкм)	Гармоника 1 (нм)	Гармоника 2 (нм)	Гармоника 3 (нм)
1	5,279	655	546	468
2	5,291	656	547	469
3	5,097	632	527	451
4	5,036	624	520	446
5	5,041	625	521	447
6	5,494	681	568	487
7	5,250	651	543	465
8	5,118	635	529	453
9	5,127	636	530	454
10	5,177	642	535	459
11	5,641	699	583	500
12	5,008	621	517	444
13	5,124	635	529	454
14	5,118	635	529	453
15	5,608	695	579	497
16	5,604	695	579	496
17	5,592	693	578	495
18	5,555	689	574	492
19	5,551	688	574	492
20	5,623	697	581	498
21	5,490	681	567	486
22	5,654	701	584	501
23	5,661	702	585	501
24	5,602	695	579	496
25	5,378	667	556	476

Был разработан опытный образец гиперспектрометра на основе матрицы линз, с помощью которого был проведен ряд экспериментов.

Результаты проведенных экспериментов

В ходе выполнения работы были решены задачи по правильному формированию 75 значений спектр. Основная проблема связана с тем, что крайне сложно сформировать микрорельеф матрицы гармонических линз с точностью лучше 5 %, а шаг изменения рельефа составляет примерно 5 % от высоты этого микрорельефа, из-за этого формирующиеся линзами гармоника располагаются на так, как это указано в таблице. Поэтому для формирования спектра обучалась нейронная сеть.

В качестве эталона выступает гиперспектрометр, на основе по схемы Оффнера. Для набора датасета, который в последующем использовался для обучения нейронной сети, использовался color checker, закрепленный на линейном перемещающем устройстве (рис. 1).

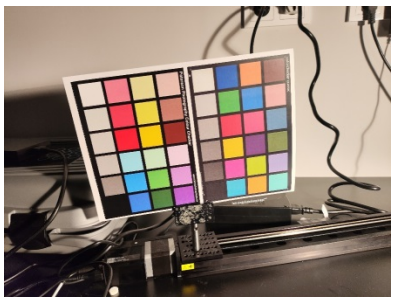


Рис. 1. Эталон для снятия спектров

Для формирования гиперкуба была написана программа, которая реализует считывание изображения с камеры, синхронизированное с движением линейного привода. На рис. 2 приведен один из спектральных слоев собранного гиперкуба.

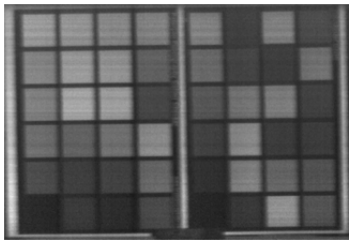


Рис. 2. Фрагмент изображения эталона, полученный
с использованием гиперспектрометра, на основе схемы Оффнера

На рис. 3 представлены спектры эталонный и полученный в исследуемом гиперспектрометре.

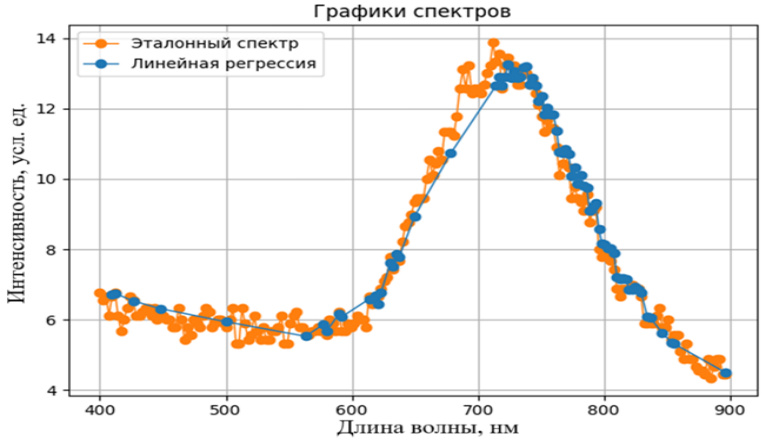


Рис. 3. Спектры эталонный и восстановленный алгоритмом линейной регрессии для 16 квадрата

На рис. 3 визуально видно хорошее соответствие полученного спектрального распределения и эталонного спектра.

Среднеквадратичное отклонение по 75 точкам менее 10 %, что дает основание утверждать о работоспособности матричного гиперспектрометра.

Заключение

Рассчитаны и изготовлены ДОЭ, состоящие из матрицы гармонических линз 4×4 и 5×5, для формирования спектральных каналов в диапазоне 400–700 нм. Проведены эксперименты с локальными светящимися объектами (светодиод), которые подтвердили работоспособность опытного образца гиперспектрометра на основе изготовленных ДОЭ. Написана программа для разметки датасета с использованием данных, снятых с гиперспектрометра на основе схемы Оффнера, который в данном случае считается эталоном. Проведены эксперименты с нейронной сетью, предназначенной для коррекции полученных спектральных распределений в каждом пикселе гиперспектрального изображения. Были выбраны три архитектуры сети и линейный регрессионный анализ. Сделан вывод о возможности использования разработанного матричного гиперспектрометра вместе с обученной нейронной сетью.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

Список источников

[1] *Казанский Н.Л., Харитонов С.И., Карсаков А.В., Хонина С.Н.* Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 2. С. 271–280.

[2] *Хонина С.Н., Волотовский С.Г., Устинов А.В., Харитонов С.И.* Анализ фокусировки гармонической дифракционной линзой с учетом дисперсии показателя преломления // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 3. С. 338–347. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-3-338-347

[3] *Досколович Л.Л., Безус Е.А., Казанский Н.Л.* Многофокусная спектральная дифракционная линза // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 2. С. 219–226. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-2-219-226

A method for forming hyperspectral layers based on a set of images formed by a matrix of harmonic lenses

A.S. Pronin, R.V. Skidanov, G.V. Uspleniev, S.S. Podtikhova

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

A method for forming hypospectral layers using a harmonic lens matrix and a Bayre filter of a conventional color camera is considered. A prototype has been developed and experiments have been conducted. Some neural network architectures and machine learning algorithms have been tested for the spectrum reconstruction method based on matrix hyperspectrometer data. The results are structured, analyzed and presented in the paper.

Keywords: *optics, diffractive optical elements, harmonic lenses, and an instantaneous hyperspectrometer*

Оптические элементы для реализации логических операций в свободном пространстве

Д.М. Сорокин, Л.Л. Досколович, Р.В. Скиданов

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

В работе рассмотрена возможность выполнения простейших логических операций с помощью дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Данные ДОЭ смогут выполнять простейшие операции, например, такие как логический вентиль. Такие логические вентили можно будет комбинировать, создавая более сложные системы.

Ключевые слова: *оптика, логические операции, дифракционные оптические элементы, логические вентили*

Введение

Для создания оптической вычислительной машины можно пойти двумя путями: создать некоторое оптическое устройство, которое будет заточено под одну конкретную задачу (например, классификация изображений, умножение матриц и т. п.), или универсальное устройство выполняющее простейшую операцию, например, деление пучка [1].

Делитель пучка

Оптический элемент имеет 2 входа и 3 выхода (рис. 1):

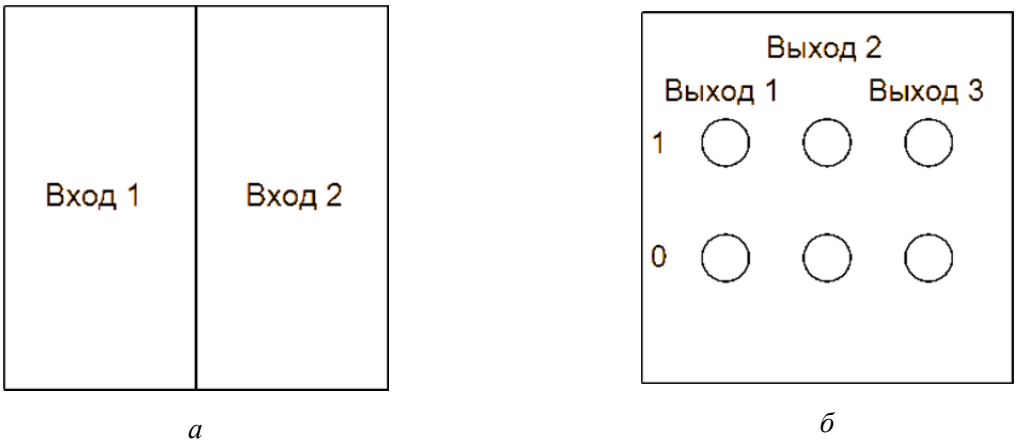
Таблица 1. Результаты логических операций

Вход 1	Вход 2	Выход 1	Выход 2	Выход 3
0	0	0	0	0
0	1	1	0	0
1	0	0	0	1
1	1	0	1	1

Данный прибор называется делителем потому что вход 1 (будем называть его управляющим входом) задает к какому из выходов (1 или 2) будет направляться энергия из входа 2 (будем называть его входом данных), при этом сам управляющий вход дублируется в выход 3.

Вся входная область будет поделена на 2 сектора: вход 1 и вход 2. Если вход 1 равен «0», то данный сектор будет затемнен, а если наоборот вход 1 равен «1», то такой сектор будет пропускать все излучение, аналогично с входом 2.

В выходной области будет 3 зоны, каждая отвечающая за свой выход. Будем считать, что на соответствующем выходе задается логическая «1», если суммарная энергия в заданной области выше некоторого определенного порога p. Если энергия ниже порога, то будем полагать, что на выходе получен логический «0».

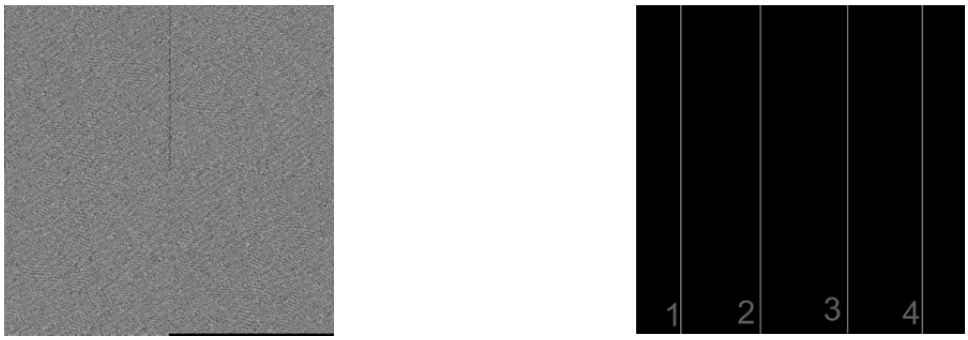


а *б*

Рис. 1. Пример расположения секторов в ДОЭ: *а* — вход системы; *б* — выход системы

Результаты моделирования

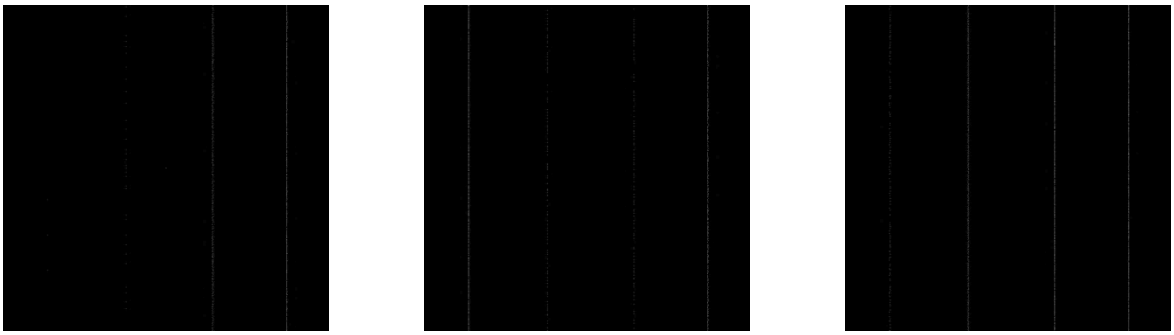
Используя комбинированные ДОЭ состоящие из нескольких участков можно довольно легко подобрать любые сочетания входов и выходов. Так задача с двумя входами и тремя выходами легко решается путем деления каждого входа всего на два ДОЭ и введение дополнительного четвертого выхода, куда будет отбрасываться «лишняя» энергия. На рис. 2 приведен ДОЭ, который решает эту задачу.



а *б*

Рис. 2. ДОЭ для формирования распределений интенсивности согласно табл. 1:
а — вход системы; *б* — выход системы

Левая половина ДОЭ это вход один, правая половина ДОЭ — вход два. На рис. 3 приведены распределения интенсивности в зависимости от освещения левой или правой части, а также обеих частей вместе.



а *б* *в*

Рис. 3. Результат моделирования дифракции света на элементе с фазовой функцией, представленной на рис. 2, *а*: *а* — 001; *б* — 100; *в* — 011

В табл. 2 приведены относительные энергии порядков.

Таблица 2. Энергии порядков по разметке на рис. 3

Входы	Выходы	1	2	3
10	001	0,316	0,301	1
01	100	1	0,299	0,295
11	011	0,563	0,87	1

Заключение

В настоящей статье была рассмотрена возможность создания оптических элементов для реализации логических операций в свободном пространстве, а также приведены результаты моделирования таких элементов. Моделирование показало, что значения энергии, соответствующие нулям и единицам, различаются в достаточной степени сильно, чтобы можно было разделить их экспериментально.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

Список источников

[1] *Qian C. et al.* Performing optical logic operations by a diffractive neural network // Light: Science & Applications. 2020. Vol. 9. No. 1. 59 p.

Optical elements for implementing logical operations in free space

D.M. Sorokin, L.L. Doskolovich, R.V. Skidanov

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

This paper examines the possibility of performing the simplest logical operations using diffractive optical elements (DOEs). These DOEs will be able to perform the simplest operations, such as a logic gate. Such logic gates can be combined to create more complex systems.

Keywords: *optics, logical operations, diffractive optical elements, logical gates*

Оптические линии задержки на основе дифракционных оптических элементов

С.С. Подтихова, Р.В. Скиданов, Г.В. Успленьев

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

Представлена система из ДОЭ для осуществления управляемой временной задержки светового сигнала. Рассмотрены различные варианты с разным количеством пучков и разным пространственным расположением. Представлены результаты экспериментов.

Ключевые слова: *оптика, оптические линии задержки, дифракционные оптические элементы*

Введение

Развитие оптических аналоговых вычислительных систем породило потребность в многочисленных компонентах для управления оптическим сигналом. Одним из таких компонентов являются оптические линии задержки. Оптические линии задержки представляют собой устройства для задержки светового сигнала на определенный промежуток времени. Управляемая задержка может осуществляться с помощью двух дифракционных оптических элементов: делителя пучка и дифракционной решеткой с переменным периодом.

Создание многоканальных оптических линий задержки с возможностью компенсации искажений амплитуд и фаз задержанных сигналов

Самым простым методом многоканальной задержки светового сигнала является двух элементная схема, представленная на рис. 1.

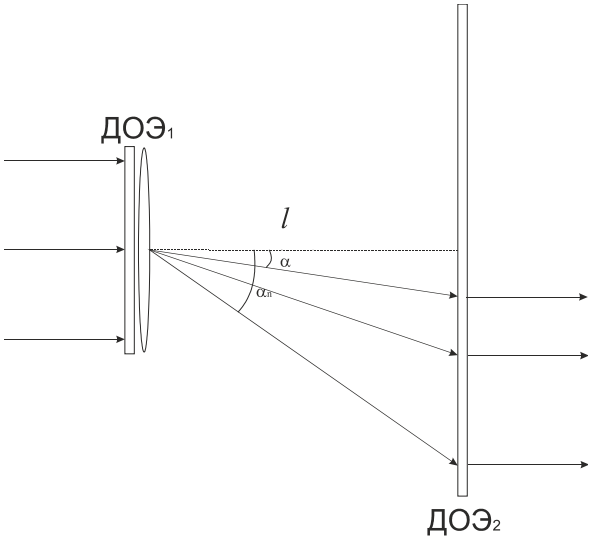


Рис. 1. Оптическая схема для многоканальной задержки

Первый ДОЭ представляет собой делитель пучка, в котором углы отклонения порядков задаются следующими формулами:

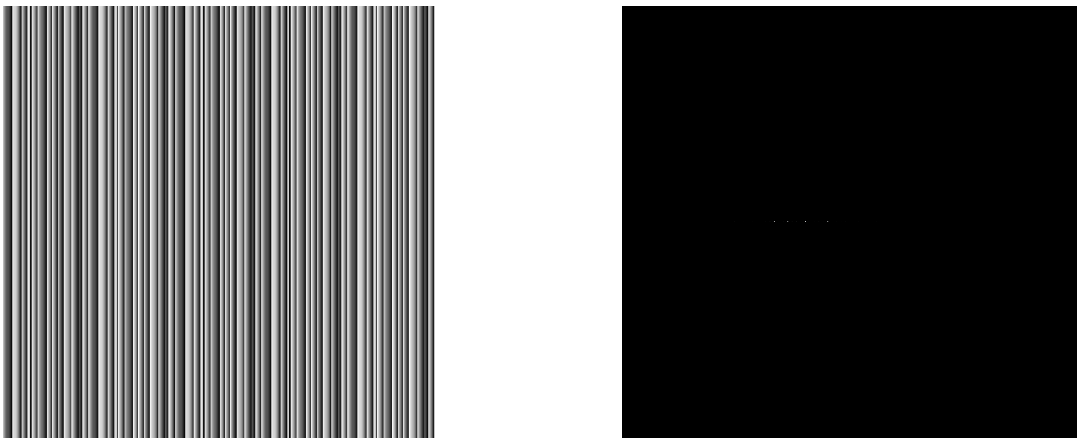
$$\alpha_n = \arccos \frac{cos(\alpha)}{n-(n-1)cos(\alpha)}, \quad (1)$$

где α — угол на котором достигается минимальная задержка Δt, α_n — угол, на котором задержка составляет nΔt. Минимальный угол α определяется формулой:

$$\alpha = \arccos \frac{l}{l+\Delta l}, \quad (2)$$

где Δl — разница между наклонным и прямым лучом, обеспечивающая задержку $\Delta t = \Delta l/c$, где c — скорость света.

На рис. 2, а представлена фазовая функция ДОЭ для формирования 4 порядков под углами, соответствующими (1). На рис. 2, б представлено формируемое в дальней зоне распределение интенсивности.



а *б*

Рис. 2. Фазовая функция ДОЭ для формирования четырех порядков под углами, обеспечивающими эквидистантную по времени задержку

Второй ДОЭ представляет собой набор дифракционных решеток, которые по периоду подбираются таким образом, чтобы представленные на рис. 2, *б* порядки распространялись вдоль оптической оси. Фазовая функция такого элемента представлена на рис. 3.

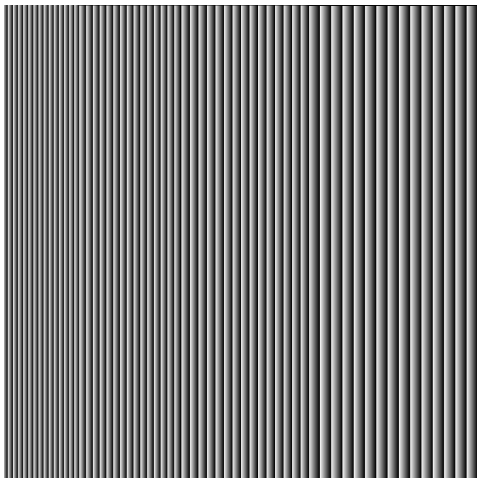


Рис. 3. ДОЭ для выпрямления распространения порядков на рис. 2, *б*

Недостатком представленного метода является то, что при большом количестве выходных каналов углы с большими значениями номера канала становятся расположенными слишком близко друг к другу. Это хорошо видно даже для четырех каналов. В табл. 1 приведены численные результаты расчета для системы с конкретными параметрами для шага 10^{-11} с и $l = 20$ мм, и максимальным $n = 8$.

Основные параметры каналов задержки

Δt (с)	**n**	**α_n (°)**	**x (мм)**
10^{-11}	1	9,86	3,42
$2 \cdot 10^{-11}$	2	13,86	4,79
$3 \cdot 10^{-11}$	3	16,87	5,80
$4 \cdot 10^{-11}$	4	19,36	6,63
$5 \cdot 10^{-11}$	5	21,52	7,33
$6 \cdot 10^{-11}$	6	23,44	7,95
$7 \cdot 10^{-11}$	7	25,17	8,51
$8 \cdot 10^{-11}$	8	26,76	9,00

Как видно из таблицы, расстояние между соседними порядками постоянно уменьшается и уже между 7 и 8 порядками составляет всего 0,5 мм, что уже явно недостаточно для технического разделения сигналов. Решается эта проблема за счет увеличения расстояния l. Чем больше потребуется выходных каналов, тем габаритнее будет система задержки.

Заключение

Для реализации многоканальной задержки предложена оптическая система из делителя пучка и дифракционной треугольной решетки с переменным периодом. Такая система позволяет в относительно небольших габаритах (порядка десятков мм), реализовать временную задержку с шагом 10^{-11} с.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

Список источников

[1] *Сойфер В.А., Котляр В.В., Досколович Л.Л.* Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 4. С. 352–368.

[2] *Скиданов Р.В., Ганчевская С.В.* Дифракционные оптические элементы для формирования комбинаций вихревых пучков в задаче манипулирования микрообъектами // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 1. С. 65–71.

Optical delay lines based on diffraction optical elements

S.S. Podtikhova, R.V. Skidanov, G.V. Uspleniev

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

A DOE system for implementing a controlled time delay of a light signal is presented. Various variants with different number of bundles and different spatial arrangement are considered. Experimental results are presented.

Keywords: *optics, optical delay lines, diffraction optical elements*

Определение угловых координат точечного светящегося объекта с использованием дифракционных оптических элементов

А.Е. Морозов, Р.В. Скиданов, А.С. Пронин, Д.М. Сорокин, Ю.В. Ханенко, С.А. Фомченков, К.В. Овчинников

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

Рассмотрен метод быстрого определения угловых координат, основанный на использовании дифракционных оптических элементов, формирующих радиальное распределение интенсивности вида $|arctg(\rho)|$. *Представлены результаты моделирования и эксперимента. Показана возможность определения угловых координат с погрешностью около 0,01°.*

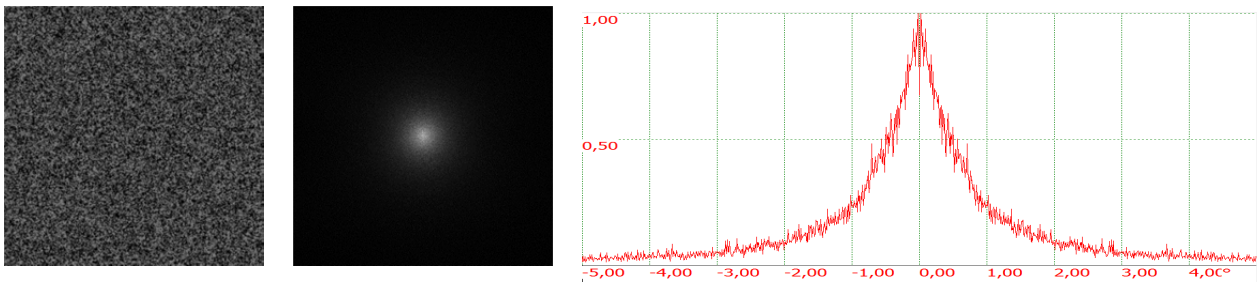
Ключевые слова: *оптическая система, радиальное распределение интенсивности, дифракционные оптические элементы*

Введение

В работе представлены результаты расчетов и моделирования бинарного ДОЭ для формирования заданного распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы. Ввиду трудности получения идеально гладкого распределения интенсивности в одномерном случае, разделение определения координат на два канала не имеет смысла. Поэтому, было принято решение формировать распределение интенсивности с переменным градиентом радиально симметричного вида с радиальным сечением, в котором интенсивность пропорциональна функции arctg(r), где r — радиус от центра распределения.

Расчет и изготовление бинарного ДОЭ для определения двух координат одновременно

На рис. 1 приведены внешний вид ДОЭ, распределение интенсивности и сечение распределения интенсивности, сформированное в фокальной плоскости.



а *б* *в*

Рис. 1. Параметры бинарного ДОЭ: *а* — фазовая функция ДОЭ; *б* — распределение интенсивности; *в* — сечение распределения интенсивности

Колебание распределения интенсивности в сечении, полностью детерминированы и являются уникальным распределение для каждой точки изображения. Для измерения обеих углов одновременно используются две линейки фотодиодов S4111-16R, установленных взаимно перпендикулярно. Таким образом, формируется полностью уникальное сочетание набора из 8 чисел, которому однозначно сопоставляется значения двух угловых координат. В таблице приведены некоторые сочетания значений тока при регистрации под определенными углами.

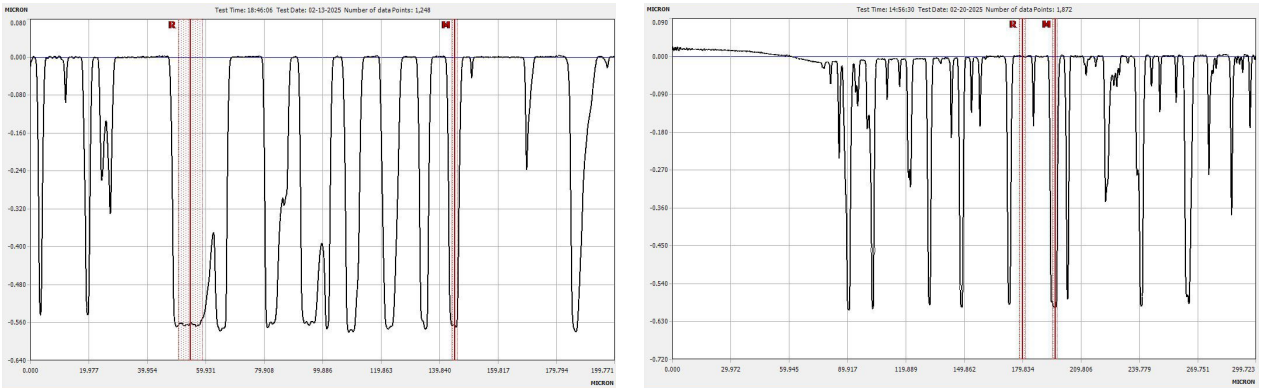
Значения токов на фотодиодах соответствующие определенным углам α и β

I_1(нА)	I_2(нА)	I_3(нА)	I_4(нА)	I_5(нА)	I_6(нА)	I_7(нА)	I_8(нА)	α	β
0,3	0,6	0,7	0,8	0,2	1,1	0,7	0,9	–4,82	1,21
0,2	0,4	0,8	0,5	0,3	0,8	0,9	0,5	–4,83	1,22
2,9	3,1	3,2	3,8	2,4	1,6	1,8	1,2	2,37	3,81
2,8	3,2	3,1	3,7	2,4	1,7	1,9	1,1	2,36	3,82
21,3	21,6	22,1	23,2	46,8	39,1	37,2	37,9	0,511	0,204
21,2	21,5	22,4	23,0	46,7	39,3	37,1	38,1	0,514	0,207

Как видно из табл. 1 даже небольшие изменения углов приводят к изменению набора чисел — значений тока на фотодиодах. В дальнейшем такой набор чисел будем называть вектором токов.

Таким образом, первоначально строится таблица таких векторов для всех углов от –5° до 5° с шагом 0,003°. Размерность такой таблицы относительно невелика 3333×3333 вектора. Причем для нахождения конкретных значений угловых координат нет необходимости просматривать всю таблицу: на основе средних значений тока и градиента этих значений довольно просто локализовать небольшую часть этой таблицы, в которой уже и определяется точное значение угла. Причем в области повышенного градиента интенсивности возле оптической оси участок локализации будет меньше чем в пограничных областях. Как видно из табл. 1 в пограничных областях действительно трудно определять градиент интенсивности, поскольку высокочастотные колебания интенсивности сопоставимы с абсолютным ее значением.

Бинарные ДОЭ изготавливались по двухстадийной технологии: прямая лазерная запись по пленкам хрома и плазмохимическое травление по сформированной маске. Контроль сформированного микрорельефа осуществлялся на профилометре. На рис. 2 представлены профилограммы элементов для формирования радиально симметричного распределения и распределения с зависимостью от полярного угла соответственно.



а *б*

Рис. 2. Профилограммы элементов: *а* — для формирования радиально симметричного распределения; *б* — для распределения с зависимостью от полярного угла

Заключение

В настоящей статье были рассчитаны бинарные ДОЭ для формирования заданного распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы. Были рассмотрены принципы работы данных ДОЭ, а также приведены этапы их производства.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

Determination of angular coordinates of a point luminous object using diffraction optical elements

A.E. Morozov, R.V. Skidanov, A.S. Pronin, D.M. Sorokin, Yu.V. Khanenko, S.A. Fomchenkov, K.V. Ovchinnikov

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

A method for the rapid determination of angular coordinates based on the use of diffractive optical elements forming a radial intensity distribution of the form $|arctg(\rho)|$ *is considered. The results of modeling and experiment are presented. The possibility of determining angular coordinates with an error of about 0.01° is shown.*

Keywords: *optical system, radial intensity distribution, diffraction optical elements*

Современные аддитивные технологии в оптике

Г.И. Грейсух[1], И.А. Левин[2], Е.Г. Ежов[1]

[1] *Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия*
[2] *ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», Красногорск, Россия*

В настоящем докладе представлен краткий обзор современных аддитивных технологий, используемых для производства рефракционных оптических элементов со сферическими и асферическими поверхностями, а также с градиентом показателя преломления. Наиболее продвинутыми из них сегодня являются химическое осаждение из газовой фазы и 3D-струйная печать с использованием нанокомпозитных материалов, получивших название «оптических чернил». Двухкомпонентной линейной модели, на которой могут успешно базироваться методики проектирования объективов с градиентными элементами, неоднородные материалы которых изготавливаются вышеперечисленными технологиями, уделено основное внимание в настоящем докладе.

Ключевые слова: *аддитивные технологии, химическое осаждение из газовой фазы, 3D-струйная печать, радиально-градиентная линза, двухкомпонентная линейная модель неоднородного оптического материала*

Введение

Напомним, что аддитивный технологический процесс — это процесс изготовления физических объектов, который предполагает создание объекта по его электронной модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающей (субтрактивной) технологии механической обработки, включая алмазное точение, и традиционных формообразующих технологий, таких, как прецизионное литье или штамповка. Наиболее продвинутыми из аддитивных технологий сегодня являются химическое осаждение из газовой фазы (англ. Chemical Vapor Deposition, CVD-метод) [1] и 3D-струйная печать с использованием нанокомпозитных материалов, получивших название «оптических чернил» [2].

С помощью CVD-процесса производят материалы различных структур: монокристаллы, поликристаллы и аморфные тела. Например, методом CVD успешно выращиваются такие кристаллические материалы, как сульфид цинка (ZnS) и селенид цинка (ZnSe) или аморфные халькогенидные стекла для видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов оптического излучения.

Создание пригодных для 3D-струйной печати оптических чернил, различающихся концентрацией мономеров и нескольких нанонаполнителей, в сочетании с усовершенствованной технологией самой струйной печати открыло новые перспективы для градиентной оптики, сняло целый ряд ранее неустранимых ограничений и позволило независимо управлять градиентом показателя преломления и дисперсией формируемых неоднородных оптических материалов [3]. Сами нанокомпозитные чернила изготавливают путем внедрения в заданной концентрации в смесь фотоотверждающихся мономеров с низкой вязкостью одной или нескольких органических или неорганических наночастиц. Каждая наночастица имеет размер менее 10 нм, что составляет примерно 1/30 от самой короткой длины волны света, проходящего через оптическое устройство, и химически покрыта для устранения агломерации, так что рассеяние Рэлея и Ми незначительно [4]. Кроме того, чернила обладают реологическими свойствами, необходимыми для точной печати [5].

Технологии изготовления в методиках проектирования объективов с градиентными элементами

Технология изготовления неоднородного материала в наибольшей степени определяет оптические характеристики градиентных оптических элементов. Поэтому ориентация методики проектирования оптической системы с градиентными элементами и, в частности, с радиально-градиентными линзами (РГЛ) на ту или иную технологию неизбежна. Так, в частности, методики, опубликованные в работах [6, 7], ориентированы на технологию, предполагающую аксиальное ламинирование слоев из специально подбираемых халькогенидных стекол.

Общим практически для всех аддитивных технологий является то, что получаемый при их использовании неоднородный материал может успешно моделироваться так называемой двухкомпонентной линейной моделью. Отсюда следует возможность разработки единой методики проектирования оптических систем с градиентными элементами, изготавливаемыми по аддитивным технологиям.

Простая двухкомпонентная линейная модель неоднородного композитного оптического материала предложена в работах [2, 8, 9]. В ее рамках показатель преломления композитного материала описывается как линейная комбинация показателей преломления его компонентов:

$$n(\lambda)=C_1 n_1(\lambda)+C_2 n_2(\lambda), \tag{1}$$

где $n(\lambda)$ — показатель преломления композитного материала, $n_1(\lambda)$ и $n_2(\lambda)$ — показатели преломления первого и второго компонентов соответственно; C_1 и C_2 — доли первого и второго компонентов, такие, что

$$C_1 + C_2 = 1. \tag{2}$$

Величину C_i можно принять за объемную долю компонента i или считать относительной концентрацией компонента i.

Ниже покажем, как в рамках двухкомпонентной модели коэффициенты радиального градиента РГЛ могут быть выражены через концентрации компонентов композитного материала. Для исключения путаницы в обозначениях, следуя работе [10], закон изменения показателя преломления РГЛ запишем в виде

$$N(\rho,\lambda) = N_{00}(\lambda) + N_{10}(\lambda)\rho^2 + N_{20}(\lambda)\rho^4 + N_{30}(\lambda)\rho^6 + \ldots. \tag{3}$$

По форме такими же рядами можно описать распределения концентраций. И, в частности,

$$C_2(\rho) = C_{00} + C_{10}\rho^2 + C_{20}\rho^4 + C_{30}\rho^6 + \ldots. \tag{4}$$

Так как уравнение (1) с учетом (2) может быть переписано в виде

$$N(\rho,\lambda) = n_1(\lambda) + C_2(\rho)\left(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)\right), \tag{5}$$

то, комбинируя уравнения (3)–(5), можно получить следующие соотношения для коэффициентов полинома распределения показателя преломления:

$$\left.\begin{aligned} N_{i0}(\lambda) &= \left(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)\right)C_{i0} + n_1(\lambda),\ i = 0 \\ N_{i0}(\lambda) &= \left(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)\right)C_{i0},\ i \neq 0 \end{aligned}\right\}. \tag{6}$$

Линейная модель композитного материала является наиболее простой и дает удовлетворительный результат практически во всех случаях, поэтому она наиболее часто используется как для демонстрации хроматических свойств отдельных элементов, так и при расчете оптических систем с такими элементами [8, 9].

Принципиальным преимуществом аддитивной технологии по сравнению с технологией ламинирования является то, что для получения заданного градиента показателя преломления не требуется такой ряд оптических материалов, у которых показатели преломления двух соседних материалов отличаются лишь незначительно. Действительно, в случае аддитивной технологии значения показателя преломления на оси элемента и на его периферии однозначно определяются материалами первого и второго компонентов неоднородной среды. При этом форма кривой, соединяющей два крайних значения показателя преломления, легко управляется коэффициентами ряда, описывающего распределение концентрации одного из этих материалов. В результате методики проектирования оптических систем с градиентными элементами, получаемыми по аддитивным технологиям, оперируют более широкими интервалами допустимых значений коррекционных параметров этих элементов.

Заключение

В настоящем докладе представлен краткий обзор и анализ наиболее продвинутых на сегодня аддитивных технологий, использующихся для изготовления оптических элементов и, прежде всего, РГЛ. К этим технологиям, в частности, относятся химическое осаждение из газовой фазы и 3D-струйная печать с использованием нанокомпозитных материалов, получивших название «оптических чернил». Отмечено, что общим практически для всех аддитивных технологий является то, что получаемый при их использовании неоднородный материал может успешно моделироваться так называемой двухкомпонентной линейной моделью. Показано, как в рамках двухкомпонентной модели коэффициенты радиального градиента РГЛ могут быть выражены через концентрации компонентов композитного материала. Обращено внимание на основное преимущество аддитивной технологии по сравнению с технологией ламинирования, которым является то, что для получения заданного градиента показателя преломления не требуется такой ряд оптических материалов, у ко-

торого показатели преломления двух соседних материалов ряда отличаются лишь незначительно. Это обусловлено тем, что в случае аддитивной технологии значения показателя преломления на оси элемента и на его периферии однозначно определяются материалами первого и второго компонентов неоднородной среды. При этом форма кривой, соединяющей два крайних значения показателя преломления, легко управляется коэффициентами ряда, описывающего распределение концентрации одного из этих материалов. В результате методики проектирования оптических систем с градиентными элементами, получаемыми по аддитивным технологиям, оперируют более широкими интервалами допустимых значений коррекционных параметров этих элементов.

Благодарность

Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета РФ на реализацию государственного задания Минобрнауки РФ № FSGS-2024-0005.

Список источников

[1] *Corsetti J.A.* Design of ZnS/ZnSe gradient-index lenses in the mid-wave infrared and design, fabrication, and thermal metrology of polymer radial gradient-index lenses: Ph. D. Diss. Rochester, 2017. 216 p.

[2] *Williams G.M., Harmon J.P.* Dispersion controlled nanocomposite gradient index lenses // Optics Continuum. 2023. Vol. 2, No. 2. P. 456–472.

[3] *Williams G.M.*, Harmon J.P.* Dispersion controlled nanocomposite gradient index lenses // Optics Continuum. 2003. Vol. 2, No. 2. Art. no. 457. https://doi.org/10.1364/OPTCON.481205

[4] *Williams G.M., Akhavan H., Dupuy C., Harmon P.* Additive Manufacturing of Freeform Optics for Defense Applications // IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID). 2021. P. 1–2.

[5] *Liu Y.F., Tsai M.H., Pai Y.F., Hwang W.S.* Control of droplet formation by operating waveform for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing // Appl. Phys. A. 2013. Vol. 111 (2). P. 509–516.

[6] *Грейсух Г.И., Левин И.А., Казин С.В.* Ламинированная радиально-градиентная элементная база тепловизионной оптики // Холоэкспо 2024: XXI Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 9–14.

[7] *Грейсух Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г.* Моделирование ламинированной радиально-градиентной линзы; расчет и достижимые характеристики двухдиапазонного инфракрасного триплета с такой линзой // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 34–42. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-34-42

[8] *McCarthy P.W.* Gradient-index materials, design, and metrology for broadband imaging systems: Ph. D. Diss. Rochester, 2015. 219 p.

[9] *Yang T., Lippman D.H., Chou R.Y., Kochan N.S., Desai A.X., Schmidt G.R., Bentley J.L., Moore D.T.* Material optimization in the design of broadband gradient-index optics // Proceedings of SPIE, International Optical Design Conference. 2013. Vol. 12078. Art. no. 120780Z. https://doi.org/10.1117/12.2603644

[10] *Gibson D., Bayya S., Nuygen V. et al.* GRIN optics for multispectral infrared imaging // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9451. https://doi.org/10.1117/ 12.2177136

Modern additive technologies in optics

G.I. Greisukh[1], I.A. Levin[2], E.G. Ezhov[1]

[1] *Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia*
[2] *Krasnogorsk Plant named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Moscow region, Russia*

This report provides a brief overview of modern additive technologies used for the production of refractive optical elements with spherical and aspherical surfaces, as well as with a gradient refractive index. The most advanced of these today are chemical vapor deposition and 3D inkjet printing using nanocomposite materials called "optical ink". This report focuses on a two-component linear model, which can be successfully used to design objectives with gradient index elements, the inhomogeneous materials of which are produced by the above technologies.

Keywords: *additive technologies, chemical vapor deposition, 3D inkjet printing, radial gradient index lens, two-component linear model of inhomogeneous optical material*

Метод создания фазовых голограмм через предварительно итеративно вычисляемые функции модуляции для эффективного структурирования света

А.А. Ревякин[1, 2], М.Д. Гервазиев[1, 2], Д.С. Харенко[1, 2]

[1] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[2] *Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*

Представлен метод эффективной генерации структурированного излучения с использованием пространственного фазового модулятора света в геометрии с одним отражением. Компьютерные голограммы рассчитываются напрямую через итеративно построенную функцию модуляции. Экспериментальные результаты по генерации мод Лагерра — Гаусса в оптической 4f-схеме показывают, что предложенный метод обеспечивает точность структурирования поля не хуже, чем при использовании аналитического построения, демонстрируя втрое большую эффективность, достигающую 15 % для первых шести мод. Дополнительным плюсом является возможность исключения отдельных порядков дифракции, что позволяет нивелировать эффект алиасинга и мультиплексировать большое число корреляционных откликов при модовой декомпозиции.

Ключевые слова: *компьютерная голография, дифракционные оптические элементы, структурированное излучение*

Получение оптических пучков с заданными пространственными, поляризационными, временными свойствами является важной задачей прикладной оптики, поскольку позволяет контролируемо воздействовать на исследуемые объекты (оптическое волокно или поверхность материала) для изучения их свойств или модификации [1]. В данной работе сделан акцент на пространственное структурирование, то есть изменение поперечной пространственной структуры исходного лазерного пучка. Модуляция излучения может быть осуществлена с помощью пространственных модуляторов света (ПМС) на основе жидких кристаллов. Однако такие приборы обычно обеспечивают лишь фазовую модуляцию исходного излучения. Это делает актуальным поиск подходов, которые в данном случае обеспечивают произвольную амплитудно-фазовую модуляцию исходного поля.

Для этого используется оптическая 4f-схема, приведенная на рис. 1. Фазовая маска H, записанная на экран ПМС, связывается с желаемой амплитудно-фазовой модуляцией $ae^{i\varphi}$ исходного пучка U_0 через функцию модуляции ψ (ФМ): $\psi(a(x,y),\varphi(x,y)) = H(x,y)$.

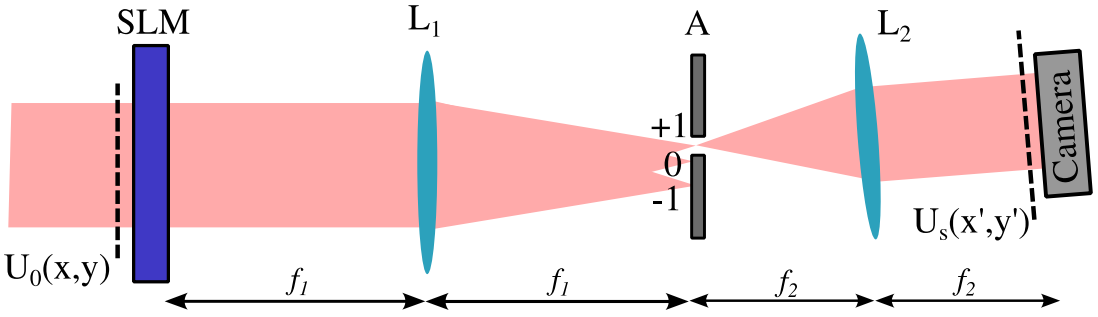


Рис. 1. Схема для формирования структурированного излучения

На ее ряд Фурье $e^{i\psi(a,\varphi)} = \sum_q C_q(a)e^{iq\varphi}$ накладывается условие кодирования сигнала $C_1(a) = a$. При записи в голограмме модуляции с несущей $ae^{i\varphi}e^{iKx}$, слагаемые ряда разделяются в задней фокальной плоскости линзы L1, образуя набор дифракционных максимумов. При выделении апертурой A первого максимума (Фурье-образ модуляции $ae^{i\varphi}$) поле в задней фокальной плоскости линзы L2 будет иметь желаемый вид $U_s = U_0 ae^{i\varphi}$ [2].

Предложенная итеративная процедура построения ФМ похожа на метод поочередного проецирования [3]. Она состоит в поочередном применении двух операций к произвольной комплексной функции: деление на модуль и замена первого коэффициента в ряде Фурье на $C_1(a) = a$. Это позволяет легко находить ФМ, соответствующие условию кодирования сигнала. При этом одновременно возможно подавление выбранных дифракционных максимумов за счет наложения дополнительных условий вида $C_q(a) = 0$ в процессе итераций, где q соответствует выбранным максимумам. Для экспериментальной проверки полученной ФМ на выходе установки были сформированы распределения полей (рис. 2), соответствующие нескольким первым модам Лагерра — Гаусса (LG).

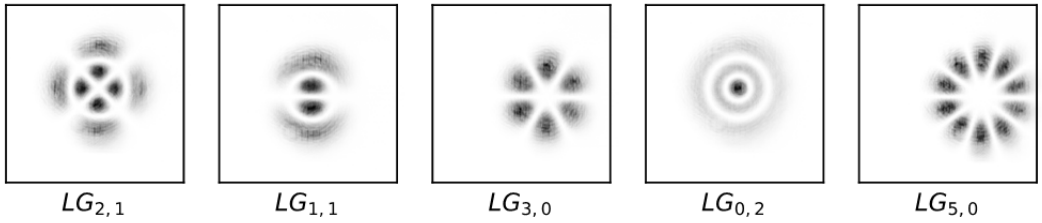


Рис. 2. Распределения интенсивности структурированного лазерного пучка

Для них были измерены эффективность структурирования (доля мощности исходного пучка на выходе установки P_{out}/P_{in}) и уровень искажений (отличие от строгой корреляции между распределениями интенсивности) при использовании предложенной ФМ и ФМ Якоби — Ангера (рис. 3). Результаты свидетельствуют об увеличении эффективности в 3 раза при том же уровне искажений ≈3 %.

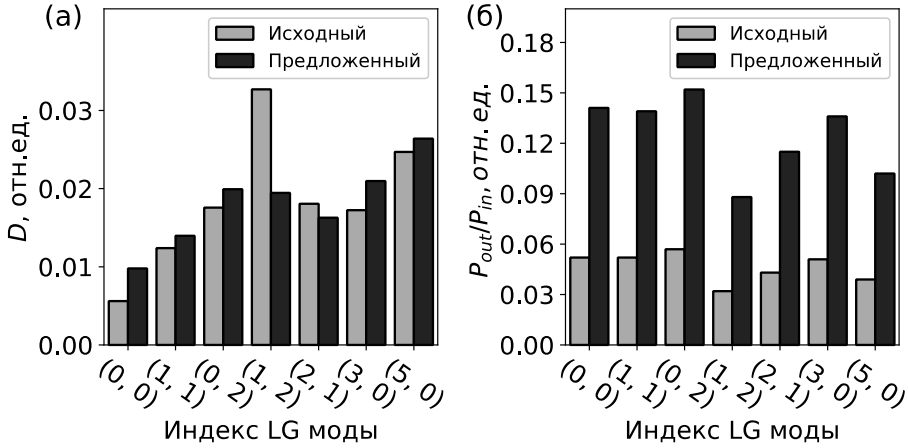


Рис. 3. Уровень искажений (а) и эффективность структурирования (б)

В работе предложена итеративная процедура для построения ФМ. Полученная ФМ обеспечивает увеличенную эффективность преобразования излучения при низком уровне искажений. Это позволяет рассчитывать корреляционные фильтры, в том числе, для более точной модовой декомпозиции с мультиплексированием корреляционных откликов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант №21-72-30024-П.

Список источников

[1] *Forbes A., Dudley A., McLaren M.* Creation and detection of optical modes with spatial light modulators // Advances in optics and photonics. 2016. Vol. 8. № 2. P. 200–227.

[2] *Arrizon V., Ruiz U., Carrada R., Gonzalez L.* Pixelated phase computer holograms for the accurate encoding of scalar complex fields // Journal of the Optical Society of America A. 2007. Vol. 24. № 11. P. 3500–3507.

[3] *Bauschke H., Borwein J.* On projection algorithms for solving convex feasibility problems // SIAM review. 1996. Vol. 38. № 3. P. 367–426.

Method for phase hologram creation using a iteratively precomputed modulation function for an effective light structuring

A.A. Revyakin[1, 2], M.D. Gervaziev[1, 2], D.S. Kharenko[1, 2]

[1] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*
[2] *Institute of Automation and Electrometry of the Siberian branch of the Russian Academy of sciences, Novosibirsk, Russia*

We present a method for efficient light structuring using a spatial phase light modulator in single-reflection geometry. Computer holograms are calculated directly via an iteratively constructed modulation function. Experimental results on the generation of Laguerre — Gauss modes in an optical 4f scheme show that the proposed method provides field structuring accuracy no worse than that using analytical construction, demonstrating three times greater efficiency, reaching 15 % for the first six modes. An additional advantage is the possibility of eliminating individual diffraction orders, which allows leveling the aliasing effect and multiplexing a large number of correlation spots during mode decomposition.

Keywords: *computer-generated holography, diffraction optical elements, light structuring*

Дифракционная эффективность двухслойных двухрельефных микроструктур при перепаде температур

Г.И. Грейсух, А.И. Антонов

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

В докладе предложен подход, позволяющий осуществлять расчет дифракционной эффективности (ДЭ) дифракционных оптических элементов с двухслойной микроструктурой и двумя внутренними пилообразными рельефами в рамках строгой электромагнитной теории дифракции. В соответствии с этим подходом определенным образом суммируются ДЭ всех зон микроструктуры. Он учитывает нормированную площадь каждой зоны двухслойной микроструктуры дифракционной линзы, температурные зависимости глубин обоих рельефов и их показателей преломления. Кроме того, учитывается локальное взаимное смещение слоев микроструктуры из-за разницы коэффициентов теплового расширения их материалов. Показано, в частности, что из-за перепада температуры эксплуатации (от –40 °С до +60 °С) ДЭ падает не более чем на 7 % во всем рабочем спектральном диапазоне (3,5–5,2 мкм; 7,5–11,4 мкм) и допустимом интервале углов (от –14° до +14°) падения излучения на микроструктуру.

Ключевые слова: *дифракционный оптический элемент, двухслойная микроструктура с двумя внутренними пилообразными рельефами, дифракционная эффективность, строгий анализ связанных волн, температурное расширение, термооптические постоянные*

Введение

Известно, что с целью минимизации зависимости ДЭ от длины волны и угла падения излучения микроструктуру дифракционных оптических элементов (ДОЭ) выполняют двухслойной и, в частности, с двумя внутренними пилообразными рельефами, как это показано на рис. 1. При этом рельефы выполняются в материальных подложках со значительно отличающимися коэффициентами дисперсии [1].

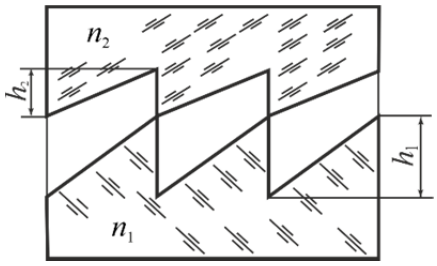


Рис. 1. Двухслойная пилообразная дифракционная микроструктура с двумя внутренними рельефами: n_1 и n_2 — показатели преломления материалов, h_1 и h_2 — глубины рельефов

Дополнительной проблемой, связанной с ДОЭ ИК-объективов, рассчитанных на значительные перепады температур эксплуатации, может оказаться температурная зависимость ДЭ этого элемента из-за изменения геометрических и электродинамических параметров — диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов слоев микроструктуры. Снижение ДЭ в рабочем дифракционном порядке приводит к возникновению цветного ореола (гало), сопровождающего наиболее яркие фрагменты изображения, формируемого оптической системой в полихроматическом излучении [2]. Это определяет актуальность достоверной оценки влияния перепадов температур на ДЭ двухслойных микроструктур, базирующейся на строгой электромагнитной теории дифракции, например в рамках строгого анализа связанных волн (rigorous coupled-wave analysis, RCWA) [3–5].

В связи с вышеизложенным целью настоящего доклада является представление результатов исследования, проведенного в рамках строгого анализа связанных волн и комплексно учитывающего все факторы, приводящие к падению ДЭ ДОЭ с двухслойной двухрельефной пилообразной микроструктурой при изменении ее температуры.

Подход к расчету ДЭ ДОЭ через эффективность каждой зоны микроструктуры

В рамках RCWA модели микроструктур ДОЭ отличаются только формулами для расчета коэффициентов Фурье ряда в разложении диэлектрической проницаемости каждой тонкой плиты [6, 7]. Для аксиально симметричного ДОЭ в качестве анализируемой структуры можно взять двумерный

радиальный срез (см. рис. 2). Указанные коэффициенты Фурье для одной тонкой плиты в разбиении двумерной структуры с периодичностью только в одном направлении рассчитываются как

$$\tilde{\varepsilon}_g = \frac{1}{\Lambda}\int_0^{\Lambda} f_\varepsilon(x) e^{-jgKx} dx, \tag{1}$$

где Λ — период структуры, $f_\varepsilon(x)$ — функция распределения диэлектрической проницаемости внутри тонкой плиты, $j = (-1)^{1/2}$, g — номер гармоники коэффициента Фурье, $K = 2\pi/\Lambda$.

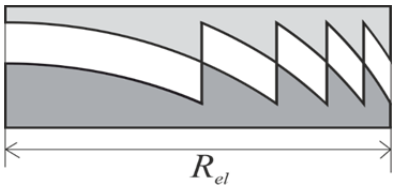


Рис. 2. Пример радиального двумерного среза ДОЭ. R_{el} — полный радиус ДОЭ

Необходимость расчета ДЭ всей кольцевой микроструктуры ДОЭ в целом, а не ее отдельных зон, в задаче определения температурной зависимости объясняется тем, что изменение геометрических размеров пилообразных слоев при изменении температуры происходит неодинаково: материалы, из которых изготовлены данные пилообразные слои, имеют различные коэффициенты линейного расширения. В результате периоды (ширины зон) при температурах, отличных от расчетной t_0, не совпадают своими краям (см. рис. 3).

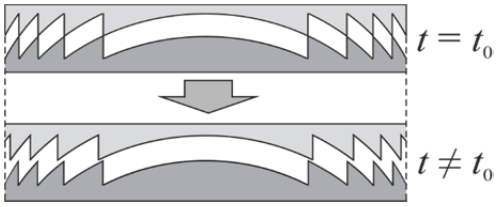


Рис. 3. Демонстрация сдвига краев зон двухслойных ДОЭ при изменении температуры

Принципиальной особенностью RCWA-анализ является то, что он разработан для строго периодичных структуры. Энергия электромагнитного излучения, прошедшего через такую структуру, перераспределяется, и формируется рабочий порядок дифракции с наибольшей энергией. С учетом этого предложенный подход включает расчет ДЭ ДОЭ в целом через ДЭ каждой зоны в отдельности с учетом локального взаимного смещения слоев микроструктуры. При этом полагается, что каждая зона с двумя смещенными слоями является периодом собственной бесконечной дифракционной решетки, ДЭ которой легко и достоверно позволяет получить RCWA. Но в этом случае каждая зона должна представляет собой прямоугольную щель конечной ширины и бесконечной длины. Очевидно, что такие зоны формируют микроструктуру дифракционной цилиндрической линзы, а не вращательно симметричного ДОЭ типа зонной пластинки Френеля, исследованию которого посвящен настоящий доклад. Однако если учесть, что ДЭ определяется не формой зон, а фазовым набегом в пределах одной зоны, то становится ясно, что предложенный подход универсален в том смысле, что одинаково применим как к микроструктурам цилиндрических линз, так и к кольцевым микроструктурам.

В таком случае ДЭ ДОЭ в целом может быть вычислена по формуле

$$DE_{el} = \sum_{b=1}^{B} \left(Q_b DE_b\right), \tag{2}$$

где B — количество зон в микроструктуре ДОЭ; DE_b — ДЭ дифракционной решетки с периодом, равным ширине соответствующей зоны; $Q_b = S_b/S_{DOE}$ — весовой коэффициент, равный нормированной площади этой зоны. Здесь целесообразно напомнить, что площади всех зон классической зонной пластинки Френеля равны, и для нее $Q_b = 1/B$.

Температурная зависимость ДЭ микроструктуры SRF2/GERMANIUM

Предложенный подход к определению зависимости ДЭ ДОЭ в целом от температуры применялся для исследования двухслойной двухрельефной киноформной микроструктуры ДОЭ рефракционно-дифракционного сверхсветосильного двухдиапазонного атермального ИК-объектива [1]. Рабочий спектральный диапазон этого объектива состоит из двух поддиапазонов (3,5 – 5,2 мкм; 7,5 – 11,4 мкм), а допустимые углы падения излучения на микроструктуру лежат в интервале от – 14° до +14°. Пилообразные рельефы микроструктуры, состоящей из 28 кольцевых зон, выполнены в оптических материалах SRF2 и GERMANIUM из каталога INFRARED программы оптического проектирования ZEMAX [8] с исходными (при $t = 20$ °C) глубинами: $h_{01} = 53{,}6$ мкм для рельефа в SRF2 и $h_{02} = 8{,}7$ мкм для рельефа в GERMANIUM. Рабочие скаты рельефов считаются линейными.

Приведенные в каталоге INFRARED значения коэффициентов линейного расширения оптических материалов слоев ($TCE_1 = 181\times10^{-7}$ м/°C материала SRF2 и $TCE_2 = 57\times10^{-7}$ м/°C материала GERMANIUM) позволяют легко получить глубины первого и второго рельефов, а также периоды b–х зон микроструктуры при заданной температуре t,°C:

$$\left.\begin{aligned} h_1 &= h_{01}\left(1+TCE_1\left(t-20\right)\right),\\ h_2 &= h_{02}\left(1+TCE_2\left(t-20\right)\right),\\ \Lambda_{1,b} &= \Lambda_{0b}\left(1+TCE_1\left(t-20\right)\right),\\ \Lambda_{2,b} &= \Lambda_{0b}\left(1+TCE_2\left(t-20\right)\right). \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

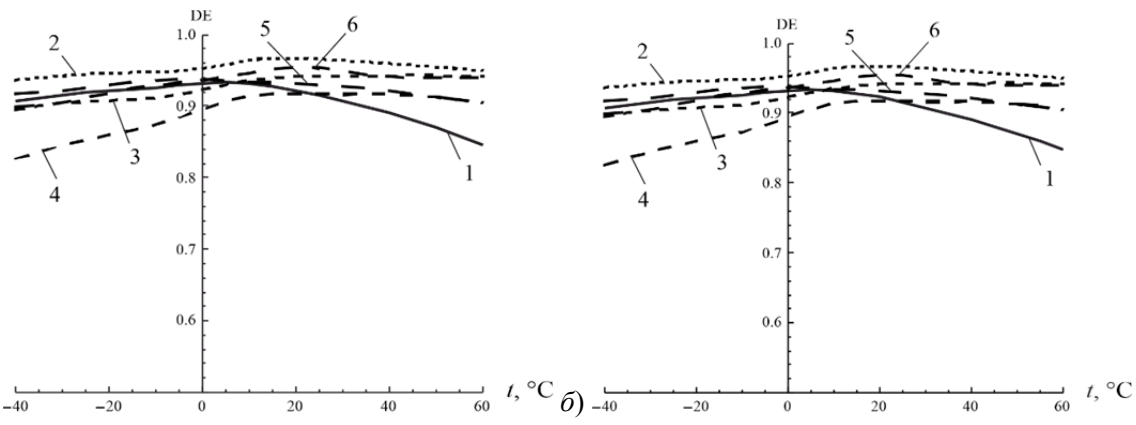
Термооптические постоянные материалов исследуемой микроструктуры вместе с дисперсионными формулами также приведены в каталоге INFRARED, что позволяет учесть при вычислении значений показателей преломления как длину волны, так и температуру [8]:

$$\left.\begin{aligned} n_1 &= n_{01}+\frac{n_{01}^2-1}{2n_{01}}D_{01}\left(t-20\right),\\ n_2 &= n_{02}+\frac{n_{02}^2-1}{2n_{02}}D_{02}\left(t-20\right), \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где $D_{01} = -4{,}8\times10^{-5}$ °C^{-1}, $D_{02} = 2{,}2\times10^{-4}$ °C^{-1}, n_{01} и n_{03} — показатели преломления SRF2 и GERMANIUM на заданной длине волны при $t = 20$°C.

Для исключения влияния на результаты расчетов френельевских потерь использовались просветляющие покрытия рельефов, моделируемые по методике, описанной в работе [9]. Расчет производились согласно алгоритму, описанному в работе [10], с учетом модификаций, предложенных в работе [11]. При этом интервал температур соответствовал рекомендованному для данной микроструктуры: от –60 °C до 40 °C [1]. Количество мод принималось равным 100, а суммарное количество тонких плит в разбиении всей микроструктуры определялось таким образом, чтобы отношение оптической толщины одной тонкой плиты к длине волны (коэффициент «k» в работе [9]) было 0,15. В результате возможность минимизации вычислительной трудоемкости становится одним из определяющих факторов эффективности предлагаемого подхода.

На рис. 4 *а–д* представлены зависимости ДЭ от температуры для различных углов падения излучения и длин волн инфракрасного спектра.



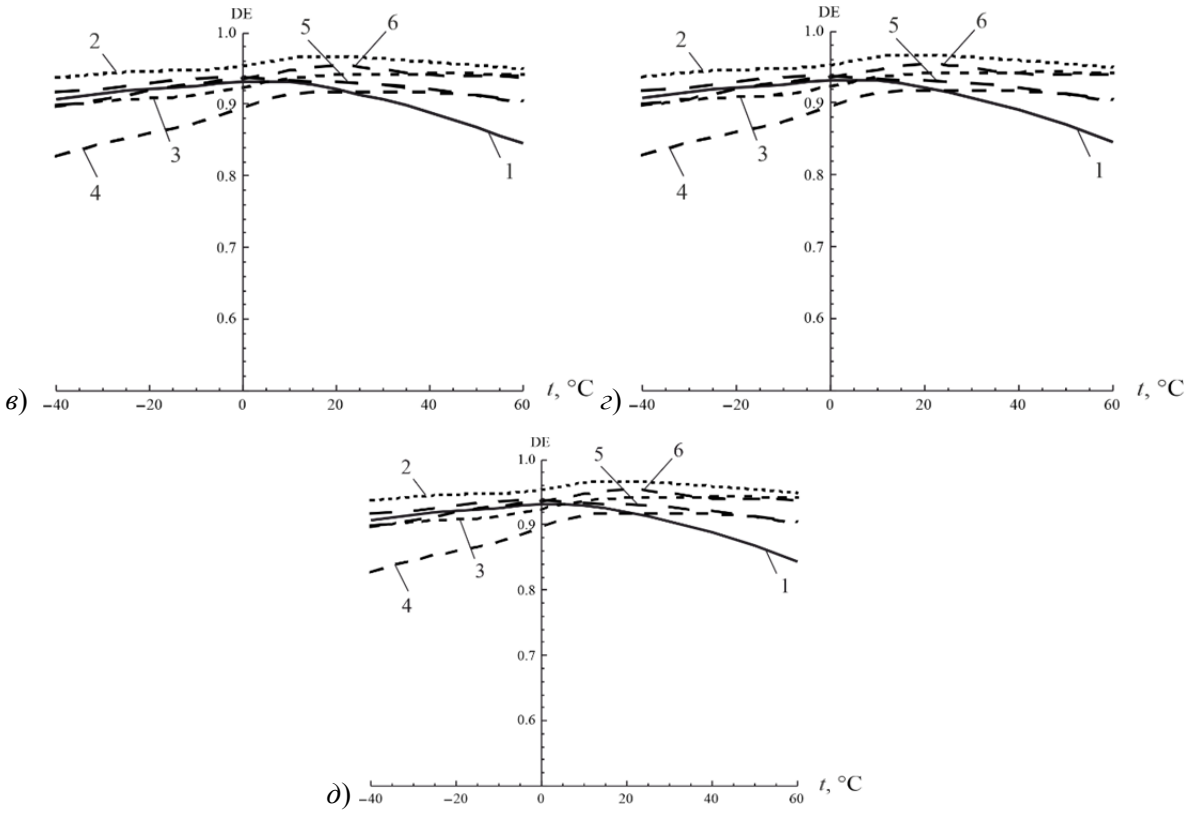


Рис. 4. Температурные зависимости ДЭ для различных углов падения θ и длины волны излучения λ: *а*) θ = –14°, *б*) θ = –7°, *в*) θ = 0°, *г*) θ = 7°, *д*) θ = 14°; 1 — λ = 3,5 мкм, 2 — λ = 4,3 мкм, 3 — λ = 5,2 мкм, 4 — λ = 7,5 мкм, 5 — λ = 9,45 мкм, 6 — λ = 11,4 мкм

Заключение

В докладе для расчета ДЭ ДОЭ с двухслойной микроструктурой и двумя внутренними пилообразными рельефами в рамках строгой электромагнитной теории дифракции предложен подход, предполагающий выполнение такого расчета через эффективность каждой зоны микроструктуры в отдельности. С использование этого подхода произведено, в частности, исследование зависимости от температуры ДЭ двухслойной двухрельефной киноформной микроструктуры ДОЭ рефракционно-дифракционного сверхсветосильного двухдиапазонного атермального ИК-объектива.

Представленные результаты исследования убедительно демонстрируют, что изменение температуры эксплуатации в интервале от –40 °С до 60°С приводит к падению ДЭ двухслойной двухрельефной пилообразной микроструктуры не более чем на 7 % во всем рабочем спектральном диапазоне (3,5 – 5,2 мкм; 7,5 – 11,4 мкм) и допустимом интервале углов (от – 14° до +14°) падения излучения на микроструктуру.

Благодарность

Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета РФ на реализацию государственного задания Минобрнауки РФ № FSGS-2024-0005.

Список источников

[1] *Greisukh G.I., Levin I.A., Ezhov E.G.* Design of ultra-high-aperture dual-range athermal infrared objectives // Photonics. 2022. Vol. 9 (10). Art. no. 742. https://doi.org/10.3390/photonics9100742

[2] Edmund Optics: plastic hybrid aspheric lenses. URL: http://www.edmundoptics.com/optics/opticallenses/aspheric-lenses/plastic-hybrid-aspheric-lenses/3200 (accessed 03.06.2025).

[3] *Moharam M.G., Gaylord T.K.* Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings // J Opt Soc Am. 1982. Vol. 72 (10). P. 1385–1392. https://doi.org/10.1364/josa.72.001385

[4] *Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // J Opt Soc Am. 1995. Vol. 12 (5). P. 1068–1076. https://doi.org/10.1364/josaa.12.001068

[5] *Li L.* Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings // J Opt Soc Am. 1996. Vol. 13 (6). P. 1024–1035. https://doi.org/10.1364/josaa.13.001024

[6] *Moharam M.G., Grann E.B., Pommet D.A., Gaylord T.K.* Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach // J Opt Soc Am. 1995. Vol. 12 (5). P. 1077–1086. https://doi.org/10.1364/josaa.12.001077

[7] *Антонов А.И., Грейсух Г.И.* Методика определения температурных зависимостей дифракционной эффективности двухслойных двухрельефных микроструктур в рамках строгого анализа связанных волн // Компьютерная оптика. 2025. Т. 49, № 3. С. 391–398. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1575

[8] ZEMAX. URL: https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio (accessed 03.06.2025).

[9] *Greisukh G.I., Antonov A.I., Ezhov E.G., Danilov V.A., Usievich B.A.* Conditions for minimizing the computational complexity of the RCWA calculation of the diffraction efficiency of sawtooth two-layer double-relief microstructures // Photonics. 2023. Vol. 10 (7). Art. no. 794. https://doi.org/10.3390/photonics10070794

[10] *Antonov A.I., Greisukh G.I.* Approach for finding amplitudes of the transmitted diffraction orders in the framework of a rigorous coupled-wave analysis and its application in the study of three-layer sawtooth microstructures // Proc SPIE. 2020. Art. no. 115511C. https://doi.org/10.1117/12.2572287

[11] *Gao W., Kemao Q.* Parallel computing in experimental mechanics and optical measurement: A review // Optics and Lasers in Engineering. 2012. Vol. 50 (4). P. 608–617.

Diffraction efficiency of two-layer two-relief microstructures under temperature differences

G.I. Greisukh, A.I. Antonov

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

The report proposes an approach to calculating the diffraction efficiency (DE) of diffractive optical elements with two internal sawtooth reliefs and two-layer microstructures within the framework of strict electromagnetic diffraction theory. In accordance with this approach, the DEs of all microstructure zones are summed up in a certain way. It takes into account the normalized area of each zone of the two-layer microstructure of the diffractive lens, the temperature dependences of the depths of both reliefs and their refractive indices. In addition, the local mutual displacement of the microstructure layers due to the difference in the thermal expansion coefficients of their materials is taken into account. It is shown, in particular, that due to the operating temperature difference (from –40 °C to +60 °C), the DE drops by no more than 7 % over the entire working spectral range (3.5–5.2 μm; 7.5–11.4 μm) and the permissible range of angles (from –14 ° to +14 °) of radiation incidence on the microstructure.

Keywords: *diffractive optical element, microstructure with two internal sawtooth reliefs and two layers, diffraction efficiency, rigorous analysis of coupled waves, thermal expansion, thermo-optical constants*

Зависимости нагрузочной добротности от ширины волновода микрокольцевого резонатора и gap

И.О. Кузьминых[1], А.Ю. Кузин[1, 2, 3], И.Н. Флоря[2], П.П. Ан[2, 4], В.В. Ковалюк[1, 2], Г.М. Чулкова[1, 4], Г.Н. Гольцман[1, 5]

[1] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*
[2] *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*
[3] *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*
[4] *Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*
[5] *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

В работе исследован массив чувствительных элементов фотонно-интегрального газового сенсора на нитрид кремниевой платформе, состоящий из 25 микрокольцевых резонаторов с варьирующимися параметрами ширины кольцевого волновода и зазором между транспортным и кольцевым волноводами. На основании полученных данных были построены зависимости внутренней добротности от ширины волновода и зазора (gap), а также зависимость смещения резонансной длины волны вблизи 1,55 мкм от температуры. Нами были определены оптимальные параметры чувствительной части сенсора: ширина волновода микрокольцевого резонатора 1,788 мкм и зазор 0,9 мкм и рассчитан теоретический предел обнаружения к водороду равный 0,1% об. д. Полученные данные могут быть использованы в качестве первого шага к созданию портативного газового сенсора на основе фотонных интегральных схем (ФИС) для детектирования и мониторинга в режиме реального времени утечек взрывоопасных газов.

Ключевые слова: *фотонные интегральные схемы, микрокольцевой резонатор, дифракционные оптические решетки, детектирование газов, водород*

Введение

Несмотря на весомые преимущества перед ископаемыми видами топлива, использование водорода в качестве альтернативного источника топлива связано с эксплуатационными рисками. Помимо опасности воспламенения, характерной для всех видов топлива, достаточно присутствия всего 4% об.д. водорода в атмосфере, чтобы произошел взрыв. Для использования всех преимуществ водорода, необходимы чувствительные сенсоры детектирования утечек в режиме реального времени.

Среди коммерчески доступных устройств наиболее распространены полупроводниковые [1], каталитические [2], электрохимические [3], волоконно-оптические [4], сенсоры на основе фотонных интегральных схем (ФИС) [5] и сенсоры на основе наноматериалов [6]. Большинство существующих сенсоров используют вблизи чувствительной части электрический ток, энергии которого может быть достаточно для того, чтобы в месте утечки, при коротком замыкании, был инициирован взрыв. Использование ФИС в качестве чувствительной части сенсора является наиболее безопасным решением. В данном типе устройств исключено присутствие электрического сигнала вблизи чувствительной части сенсора, а детектирование утечек происходит посредством изменения спектральных характеристик ФИС.

В патенте А.И. Конойко с соавторами [7] концентрация измеряемого вещества определяется за счет измерения эффективного показателя преломления брэгговского фильтра, который обеспечивает эффективное отражение резонансных пиков в необходимом диапазоне длин волн.

Спектральная характеристика фильтра на выходе связана с эффективным (n_{eff}) показателем преломления волновода, который, из-за эванесцентной связи, зависит от окружения ФИС. При увеличении показателя преломления газа вокруг ФИС, происходит увеличение оптического пути света и, соответственно, n_{eff}. Увеличение оптического пути приводит к сдвигу резонансной длины волны брэгговского фильтра в сторону больших длин волн. К недостаткам такой конструкции относится сильная зависимость показателя преломления от температуры. Для стабилизации температуры требуется постоянное поддержание мощности нагревателей, что приводит к повышенному энергопотреблению.

Для решения этой проблемы была предложена конструкция из двух микрокольцевых резонаторов на одном чипе [8]. Также, в этом случае авторы обратили внимание, что для некоторых газов, например, водорода и гелия, показатель преломления ниже, чем у воздуха. В этом случае оптический путь света уменьшается и сдвиг резонансных длин волн микрокольцевых резонаторов происходит в сторону меньших длин волн. Так как эти газы в чистом виде встречаются редко, то вместе с априорным знанием о их наличии, например, на производстве, автоматически обеспечивается селективность сенсора. Итоговое устройство для детектирования водорода представляет собой два микрокольцевых резонатора, расположенных на двух плечах балансного сплиттера. Свет заводится в центральный порт и делится сплиттером на две равные части. Половина света направляется на за-

крытый оксидом кремния резонатор, другая половина на открытый резонатор. На выходе происходит сравнение относительного сдвига спектра: если относительное положение пиков не меняется, это говорит о том, что либо не меняется газовое окружение, либо меняется температура сенсора. Если же появляется сдвиг между резонансами, то значит изменилось газовое окружение. В нашей работе исследуется изготовленный нами сенсор на основе ФИС конструкции [8], включая численное моделирование минимально детектируемой концентрации водорода.

Численное моделирование чувствительной части сенсора

Для изготовления массива сенсоров на основе ФИС нами было проведено численное моделирование поперечного сечения волновода в программе COMSOL Multiphysics. Затем была рассчитана зависимость эффективного показателя преломления от ширины волновода (от 0,8 мкм до 2,2 мкм) для ТЕ-моды в окружении воздуха и водорода (рис. 1, (а)). Данные для показателя преломления воздуха и водорода при фиксированной комнатной температуре были взяты из открытой базы данных [9].

С одной стороны, с увеличением ширины волновода эффективный показатель преломления волновода увеличивается, а с другой стороны, показатель преломления окружения также вносит вклад в n_{eff}. Численно рассчитанная зависимость эффективного показателя преломления от ширины волновода кольца показана на рис. 1, (б).

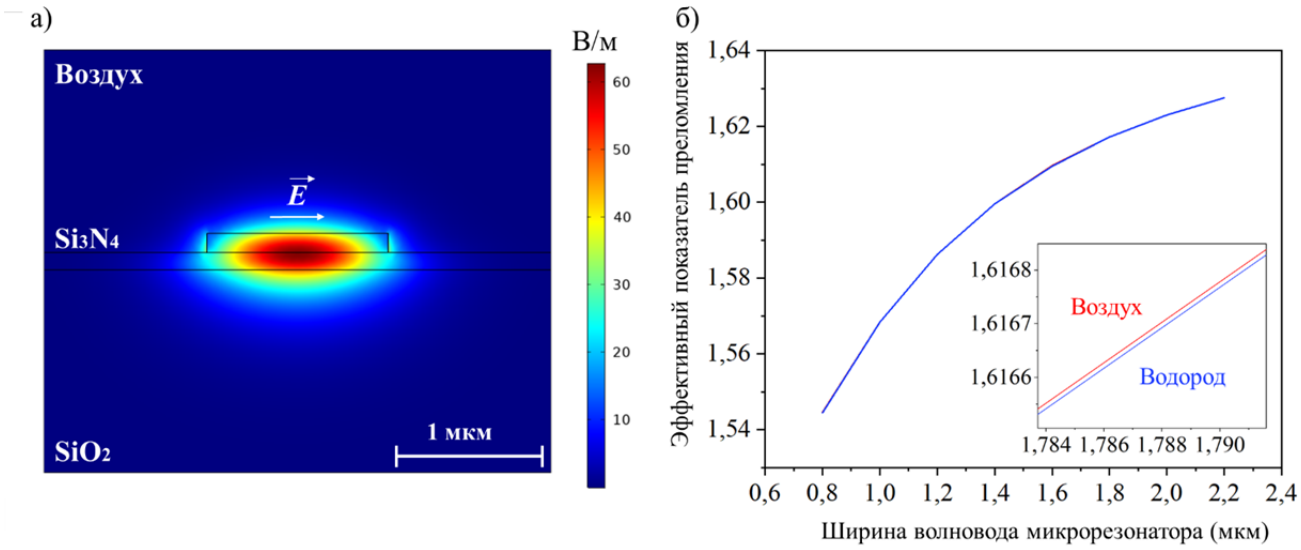


Рис. 1. Распределение фундаментальной ТЕ моды в поперечном сечении волновода микрокольцевого резонатора на нитрид кремниевой платформе (а); зависимость эффективного показателя преломления от ширины волновода (б)

Методологическая часть

С помощью высокоуровневого языка программирования Python была разработана матрица чувствительных ФИС элементов 5×5, в которой варьировались параметры ширины волноводов микрокольцевого резонатора (w) от 1,15 мкм до 2 мкм и зазор (w_g) от 0,3 мкм до 0,9 мкм. На рис. 2, (а) представлена микрофотография одного из изготовленных сенсоров с w = 1,788 мкм и w_g = 0,9 мкм.

Устройства были изготовлены на коммерчески доступной нитрид кремниевой платформе методом электронно-лучевой литографии [5]. Один из микрокольцевых резонаторов был покрыт диоксидом для дальнейшего использования в качестве опорного устройства (рис. 2, (а)).

Собранная нами экспериментальная установка (рис. 2, (б)) состоит из трех основных блоков.

Первый блок использовался для ввода/вывода оптического излучения на ФИС. Свет от перестраиваемого лазерного источника NewFocus TLB-6600 (1510–1620 нм) через контроллер поляризации и массив волокон поступал на вход фотонной интегральной схемы за счет фокусирующих дифракционных решеток [10].

Второй блок применялся для управления экспериментальной установкой при помощи персонального компьютера с программным обеспечением LabView и осуществления температурной стабилизации столика с терморезистором с PID контроллером.

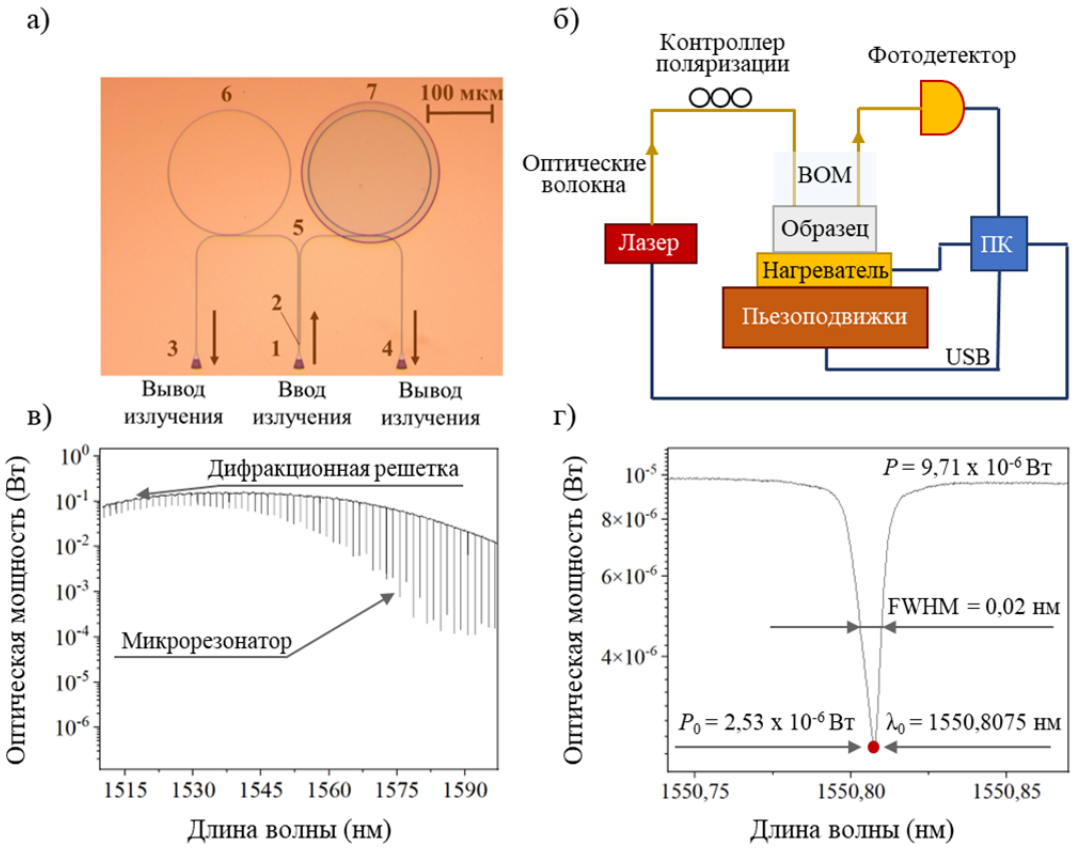


Рис. 2. Фотография чувствительной части сенсора с шириной волновода микрокольцевого резонатора (а) w = 1,788 мкм и w_g = 0,9 мкм после нанесения оксида: 1 — входной порт (дифракционная решетка); 2 — сплиттер, 3, 4 — выходные порты (дифракционные решетки); 5 — подводящий волновод, 6 — микрокольцевой резонатор, 7 — микрокольцевой резонатор, покрытый оксидом; схема экспериментальной установки, где ВОМ — волоконно-оптический массив (б); спектральная характеристика чувствительной части сенсора с микрокольцевым резонатором покрытым оксидом (в); увеличенное изображение резонансного пика на длине волны вблизи 1550 нм (г): ширина резонансного пика, измеренная на половине его максимальной амплитуды (FWHM), мощность на выходе (P), мощность в резонансом пике (P_0), резонансная длина волны (λ_0)

Экспериментальная часть

Перед началом измерения на позиционном столике была выставлена температура равная 23 ºС после чего на вход 1 (рис. 2, (а)) заводилось узкополосное излучение в широком диапазоне длин волн (1510–1620 нм). Свет, пройденный через опорный (покрытый SiO_2) и открытый микрокольцевые резонаторы измерялся быстрым фотодетектором на выходах 3 и 4, соответственно (рис. 2, (а)). Типичная зависимость спектра пропускания устройства показана на рис. 2, (в). Полученные спектральные зависимости обрабатывались при помощи программного обеспечения OriginLab благодаря которому в автоматическом режиме находился резонансный пик вблизи λ_0 = 1550 нм, из которого, путем аппроксимации Лоренца извлекались резонансная длина пика (λ_0) и полная ширина на полувысоте (англ. Full width at half maximum, FWHM). На основе полученных данных рассчитывалась нагруженная добротность ($Q_н$):

$$Q_н = \frac{\lambda_0}{FWHM} \quad (1)$$

На практике, для исключения влияния подводящего волновода, удобно пользоваться внутренней добротностью ($Q_в$), которая может быть рассчитана по формуле [11]:

$$Q_в = \frac{2Q_н}{1 + \sqrt{T_0}} \quad (2)$$

где T_0 доля переданной оптической мощности, измеренная фотодетектором на резонансной длине волны λ_0.

На первом этапе исследования мы оценили влияние нанесения SiO_2 на спектральные характеристики микрокольцевых резонаторов. Для этого были измерены спектры 25 устройств и построена зависимость отношения $Q_в$ до и после покрытия оксидом кремния для устройств с различными значениями w и w_g (рис. 3, (а)). Из построенной зависимости видно, что нанесение оксида не оказывает значительного влияния на $Q_в$: устройств с большими значениями w_g и w (0,6–0,9 и 1,6–2 мкм, соответственно), тогда как для малых значений 0,3–0,4 и 1,15–1,575 мкм, соответственно) видно увеличение $Q_в$ в 1,7–2,2 раза, что может быть связано с уменьшением шероховатостей и, как следствие, со снижением рассеяния света и уменьшением потерь в чувствительной части сенсора [12] .

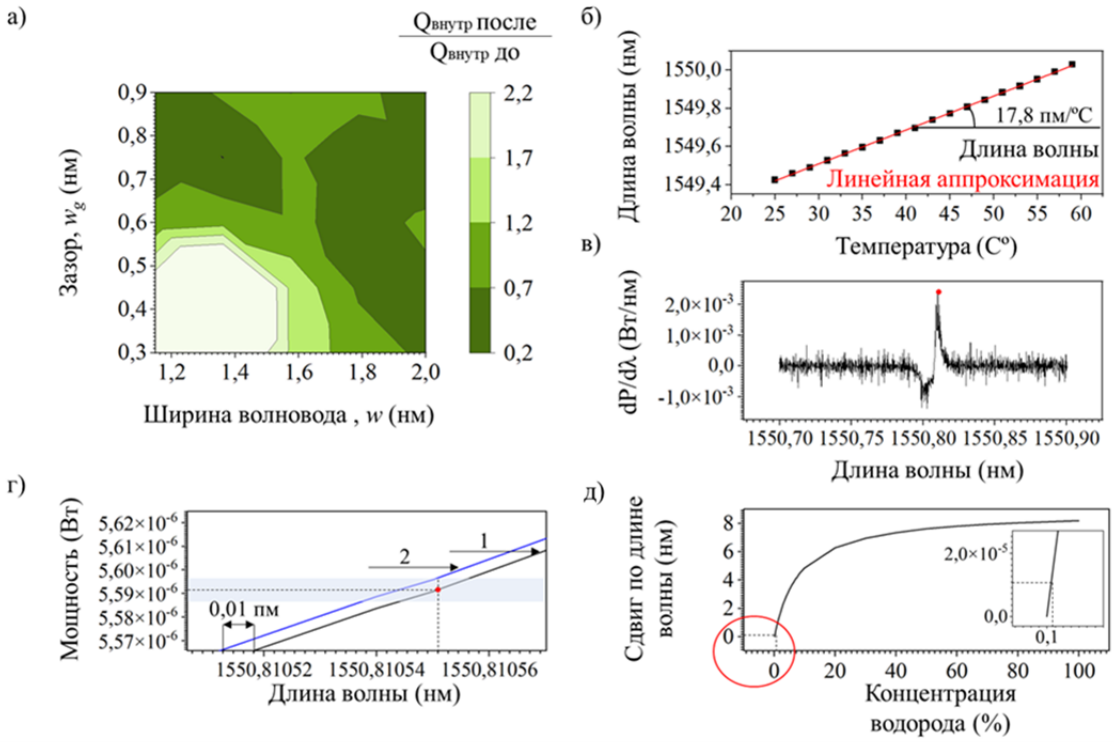


Рис. 3. Зависимости отношения внутренней добротности после и до нанесения оксида от ширины волновода микрокольцевого резонатора и зазора (а); зависимость центральной длины волны от температуры (б); зависимость производной по мощности от длины волны для резонансного пика (в) (максимальное значение производной достигается в точке равной 1550,811 нм); смещение резонансной кривой вблизи длины волны равной максимальному значению производной (г); минимальная детектируемая концентрация водорода, полученная с помощью численно-экспериментального подхода (д)

На втором этапе была произведена оценка влияния температуры на спектральные характеристики микрокольцевого резонатора. Было выбрано устройство, имеющее наибольшую добротность — устройство с w = 1,788 мкм и w_g = 0,9 мкм — $Q_в \approx 200\,000$. Перед началом каждого измерения температура на столике варьировалась от 25 ºC до 59 ºC (с шагом 2 ºC). Было установлено, что при изменении температуры на один градус, характеристика микрорезонатора сдвигается на ≈ 17,8 пм (рис. 3, (б)).

После извлечения параметров сенсора, была произведена численная оценка чувствительности. При помощи численной 2D-модели поперечного сечения волновода были рассчитаны показатели преломления среды при разных концентрациях водорода (от 0,1 … 100 %) в воздухе, вычисления которых производились по формуле (3):

$$n_3 = \frac{c_v}{\rho_2}(n_2 - n_1) + n_1 \qquad (3)$$

где n_1 — показатель преломления воздуха; n_2 — показатель преломления водорода; n_3 — показатель преломления смеси газов; c_v — концентрация водорода (%); ρ_2 — плотность водорода (мгр/м^3).

Затем, учитывая, что сдвиг резонансной длины волны пропорционален изменению эффективного показателя преломления волновода в окружении смеси n_3:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi R \times n_{eff}}{m}, \quad (4)$$

где R — радиус микрорезонатора (мкм); m — порядок интерференции, был построен график зависимости резонансной длины волны от концентрации водорода в воздухе (рис. 3 (г)).

Найдя длину волны, соответствующей максимальной производной dP/dλ (рис. 3, (в)) была проведена оценка смещения спектральной характеристики по длине волны вблизи точки с максимальной чувствительностью (рис. 3, (г)). Оценка минимального предела детектирования концентрации водорода, используемой в эксперименте, определялась точностью установки длины волны лазера ≈ 0,01 пм (рис. 3, (г)), определенной ранее. Полученное значение составило 0,1 % (рис. 3, (д)).

Заключение

Таким образом, в данной работе было проведено исследование изготовленных образцов интегрально-оптических газовых сенсоров на нитрид кремниевой платформе с двумя микрокольцевыми резонаторами: открытым и закрытым оксидом кремния. Температурное влияние на спектральную характеристику составило 17,8 пм/ºС. Для устройства с шириной волновода микрокольцевого резонатора w = 1,788 мкм и w_g = 0,9 мкм с внутренней добротностью $Q_в$ = 207 268 рассчитан теоретический предел обнаружения к газам, который оказался равным 0,1% об. д. водорода в атмосфере для текущей конфигурации сенсора. Полученные значения открывают потенциал для широкого использования сенсора до достижения взрывоопасного порога в 4 % на практике.

Благодарности

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 23-79-00056 (изготовление ФИС) а также грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSME-2025-0004) (численный расчет и экспериментальное исследование ФИС).

Список источников

[1] *Chou Y., Chen C., Liu W., Chen H.* A new Pd InP Schottky hydrogen sensor fabricated by electrophoretic deposition with Pd nanoparticles // IEEE Electron Device Lett. 2005. Vol. 26. № 2, P. 62–65.

[2] *Ivanov I. et al.* Investigation of catalytic hydro gen sensors with platinum group catalysts // Sensors and Actuators B: Chemical. 2021. Vol. 346. Art. no. 130515.

[3] *Yang W. et al.* A limiting current hydrogen sensor based on BaHf0.8Fe0.2O3-δ dense diffusion barrier and BaHf0.7Sn0.1In0.2O3-δ protonic conductor // Ceramics International. 2022. Vol. 48. № 15. P. 22072–22082.

[4] *Dai J. et al.* Fiber optical hydrogen sensor based on WO3-Pd2Pt-Pt nanocomposite films // Nano materials. 2021. Vol. 11. № 1. Art. no. 128.

[5] *Elmanova A. et al.* Study of silicon nitride O ring resonator for gas-sensing applications // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020. Vol. 1695. № 1. Art. no. 012124.

[6] *Yang F., Taggart D., Penner R.* Joule Heating a Palladium Nanowire Sensor for Accelerated Response and Recovery to Hydrogen Gas // Small. 2010. Vol. 6, P. 1422−1429.

[7] *Конойко А.И., Гончаренко И.А., Поликанин А.М.* Оптический датчик концентрации вещества // Патент № 85236 РФ. Заявл. 06.04.2009; опубл. 27.07.2009. Бюл. № 21. 2 с.

[8] *Кузьминых И.О., Ковалюк В.В., Голиков А.Д. и др.* Водородный интегрально-оптический датчик // Патент № 223794 РФ. Заявл. 08.12.2023; опубл. 04.03.2024. Бюл. № 7. 12 с.

[9] База данных показателей преломления материалов. URL: https://refractiveindex.info (дата обращения 02.07.2025).

[10] *Kuzin A. et al.* Efficiency of focusing grating couplers versus taper length and angle // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. Vol. 1410. № 1. Art. no. 012181.

[11] *An P. et al.* Experimental optimisation of O-ring resonator Q-factor for on-chip spontaneous four wave mixing // J. Phys. Conf. Ser. 2018. Vol. 1–4. Art. no. 1124.

[12] *De Goede M. et al.* Mode-splitting in a microring resonator for self-referenced biosensing // Optics express. 2021. Vol. 29. № 1. P. 346–358.

Dependences of the load Q-factor on the width of the waveguide of the micro-ring resonator and gap

I.O. Kuzminykh[1], A.Y. Kuzin[1, 2, 3], I.N. Florya[2], P.P. An[2, 4], V.V. Kovalyuk[1, 2], G.M. Chulkov[1, 4], G.N. Goltsman[1, 5]

[1] *National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia*
[2] *National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*
[3] *Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*
[4] *Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia*
[5] *Russian Quantum Center, Moscow, Russia*

In this research, a matrix of sensitive elements of a gas sensor on a silicon nitride platform was investigated using a 9-by-9 micro-ring resonator, and the dependences of the loaded Q factor on the width of the micro-ring resonator waveguide and the distance between the transport and resonator waveguide (gap) were constructed. The constructed dependencies will allow us to determine the optimal parameters of the sensitive part of the sensor, at which the device will be able to demonstrate a high level of sensitivity to the appearance of gas impurities in the atmosphere. The high quality of the sensor will allow detecting ultra-low concentrations of gas leaks.

Keywords: *optics, microring resonator, diffraction optical elements, gas detection, hydrogen*

Секция 2
Оптика лазерных пучков и структурированного света

Геометрия траекторий структурированных пучков Лагерра — Гаусса на орбитальной сфере Пуанкаре: экспериментальный подход

М.В. Брецько[1], А.В. Воляр, Я.Е. Акимова

Физико-технический институт Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

Представлен экспериментальный метод отображения состояний структурированных пучков Лагерра — Гаусса на орбитальную сферу Пуанкаре. Метод основан на измерении орбитальных параметров Стокса через распределения интенсивности в фокусе сферической линзы и в двойном фокусе цилиндрической линзы. Полученные данные позволяют визуализировать модовые состояния в виде точек на сфере и анализировать их траектории при варьировании параметров пучка.

Ключевые слова: *структурированный свет, орбитальные параметры Стокса, орбитальная сфера Пуанкаре, орбитальный угловой момент*

Введение

Структурированный свет [1], обладающий орбитальным угловым моментом (ОУМ) [2], привлек значительное внимание в современной оптике благодаря своим уникальным свойствам, включая фазовую винтовую структуру, наличие оптических сингулярностей и возможность переноса ОУМ. Эти пучки находят применение в оптической микроманипуляции [1], квантовой коммуникации [2], биофотонике [1, 2], а также в системах пространственного мультиплексирования при передаче информации [3].

Сингулярная структура пучков с ОУМ [4] требует специальных подходов к их описанию, поскольку традиционные методы анализа, основанные лишь на амплитудных или фазовых распределениях, оказываются недостаточными для полного раскрытия их внутренней геометрии. В этом контексте важную роль играет концепция орбитальной сферы Пуанкаре — обобщенной геометрической модели, в которой модовые состояния света с различным распределением ОУМ отображаются в виде точек и траекторий на поверхности сферы [5]. Эти траектории несут в себе информацию о симметрии, устойчивости и возможных инвариантах пучка при распространении в оптических системах, содержащих линзы, элементы скручивания фазы, а также при прохождении через слабые возмущающие среды [6, 7]. Ключевым элементом такого подхода является определение орбитальных параметров Стокса [6], полностью описывающих положение модового состояния на сфере. Эти параметры представляют собой обобщение классических параметров Стокса для случая пространственно-модовой структуры, включающей ОУМ. Однако прямое экспериментальное определение таких параметров требует точных и воспроизводимых методов регистрации пространственного распределения интенсивности и фазы.

В настоящей работе исследуется реализация экспериментального метода восстановления орбитальных параметров Стокса на основе экспериментального анализа распределения интенсивности структурированных пучков света в двух плоскостях оптической системы.

4D матрица моментов интенсивности

В основе предлагаемого подхода к отображению состояний структурированных пучков на поверхность двумерной сферы Пуанкаре лежит представление через симплектические 4D матричные преобразования моментов интенсивности второго порядка [8]

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M^T} & \mathbf{U} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{xx} & W_{xy} & M_{x\xi} & M_{x\eta} \\ W_{xy} & W_{yy} & M_{y\xi} & M_{y\eta} \\ M_{x\xi} & M_{y\xi} & U_{\xi\xi} & U_{\xi\eta} \\ M_{x\eta} & M_{y\eta} & U_{\xi\eta} & U_{\eta\eta} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Орбитальные параметры Стокса S_i *(i=0,1,2,3)* через (1) определяются как [7]

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{1}{2}\left(W_{xx} + U_{\xi\xi} + U_{\eta\eta}\right); \\ S_1 &= \frac{1}{2}\left(W_{xx} - W_{yy} + U_{\xi\xi} - U_{\eta\eta}\right); \\ S_2 &= W_{xy} + U_{\xi\eta}; \\ S_3 &= M_{x\eta} - M_{y\xi}. \end{aligned} \quad (2)$$

Экспериментальный метод измерения орбитальных параметров стокса

Предложенный нами метод измерений орбитальных параметров Стокса базируется на аналогии с методом измерения поляризационных параметров Стокса [9] в рамках симплектической структуры поляризационной матрицы когерентности и матрицы моментов интенсивности (1) [10]. Следуя этой аналогии, рассмотрим оптическую систему, содержащую только цилиндрическую линзу в плоскости $z = 0$. Первые два орбитальных параметра Стокса определим посредством измерения W_{xx}, W_{yy} и W_{xy} элементов субматрицы $\boldsymbol{W}$ в плоскости $z = 0$ перед цилиндрической линзой, играющих роль поляризатора. В нашем скалярном случае они записываются как

$$S_1 = W_{xx}(z=0) - W_{yy}(z=0) = \frac{1}{J_{00}}\left(\int_{\mathbb{R}^2} x^2\, I(x,y,z=0)dxdy - \int_{\mathbb{R}^2} y^2\, I(x,y,z=0)dxdy\right), \quad (3)$$

$$S_2 = W_{xy}(z=0) + W_{yx}(z=0) = \\ = \frac{1}{J_{00}}\left(\int_{\mathbb{R}^2} (x+y)^2\, I(x,y,z=0)dxdy - \int_{\mathbb{R}^2} (x-y)^2\, I(x,y,z=0)dxdy\right), \quad (4)$$

где J_{00} обозначает полную интенсивность пучка. Здесь аналогом интенсивности после поляризатора в x и y направлениях являются квадраты радиусов перетяжки параксиального пучка вдоль x и y для S_1 параметра и квадраты радиусов перетяжки вдоль $\phi_1 = \pi/4$ и $\phi_2 = -\pi/4$ направлений для S_2 параметра. Очевидно, что такой подход измерения первых двух орбитальных параметров Стокса можно использовать, как для устойчивых, так и неустойчивых структурированных пучков. Чтобы определить метод измерения третьего орбитального параметра S_3 необходимо перенести измерения в плоскость двойного фокуса цилиндрической линзы:

$$S_3 = \ell_z = \frac{1}{J_{00}}\left(\int_{\mathbb{R}^2} (x+y)^2\, I(x,y,Z=2f)dxdy - \int_{\mathbb{R}^2} (x-y)^2\, I(x,y,Z=2f)dxdy\right). \quad (5)$$

Эксперимент

В основу процесса измерения орбитальных параметров Стокса, была положена экспериментальная установка, представленная на рис. 1.

Лазерный пучок света излучая от источника света *Ls* He-Ne лазера типа Thorlabs HNL 020L, проходя через пространственный фильтр, состоящий из системы сферических линз L_1, L_2 ($f_1 = 5$ см, $f_2 = 20$ см) и диафрагмы D_1 между ними, формировал коллимированный Гауссов пучок света. При помощи зеркала M_1, пучок света направлялся на дисплей пространственного модулятора света *SLM* типа Thorlabs EXULUS-4K1/M. Модулятор света был использован для генерации структурированного светового пучка. После дифракции на амплитудно-фазовой дифракционной решетке, промодулированный свет фокусировался сферической линзой L_3 ($f_3 = 75$ см) и разделялся делительным кубиком *Bs* на два оптических плеча.

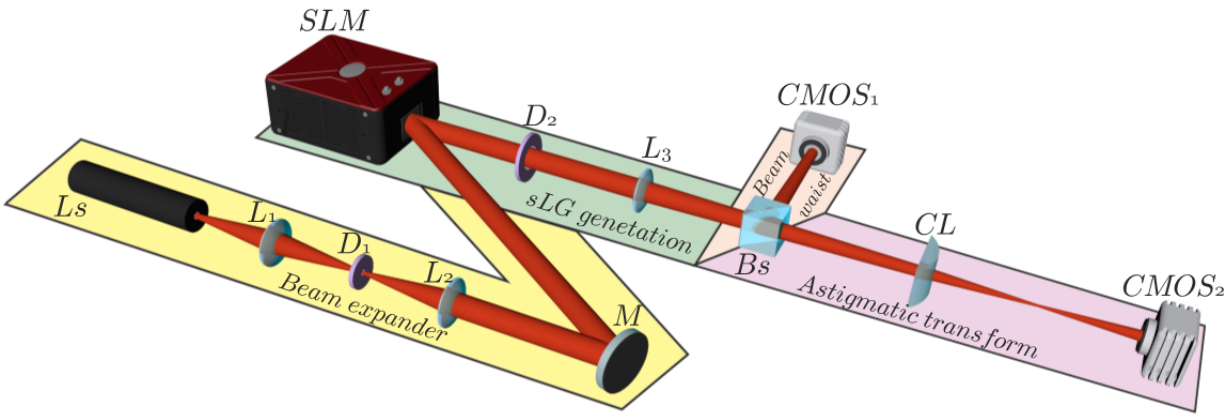


Рис. 1. Экспериментальная установка

В прямом плече в перетяжке, где выполняется условие длины Рэлея $z_0 = 2f_{cyl} = 100$ см устанавливалась цилиндрическая линза *CL* ($f_{CL} = 50$ см), а на двойном фокусном расстоянии ($Z=2f_{CL}$=100 см) устанавливалась $CMOS_2$ камера типа Michrome 20, где и измерялась интенсивность пучка для расчета S_3 (5). В отраженном же плече $CMOS_1$ камера типа Michrome 20 устанавливалась

на расстоянии от сферической линзой L_3 равное ее фокусному расстоянию. Далее, при помощи компьютерной обработки вычислялись три момента интенсивности W_{xx}, W_{yy}, W_{xy} по формулам (3), (4) и вычислялись орбитальные параметры Стокса S_1, S_2.

На рис. 2, представлены экспериментальные точки на сфере Пуанкаре, для различных значений амплитудных и фазовых параметров структурированного пучка Лагерра — Гаусса, подробно рассмотренного в наших работах [11, 12].

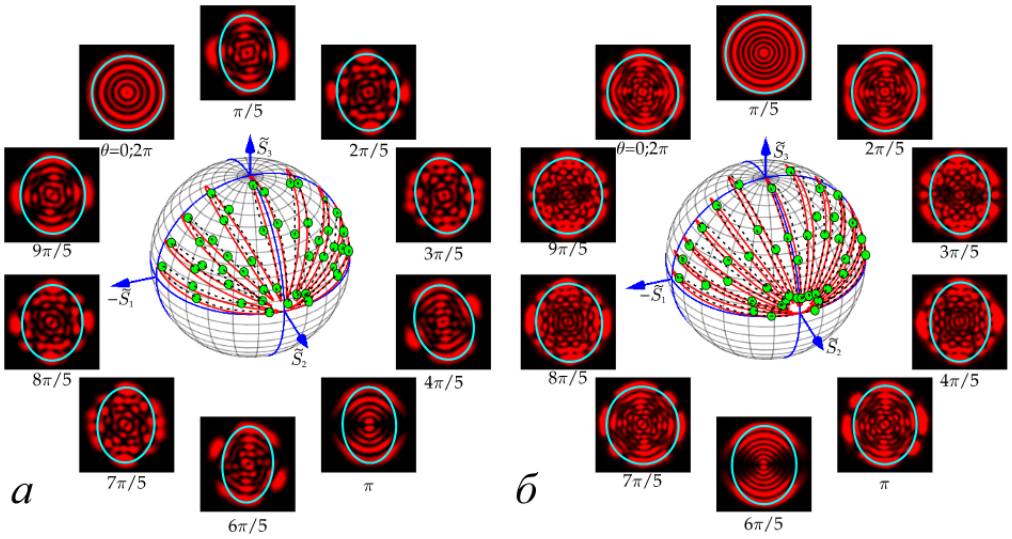


Рис. 2. Экспериментальное отображение структурированного пучка Лагерра — Гаусса [11, 12] на сферу Пуанкаре с $\varepsilon = 1$, (а) $n = 4$, $\ell = 1$ и (б) $n = 6$, $\ell = 1$. Каждая орбитальная сфера Пуанкаре сопровождена экспериментальными картинами интенсивности с соответствующими точкам на сфере. На фоне каждого распределения интенсивности серой пунктирной линией приведены экспериментальные ассоциированные эллипсы субматрицы **W**

Заключение

Разработан и реализован экспериментальный подход к исследованию пространственно-модовой структуры световых пучков с орбитальным угловым моментом путем отображения их состояний на орбитальную сферу Пуанкаре. Ключевой особенностью предложенного метода является измерение орбитальных параметров Стокса через распределения интенсивности в фокусе сферической линзы и в двойном фокусе цилиндрической линзы, что позволяет однозначно определять положение модового состояния на сфере Пуанкаре. Представление пучка в виде точки или траектории на сфере Пуанкаре открывает возможность анализа его эволюции, выявления симметрий и инвариантов при различных оптических преобразованиях. Результаты эксперимента демонстрируют высокую воспроизводимость и чувствительность метода, что делает его перспективным инструментом для дальнейших исследований в области сингулярной и структурированной оптики, включая задачи анализа устойчивости мод, контроля геометрических фаз и пространственной динамики в оптических системах.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 24-22-00278).

Список источников

[1] *Forbes A., de Oliveira M., Dennis M.R.* Structured light // Nat. Photonics. 2021. Vol. 15. P. 253–262. https://doi.org/10.1038/s41566-021-00780-4

[2] *Yao A.M., Padgett M.J.* Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // Adv. Opt. Photon. 2011. Vol. 3. P. 161–204. https://doi.org/10.1364/AOP.3.000161

[3] *Franke-Arnold S.* 30 years of orbital angular momentum of light // Nat Rev Phys. 2022. Vol. 4. P. 361. https://doi.org/10.1038/s42254-022-00467-x

[4] *Shen Y., Yu M., Fu X.* Hybrid topological evolution of multi-singularity vortex beams: generalized nature for helical-Ince-Gaussian and Hermite-Laguerre-Gaussian modes // J. Opt. Soc. Am. A. 2019. Vol. 36, № 4. P. 578–587. https://doi.org/10.1364/JOSAA.36.000578

[5] *Padgett M.J., Courtial J.* Poincare-sphere equivalent for light beams containing orbital angular momentum // Opt. Lett. 1999. Vol. 24, № 7. P. 430–432. https://doi.org/10.1364/OL.24.000430

[6] *Alieva T., Bastiaans M.J.* Phase-space rotations and orbital Stokes parameters // Opt. Lett. 2009. Vol. 34, № 4. P. 410–412. https://doi.org/10.1364/OL.34.000410

[7] *Calvo G.F.* Wigner representation and geometric transformations of optical orbital angular momentum spatial modes // Opt. Lett. 2005. Vol. 30, № 10. P. 1207–1209. https://doi.org/10.1364/OL.30.001207

[8] *Bastiaans M.J.* Wigner distribution function and its application to first-order optics // J. Opt. Soc. Am. 1979. Vol. 69, № 12. P. 1710–1716. https://doi.org/10.1364/JOSA.69.001710

[9] *Born M., Wolf E.* Principles of optics. Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 952 p.

[10] *Guillemin V., Sternberrg S.* Symplectic techniques in physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 468 p.

[11] *Volyar A.V., Abramochkin E.G., Bretsko M.V., Akimova Ya.E., Egorov Yu.A.* Can the radial number of vortex modes control the orbital angular momentum? // Computer Optics. 2022. Vol. 46, № 6. P. 853–863. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1169

[12] *Volyar A., Bretsko M.* Mapping structured Laguerre-Gaussian beam states onto the orbital Poincare sphere in the form of controllable spatial trajectories // J. Opt. Soc. Am. A. 2024. Vol. 41, № 9. P. 1648–1655. https://doi.org/10.1364/JOSAA.529894

Geometry of Structured Laguerre-Gaussian Beam Trajectories on the Poincare Orbital Sphere: An Experimental Approach

M.V. Bretsko, A.V. Volyar, Ya.E. Akimova

Physics and Technology Institute of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

An experimental method for mapping the states of structured Laguerre-Gauss beams onto the Poincaré orbital sphere is presented. The method is based on measuring the Stokes orbital parameters through intensity distributions at the focus of a spherical lens and at the double focus of a cylindrical lens. The obtained data allow visualizing the mode states as points on the sphere and analyzing their trajectories when varying the beam parameters.

Keywords: *structured light, Stokes orbital parameters, Poincaré orbital sphere, orbital angular momentum*

Влияние нулевого порядка дифракции на бесселевы пучки, сформированные спиральными бинарными фазовыми аксиконами

Н.Д. Осинцева[1], Н.А. Николаев[2]

[1] *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*

При формировании терагерцовых бесселевых пучков с помощью пропускающих спиральных бинарных фазовых аксиконов наблюдаются периодические азимутальные вариации в кольцах их поперечного распределения интенсивности. Показано, что число наблюдаемых максимумов вариаций зависит от доли нулевого порядка дифракции в пучке и может принимать значения l или 2l, где l — топологический заряд пучка. В работе исследованы возможные причины появления нулевого порядка дифракции. Численно и экспериментально продемонстрированно, что для аксиконов из кремния, доля нулевого порядка, обусловленная переотражением излучения, оказывает существенное влияние.

Ключевые слова: *бесселевы пучки, дифракционные оптические элементы, спиральный бинарный фазовый аксикон, терагерцовое излучение*

Введение

Пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) [1], также известные как оптические вихри, представляют собой особый класс световых волн, характеризующихся наличием фазового сдвига, приводящего к образованию геликоидальной структуры волнового фронта. Наличие ОУМ позволяет передавать дополнительную информацию путем кодирования сигналов в пространственной структуре света. Это открывает новые возможности для увеличения пропускной способности оптических коммуникационных систем, особенно в условиях высоких требований к скорости передачи данных. Применение вихревых бесселевых пучков (БП) обладает дополнительным преимуществом. Они устойчивы к взаимодействию с препятствиями, что должно повысить стабильность передачи сигнала. Исследование же таких пучков терагерцового (ТГц) диапазона актуально для развития систем связи шестого поколения (6G) [2].

ТГц-диапазон хуже освоен по сравнению с оптическим. В нем отсутствуют эффективные пространственные модуляторы света. Поэтому одним из перспективных способов формирования ТГц-БП являются спиральные бинарные фазовые аксиконы (СБФА). Ранее было замечено, что сформированные с их помощью пучки обладают периодической азимутальной вариацией интенсивности внутри колец в поперечном сечении пучка [3]. Численное моделирование и экспериментальные результаты показали различие в количестве максимумов (пиков) этой вариации: $2l$ и l соответственно, где l — это топологический заряд пучка. Выдвинуто предположение, что это связанно с интерференцией бесселевой моды, формируемой -1 порядком дифракции, с нулевым порядком. Однако детальное исследование природы нулевого порядка не было проведено. Выдвигались предположения, что его причиной могут быть три механизма: отстройка длины волны излучения от рабочей для СБФА, френелевские переотражения излучения в пластине, на которой изготовлен СБФА и нарушение периода решетки аксикона при приближении к его центру.

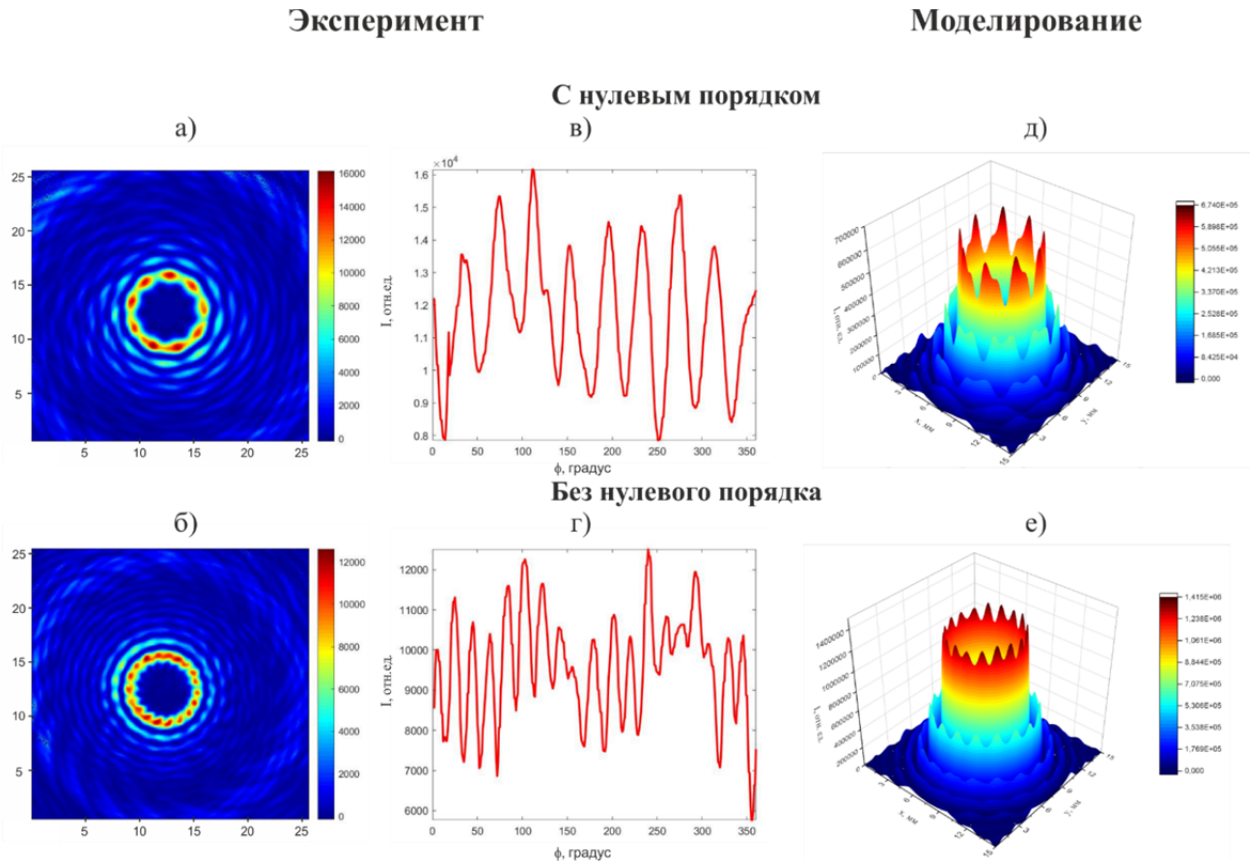
В данной работе с помощью численного моделирования и физического эксперимента исследуется природа нулевого порядка, появляющегося при формировании ТГц-БП с помощью СБФА. Проведена проверка всех трех предположений. Показано влияние нулевого порядка и отстройки длины волны на число наблюдаемых пиков интенсивности в первом кольце БП с топологическим зарядом $l = +9$.

Результаты

Влияние нарушения периода спиральной решетки в центре аксикона исследовано в результате перекрытия центральной части с помощью металлического диска. Показано, что независимо от диаметра (4–10 мм), перекрытие практически не оказывает влияния на поперечное распределение интенсивности пучка после аксикона, а нулевой порядок по-прежнему присутствует.

В результате расчета переотражений излучения в кремниевой пластине (толщина ~1 мм), из которой изготовлен СБФА, можно показать, что формируется нулевой порядок дифракции. Это происходит из-за того, что для участков волнового фронта волны, отраженной от спиральной решетки аксикона, задней плоскости кремниевой пластинки и снова прошедшей через решетку формируется набег фазы не кратный π. Ранее моделирование производилось только для волны, прошедшей через

аксикон, без учета переотражений. В настоящей работе в алгоритм была добавлена соответствующая парциальная волна, что качественно приблизило модельные и экспериментально полученные изображения поперечного распределения интенсивности БП (рисунок а, в, д). На изображениях ярко выражены 9 пиков азимутальной вариации в первом кольце в случае пучка с $l = +9$.



Результаты эксперимента и численного моделирования формирования бесселева пучка с $l = +9$ для случаев наличия и отсутствия нулевого порядка дифракции (λ = 141 мкм, L = 120 мм): а), б) поперечное распределение интенсивности (25,6×25,6 мм); в), г) график азимутального распределения интенсивности в первом кольце пучка; д), е) поперечное распределение интенсивности (моделирование) (15×15 мм)

Подавление нулевого порядка дифракции было проведено экспериментально с помощью Фурье-фильтрации. Фильтр представлял собой две киноформные линзы с фокусным расстоянием 75 мм и расположенные на расстоянии 150 мм друг от друга. В общей фокальной плоскости линз формируется Фурье-образ пучка, представляющий собой кольцо и точку в центре. Кольцу соответствует БП сформированный ±1 порядком дифракции, точке — нулевой порядок, который перекрывался непрозрачным металлическим диском. Поперечное распределение интенсивности бесселева пучка восстановленное второй линзой представлено на рисунке б. Оно также, как и распределение, полученное в результате моделирования для данного случая, имеет 18 пиков ($2l$) азимутальной вариации в первом кольце.

Отдельно численно исследовалось изменение количества азимутальных вариаций в кольце (в отсутствии нулевого порядка дифракции) при отстройке длины волны от рабочей для СБФА, составляющей 141 мкм, в диапазоне 101–201 мкм. Результаты показали, что, когда доля нулевого порядка минимальна, или равна нулю, число максимумов азимутальных вариаций интенсивности равно $2l$. Диапазон отстройки длины волны составил 3 %.

Заключение

Бесселевы пучки ТГц-диапазона, сформированные с помощью спиральных бинарных фазовых аксиконов, актуальны для применения в системах связи шестого поколения (6G), например, для создания короткодействующих защищенных каналов. Бинарная природа формирующего их элемента приводит к периодическим азимутальным вариациям интенсивности в кольцах БП. Для случая идеального БП число максимумов вариации соответствует удвоенному топологическому заряду, т. е.

равно 2*l*. Эта характеристика может использоваться для модального декодирования пучков без применения специальных фильтров. Однако, в реальности, наличие нулевого порядка дифракции приводит к наблюдению *l* максимумов, что может затруднить внедрение такого подхода.

В работе численно и экспериментально подтверждено, что нулевой порядок формируется в результате отстройки длины волны от рабочей для СБФА, и в результате переотражения излучения в кремниевом элементе. При этом сингулярность в центре структуры СБФА не вносит никакого вклада. Таким образом для случая применения СБФА для формирования ТГц бесселевых пучков и их модального детектирования по количеству максимумов азимутальной вариации в первом кольце можно выдвинуть требования об обязательном отсутствии переотражений в оптическом элементе, например, с помощью нанесения просветляющих покрытий из SiO или парилена для кремния; а также стабилизация длины волны излучения в диапазоне $\lambda \pm 0{,}03\lambda$.

Благодарность

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

Список источников

[1] *Yao A.M., Padgett M.J.* Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // Advances in Optics and Photonics. 2011. Vol. 3. № 2. P. 161. https://doi.org/10.1364/AOP.3.000161

[2] *Yang H., Zheng S., He W., Yu X., Zhang X.* Terahertz orbital angular momentum: Generation, detection and communication // China Communications. 2021. Vol. 18. № 5. P. 131–152. https://doi.org/10.23919/JCC.2021.05.009

[3] *Knyazev B., Osintseva N., Komlenok M. et al.* Terahertz Bessel Beams Formed by Binary and Holographic Axicons // Photonics. 2023. Vol. 10. № 6. Art. no. 700. https://doi.org/10.3390/photonics10060700

Effect of zero diffraction order on Bessel beams formed by spiral binary phase axicons

N.D. Osintseva[1], N.A. Nikolaev[2]

[1] *Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[2] *Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia*

When forming terahertz Bessel beams using transmissive spiral binary phase axicons, periodic azimuthal variations are observed in the rings of their cross-section intensity distribution. It is shown that the number of observable variation maxima depends on the fraction of zero-order diffraction in the beam and can take values of either l or $2l$, where l is the topological charge of the beam. The possible causes for the appearance of zero-order diffraction have been investigated in this work. It has been numerically and experimentally demonstrated that for silicon axicons, the fraction of zero order due to re-reflection of radiation has a significant effect.

Keywords: *Bessel beams, diffractive optical elements, axicon, terahertz radiation*

Использование отражающих аксиконов для создания терагерцевых бесселевых пучков

Н.А. Баздырев[1, 2], В.В. Герасимов[1, 3], В.С. Павельев[4], А.Н. Агафонов[4], К.Н. Тукмаков[4]

[1] *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия*
[3] *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
[4] *Самарский университет, Самара, Россия*

В работе представлены результаты по формированию терагерцевых (ТГц) бесселевых пучков с топологическими зарядами $|l| = 3$ и $|l| = 9$ на длинах волн 141 мкм, 203 мкм и 218 мкм. Аксиконы с периодами $p = 2$ и 3 мм были изготовлены методами реактивно-ионного травления и лазерной абляцией на кремнии с последующим напылением непрозрачного слоя меди. Определены зоны формирования бесселевых пучков, которые согласуются с численными расчетами в рамках скалярной теории дифракции и получены оценки энергетической эффективности отражающих аксиконов. Топологические заряды полученных бесселевых пучков были определены с использованием интерферометра Маха — Цендера.

Ключевые слова: *бесселевы пучки, терагерцевое излучение, отражающие аксиконы, беспроводная передача данных, лазер на свободных электронах*

Введение

С развитием связи 6G [1] требуется разработка новых подходов для увеличения объема и скорости передачи данных. Одним из таких подходов является использование бесселевых пучков [2] в ТГц-диапазоне. ТГц-диапазон расположен между инфракрасным и СВЧ диапазонами, область длин волн составляет от 100 мкм до 1 мм (от 0,3 ТГц до 3 ТГц по частоте). Длинноволновая часть ТГц-диапазона от 300 мкм до 1 мм (так называемый субтерагерцевый диапазон) содержит области высокой прозрачности атмосферы, вследствие чего имеет перспективы использования для создания беспроводных систем связи.

Результаты исследования сформированных бесселевых пучков

Для создания бесселевых пучков с орбитальными угловыми моментами 3 и 9 использовались бинарные фазовые спиральные аксиконы, работающие на отражение. Аксиконы были изготовлены двумя методами: лазерной абляцией [3] и реактивно-ионного травления [4] с периодами $p = 2$ и 3 мм. В качестве источника ТГц-излучения использовался Новосибирский лазер на свободных электронах [5] на длине волны $\lambda = 141$, 203 и 218 мкм. По результатам экспериментов методом анализа сформированности первого кольца бесселевой моды с помощью специально написанной программы определены зоны формирования бесселевых пучков, которые согласуются с численными расчетами в рамках скалярной теории дифракции. При увеличении периода аксиконов (с 2 до 3 мм), границы зоны «бездифракционности» бесселевой моды увеличиваются, что в свою очередь согласуется с аналитическими оценками [6]. Получены оценки энергетической эффективности отражающих аксиконов, значения которых зависят от качества изготовления элементов. С помощью интерферометра Маха — Цендера (см. рисунок) получены интерференционные картины бесселевого и гауссового пучков, по которым определены топологические заряды.

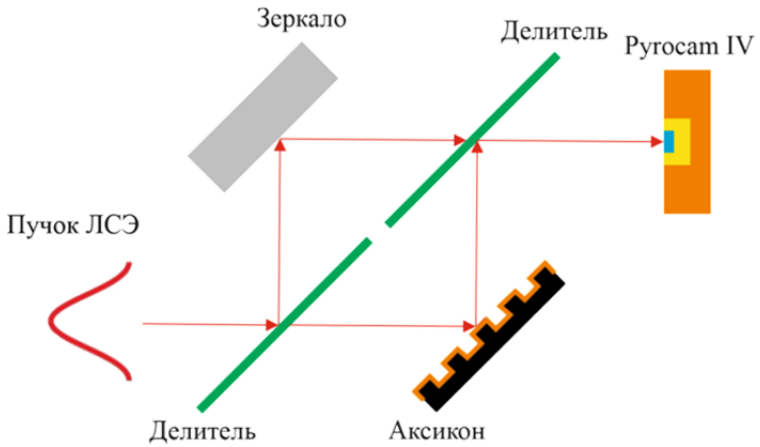


Схема определения топологического заряда бесселевого пучка в интерферометре Маха — Цендера

Заключение

С помощью отражающих элементов сформированы бесселевы пучки и определена зона их «бездифракционности». Численно и экспериментально получены оценки энергетической эффективности аксиконов, которые согласуются между собой в пределах экспериментальной погрешности. Экспериментально сформированы интерференционные картины гауссова и бесселевого пучков, которые коррелируют с результатами моделирования.

Благодарность

В работе использовалось оборудование центра коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения» на базе уникальной научной установки «Новосибирский лазер на свободных электронах» в ИЯФ СО РАН.

Список источников

[1] *Harter T., Ummethala S., Blaicher M. et al.* Wireless THz link with optoelectronic transmitter and receiver // Optica. 2019. Vol. 6. № 8. Art. no. 1063. https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.001063

[2] *Durnin J., Miceli J.J., Eberly J.H.* Diffraction-free beams // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58. № 15. P. 1499–1501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.1499

[3] *Pavelyev V.S., Komlenok M.S., Volodkin B.O. et al.* Fabrication of High-effective Silicon Diffractive Optics for the Terahertz Range by Femtosecond Laser Ablation // Physics Procedia. 2016. Vol. 84. P. 170–174. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.030

[4] *Agafonov A.N., Volodkin B.O., Kaveev A.K. et al.* Silicon diffractive optical elements for high-power monochromatic terahertz radiation // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2013. Vol. 49. № 2. P. 189–195. https://doi.org/10.3103/S875669901302012X

[5] *Shevchenko O.A., Shevchenko O.A., Vinokurov N.A., Arbuzov V.S. et al.* The Novosibirsk Free-Electron Laser Facility // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83. № 2. P. 228–231. https://doi.org/10.3103/S1062873819020278

[6] *Knyazev B.A., Pavelyev V.S.* Optimization of parameters of binary phase axicons for the generation of terahertz vortex surface plasmon polaritons on cylindrical conductors // Computer Optics. 2020. Vol. 44. № 5. P. 852–856. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-726

Using reflective axicons to create terahertz Bessel beams

N.A. Bazdyrev[1, 2], V.V. Gerasimov[1, 3], V.S. Pavelyev[4], A.N. Agafonov[4], K.N. Tukmakov[4]

[1] *Budker Institute of Nuclear Physics of the SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[2] *Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia*
[3] *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*
[4] *Samara University, Samara, Russia*

The report presents the results on the formation of terahertz (THz) Bessel beams with topological charges |l| = 3 and |l| = 9 at wavelengths 141, 203 and 218 μm. Axicons with periods p = 2 and 3 mm were fabricated by reactive-ion etching and laser ablation on silicon with subsequent deposition of an opaque copper layer. The zones of formation of Bessel beams are determined, which are consistent with numerical calculations in the framework of scalar diffraction theory, and estimates of the energy efficiency of reflective axicons are obtained. The topological charges of the obtained Bessel beams were defined using a Mach — Zehnder interferometer.

Keywords: *Bessel beams, terahertz radiation, reflective axicons, wireless data transmission, free electron laser*

Топологические свойства мод петлевых дефектов в двумерных фотонных кристаллах

Е.О. Смолина

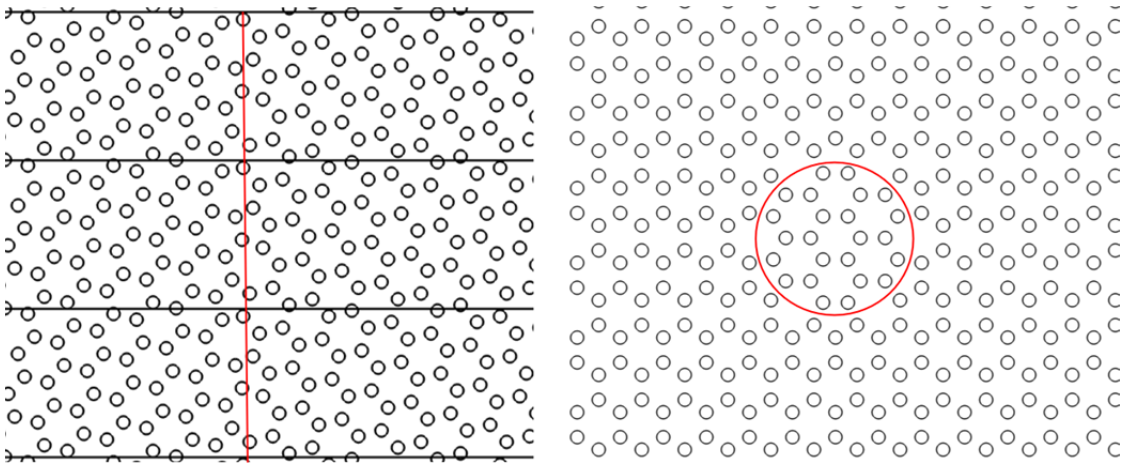
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия

В работе исследуются связанные моды топологических дефектов в наноструктурированных фотонных метаповерхностях. С помощью теоретического анализа, основанного на эффективной Дираковской модели, показана топологическая устойчивость таких состояний к локальным деформациям и беспорядку. Рассмотрены прямолинейные и круглые замкнутые границы доменов, формирующие топологический дефект. Предложены реалистичные параметры метаповерхностей, при которых наблюдение таких мод становится доступным экспериментально. Полученные результаты открывают перспективы для создания устойчивых к беспорядку и несовершенствам изготовления функциональных фотонных элементов.

Ключевые слова: *фотонные кристаллы, топологические дефекты, топологическая устойчивость, интегральная фотоника, дираковская модель*

Фотоника играет ключевую роль в современных технологиях, обеспечивая развитие высокоэффективных систем связи, медицинской диагностики, сенсоров и других приложений. Одним из перспективных направлений является интегральная фотоника, которая способствует прогрессу в области высокоскоростных вычислений и передачи данных. Однако традиционные фотонные устройства являются чувствительными к технологическим несовершенствам — даже небольшие отклонения в структуре материала могут вызывать рассеяние света и потерю информации [1]. Решением этой проблемы может стать использование принципов топологической фотоники, где исследуются моды, устойчивые к возмущениям. Такие моды могут локализоваться на топологических дефектах [2, 3].

В работе рассматриваются двумерные фотонные системы и анализируются условия формирования топологически защищенных мод на прямых и замкнутых границах раздела областей (см. рисунок). Теоретический анализ проводился как в приближении уравнений Дирака (континуальный предел), так и в рамках метода сильной связи (решеточной модели). Такая модель представляет значительный интерес, поскольку соответствует так называемым «границам зерен» в системах с графеноподобной решеткой. Эти структуры рассматриваются как важные примеры топологических дефектов в реальном физическом пространстве.



Схематическое изображение геометрии рассматриваемых в работе топологических дефектов: прямых (слева) и замкнутых (справа) «границ зерен»

Рассмотрение включало два типа геометрий границ зерен: прямые (протяженные) и замкнутые (петлевые). Для случая прямой границы была исследована взаимосвязь между топологическими свойствами системы в реальном пространстве и ее характеристиками в импульсном представлении. В частности, был вычислен топологический инвариант — фаза Зака, которая играет ключевую роль в классификации топологических систем. Анализ позволил установить условия, при которых на такой границе возникают топологически защищенные локализованные состояния.

Для замкнутых границ зерен, таких как петлевые дефекты, был развит формализм, основанный на использовании функций Ванье, адаптированный к данной геометрии. Такой подход позволил

строго обосновать существование мод с нетривиальной топологией, локализованных вдоль замкнутой линии топологического дефекта.

Кроме того, были подобраны параметры реалистичных метаповерхностей, реализуемых в современных экспериментальных условиях, при которых наблюдение указанных мод становится принципиально возможным. В частности, было проведено полномасштабное трехмерное моделирование в рамках стационарной системы уравнений Максвелла мод предложенных систем.

Полученные результаты позволят создать основу для проектирования новых фотонных устройств, устойчивых к несовершенствам изготовления. Кроме того, работа направлена на углубление фундаментального понимания природы фотонных Дираковских мод и формирование базы для их практического использования. Это представляет особую важность для применения в квантовых коммуникациях, высокоточных сенсорах и интегральной оптике.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-22-00386.

Список источников

[1] *Lu L., Joannopoulos J.D., Soljacic M.* Topological photonics // Nature Photonics. 2014. Vol 8. № 11. P. 821–829.

[2] *Lin Z.-K., Wang X.-R., Zhu X.-Y. et al.* Topological phenomena at defects in acoustic, photonic and solid-state lattices // Nature Reviews Physics. 2023. Vol 5. № 8. P. 483–495.

[3] *Smolina E.O., Stepikhova M.V.* Loop Defects in Honeycomb Photonic Crystals // Physica status solidi (RRL). Rapid Research Letters. 2025. Art. no. 2400247.

Topological properties of loop defect modes in two-dimensional photonic crystals

E.O. Smolina

Institute of Applied Physics named after A.V. Gaponov-Grekhov RAS, Nizhny Novgorod, Russia

This work investigates localized modes of topological defects in photonic metasurfaces. Using a theoretical approach based on an effective Dirac model, the topological robustness of these states against local deformations and disorder is demonstrated. Both straight and circular domain boundaries forming topological defects are considered. Realistic metasurface parameters are proposed to make experimental observation feasible. The results pave the way for developing functional photonic components that are resilient to fabrication imperfections and structural disorder.

Keywords: *photonic crystals, topological defects, topological robustness, integrated photonics, Dirac model*

Самовосстановление поляризационной структуры векторных пучков света при секторном возмущении

С.И. Якубов, М.В. Брецько, С.И. Халилов, Я.Е. Акимова

Физико-технический институт «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», Симферополь, Россия

Целью работы было исследование влияния секторных возмущений на поляризационную структуру векторных TE и TM мод. Для количественного анализа предложена интегральная характеристика степени восстановления поляризации, основанная на нормированных параметрах Стокса. В результате проведенного численного моделирования и экспериментальной проверки, показано, что при малых углах секторного возмущения, пучки сохраняют высокую степень восстановления поляризации и эффект самовосстановления проявляется уже на расстояниях порядка длины Рэлея. С увеличением сектора возмущения происходит частичное восстановление поляризационной структуры исходных векторных мод. Выявлено, что TM-мода проявляет большую локальную устойчивость, хотя интегральная степень восстановления отличается от TE-моды незначительно.

Ключевые слова: *оптический вихрь, поляризационные сингулярности, секторное возмущение, параметры Стокса*

Введение

В последние годы, наблюдается активный интерес к исследованию структурированных пучков света. Было показано, что такие пучки способны переносить орбитальный угловой момент, совмещать фазовые и поляризационные свойства, а также демонстрировать эффект самовосстановления после воздействия внешних возмущений [1, 2]. Одним из ключевых направлений в изучении структурированных пучков является анализ их устойчивости к различного рода внешним воздействиям. В данной работе представлено исследование влияния секторных возмущений, как модели частичного перекрытия пучка, на пространственную поляризационную структуру векторных мод и количественно оценить их способность восстанавливать исходную конфигурацию в процессе распространения. Понимание этих механизмов является важным для развития мультиплексированных каналов оптической связи, векторной визуализации и оптической манипуляции [3].

Модель возмущенного пучка

В общем случае поле скалярного оптического вихря с нулевым радиальным числом в плоскости $z = 0$ в радиальных координатах может быть представлено как:

$$LG_{0,\ell}(r,\varphi) = (r/w_0)^{|\ell|} \cdot exp[i\ell\varphi] \cdot exp[-(r/w_0)^2], \quad (1)$$

где $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, ℓ — топологический заряд, $\varphi = arctan\left[\frac{y}{x}\right]$, w_0 — перетяжка гауссова пучка.

При прохождении оптического вихря (1) через непрозрачный экран в виде углового сектора представим исходный вихревой пучок в виде разложения по собственным модам [4, 5], это позволит учесть влияние экранирования на его пространственную структуру и эволюцию

$$\psi_\ell(r,\varphi,z|\alpha) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{\ell,m}\, LG_m(r,\varphi,z), \quad (2)$$

коэффициенты мод $C_{\ell,m}$ определяются как [4, 5]

$$C_{\ell,m} = \frac{\pi-\alpha}{\pi} \cdot (-1)^{\ell-m} \cdot \frac{\Gamma\left[\frac{|\ell|+|m|}{2}+1\right]}{2^{\frac{|\ell|-|m|}{2}}|m|!} sinc[(\ell-m)(\pi-\alpha)], \quad (3)$$

где $\Gamma[\times]$ — гамма-функция, $sinc[\times]$ — функция кардинального синуса, 2α — угол сектора.

Как показано в работах [4, 5], при прохождении оптического вихря через непрозрачный сектор с углом α, его амплитудно-фазовая структура существенно искажается. Для построения соответствующего векторного пучка используют суперпозицию двух ортогонально циркулярно-поляризованных вихрей с одинаковым амплитудным профилем и противоположными топологическими зарядами:

$$\boldsymbol{vLG}(r,\varphi,z|\alpha,\phi) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\psi_{-\ell}(r,\varphi,z|\alpha)\boldsymbol{e}_- + e^{i\phi}\psi_{+\ell}(r,\varphi,z|\alpha)\boldsymbol{e}_+\right], \quad (4)$$

где $\boldsymbol{e}_\pm$ — единичные векторы круговой (лево- и право-) поляризации в поперечной плоскости, ϕ — относительная фаза, определяющая тип векторной моды (HE, TM, TE и др.). В качестве примера

рассмотрим возмущенную *TE*-моду. Расчет параметров Стокса [6, 7] позволил получить пространственные распределения поляризации на разных расстояниях *z* (см. рис. 1).

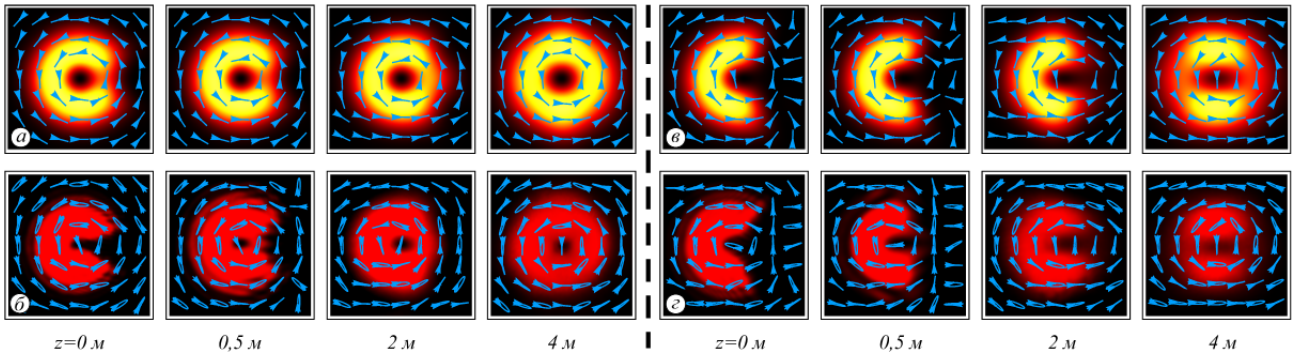


Рис. 1. Распределение поляризации на фоне интенсивности векторного сингулярного пучка, возмущенного секторной диафрагмой с углом $\alpha = \pi/10$ (*а*, *б*) и $\alpha = \pi/4$ (*в*, *г*) вдоль оси z для $w_0 = 3$ м, $\lambda = 633$ нм, (*а*, *в*) — теория, (*б*, *г*) — эксперимент

Экспериментальная установка

Для генерации векторных структурированных пучков нами была собрана установка, представленная на рис. 2. Линейно поляризованный гауссов пучок от He–Ne лазера (*LS*) с длинной волны $\lambda = 633$ нм, после прохождения пространственного фильтра (*SLF*), направляется на $\lambda/2$ пластину. С ее помощью производится поворот вектора поляризации пучка в соответствии с осью кристалла Q-пластины (*Q*) для получения векторных TM- и TE-мод. Для внесения секторного возмущения, использовались сменяемые клинья (SM) с различными углами (2α), которые крепились на 2-х осевую подвижку, с микровинтами для точной настройки.

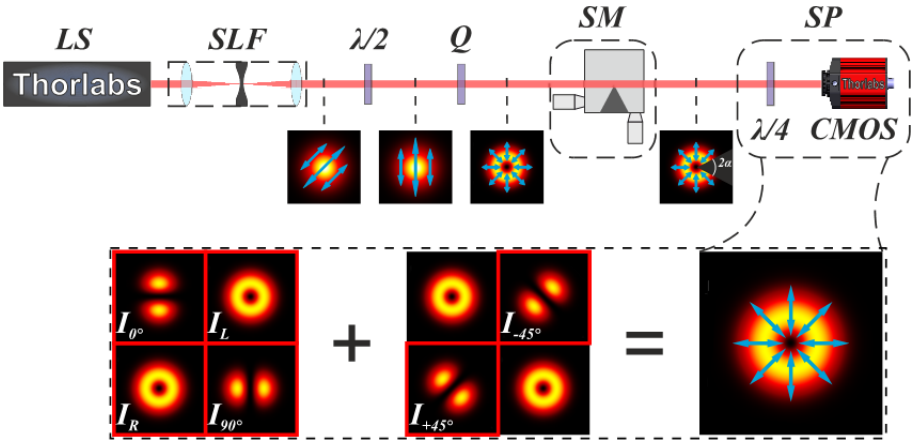


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Для анализа пространственного распределения поляризационной структуры и интенсивности векторного пучка после прохождения секторного возмущения применялся Стокс-поляриметр (*SP*), включающий четвертьволновую пластину (*λ/4*) и поляризационную камеру Thorlabs Kiralux CMOS CS505MUP. Камера обеспечивает одновременную регистрацию четырех компонент Стокса: линейно поляризованные — $I_{0°}$, $I_{90°}$, лево- и право- циркулярно поляризованные — I_L и I_R. Для получения оставшихся двух линейных компонент ($I_{+45°}$, $I_{-45°}$), ось $\lambda/4$ пластины поворачивалась на 45°, после чего производился второй снимок.

Степень самовосстановления

Для количественной оценки самовосстановления поляризационной структуры векторного пучка вводится степень восстановления $\eta(z, \alpha)$, основанная на параметрах Стокса, которые полностью описывают поляризационное состояние поля. Она определяется как интеграл скалярного произведения нормализованных векторов Стокса до и после возмущения по поперечному сечению пучка (3).

$$\eta(z,\alpha) = \iint_A S_0^{(0)}(z,x,y)\frac{\vec{S}^{(0)}(z,x,y)}{\|\vec{S}^{(0)}(z,x,y)\|}\cdot\frac{\vec{S}^{(\alpha)}(z,x,y)}{\|\vec{S}^{(\alpha)}(z,x,y)\|}dxdy\Big/\iint_A S_0^{(0)}(z,x,y)dxdy, \quad (3)$$

здесь $\vec{S}^{(0)}(x,y)$ и $\vec{S}^{(\alpha)}(x,y,z)$ — векторы параметров Стокса, описывающие локальное поляризационное состояние до и после возмущения соответственно, а $S_0^{(0)}(x,y)$ — интенсивность исходного поля, интегрирование производится по поперечному сечению пучка *A*. Степень восстановления отражает среднюю угловую близость поляризационных состояний пучка до и после возмущения. Так как нормированные векторы Стокса соответствуют точкам на сфере Пуанкаре, их скалярное произведение дает косинус угла между поляризациями. Значение $\eta = 1$ означает полное совпадение, снижение указывает на искажения, а $\eta < 0$ — угол между локальными векторами поляризации до и после возмущения превышает π, что соответствует переориентации поляризации в направлении, противоположном исходному. Подобный подход применялся ранее в работах, посвященных изучению устойчивости поляризационных структур векторных и сингулярных пучков [8]. На рис. 3 представлены численно рассчитанные зависимости степени восстановления поляризационной структуры *TE*- и *TM*- мод от расстояния распространения *z* при различных значениях угла секторного возмущения *α*.

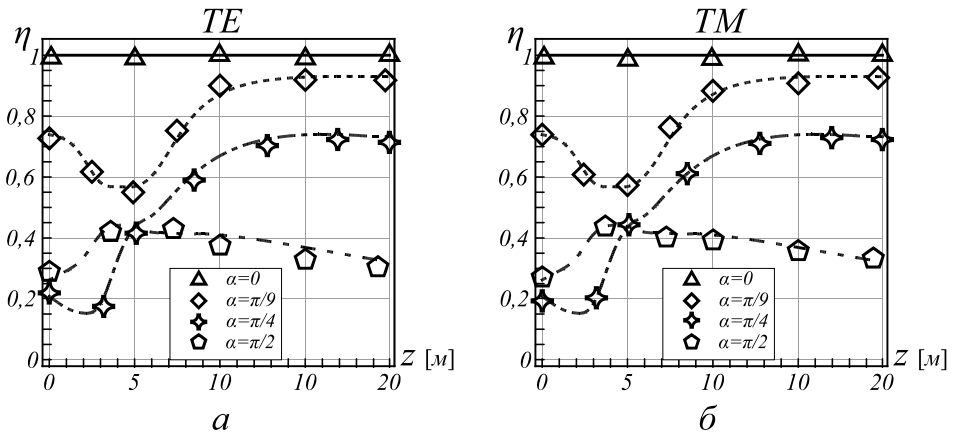


Рис. 3. Степень восстановления поляризации (*а*) — *TE* и (*б*) — *TM* мод вдоль оси z при различных углах секторного возмущения для $\ell = \pm 1, \mathrm{w}_0 = 3$ м, $\lambda = 633$ нм

Заключение

Продемонстрированно, что при малых углах сектора ($\alpha \leq \pi/9$) наблюдается высокая степень восстановления поляризации на расстояниях порядка длины Рэлея. При $\alpha = \pi/4$ структура пучка искажается в ближней зоне, но почти полностью восстанавливается в дальней. При $\alpha = \pi/2$ восстановление ограничивается значением $\eta \approx 0{,}5$, указывая на существенные потери информации. При этом у *TM*-моды структура эллипсов поляризации имеет более упорядоченную структуру, но их средняя степень восстановления лишь незначительно превышает значения для *TE*-мод из-за вклада периферийных областей. Экспериментальные данные подтверждают результаты моделирования как по форме эллипсов, так и по общей степени восстановления в зависимости от угла сектора и расстояния распространения.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 24-22-00278).

Список источников

[1] *Ghaderi Goran Abad M., Mahmoudi M.* Laguerre-Gaussian modes generated vector beam via nonlinear magneto-optical rotation // Sci. Rep. 2021. Vol. 11, № 1. Art. no. 5972. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85249-8

[2] *Khonina S.N., Porfirev A.P.* Harnessing of inhomogeneously polarized Hermite–Gaussian vector beams to manage the 3D spin angular momentum density distribution // Nanophotonics. 2022. Vol. 11, № 4. P. 697–712. https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0418

[3] *Forbes A.* Structured light tailored for purpose // Opt. Photonics News. 2020. Vol. 31, № 6. P. 24–31. https://doi.org/10.1364/OPN.31.6.000024

[4] *Воляр А.В., Брецько М.В., Акимова Я.Е., Егоров Ю.А., Милюков В.В.* Секторное возмущение вихревого пучка: энтропия Шеннона, орбитальный угловой момент и топологический заряд // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43, № 5. С. 723–734. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2019-43-5-723-734

[5] *Ковалев А.А.* Орбитальный угловой момент суперпозиций оптических вихрей после прохождения через секторную диафрагму // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 2. С. 196–203. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1072

[6] *Dennis M.R.* Polarization singularities in paraxial vector fields: morphology and statistics // Opt. Commun. 2002. Vol. 213, № 4. P. 201–221. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02088-6

[7] *Born M., Wolf E.* Principles of Optics. Oxford: Pergamon Press, 1959. 808 p.

[8] *Manisha, Joshi S., Khan S.N., Kanseri B., Senthilkumaran P.* Full characterization of partially coherent vector vortex beams via generalized Stokes parameters // Opt. Lett. 2025. Vol. 50, № 12. P. 3074–3077. https://doi.org/10.1364/OL.50.003074

Self-healing of the polarization structure in vector beams subjected to sector perturbation

S.I. Yakubov, M.V. Bretsko, S.I. Khalilov, Ya.E. Akimova, A.V. Volyar

Physics and Technology Institute of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

The aim of the work was to study the influence of sector disturbances on the polarization structure of vector TE and TM modes. For quantitative analysis, an integral characteristic of the degree of polarization restoration based on normalized Stokes parameters is proposed. As a result of the numerical modeling and experimental verification, it is shown that at small angles of sector disturbance, the beams retain a high degree of polarization restoration and the self-restoration effect manifests itself already at distances of the order of the Rayleigh length. With an increase in the disturbance sector, a partial restoration of the polarization structure of the original vector modes occurs. It is revealed that the TM mode exhibits greater local stability, although the integral degree of restoration differs from the TE mode insignificantly.

Keywords: *optical vortex, polarization singularities, sector perturbation, Stokes parameters*

Преобразование поляризационной структуры векторного структурированного пучка света при астигматическом преобразовании

С.И. Халилов, М.В. Брецько, С.И. Якубов, Я.Е. Акимова, А.В. Воляр

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

Работа посвящена исследованию влияния астигматического преобразования на векторные структурированные пучки Лагерра — Гаусса при прохождении через цилиндрическую линзу. Показано, что такие пучки демонстрируют сложные изменения в своей фазовой и поляризационной структуре под действием цилиндрической линзы, что приводит к рождению, слиянию и аннигиляции поляризационных сингулярностей, включая C-точки и V-точки, а также к изменению топологии эллипсов поляризации. Результаты позволяют лучше понять устойчивость и преобразуемость векторных мод при прохождении через оптические элементы с асимметрией и могут быть полезны для управления состояниями света в современных фотонных устройствах.

Ключевые слова: *структурированный свет, ABCD-матрица, векторные моды, поляризационные сингулярности*

Введение

Современные оптические технологии стремительно развиваются, расширяя возможности управления световыми полями [1] за счет применения различных оптических элементов и физических свойств света [2]. Например, системы, использующие астигматические компоненты при этом структурированные Лагерр — Гауссовы (сЛГ) пучки демонстрируют существенное преобразование фазовой и амплитудной структуры [3]. Поэтому целью нашей работы явилось теоретическое и экспериментальное исследование астигматического преобразования стандартных векторных сЛГ пучков.

Модель пучка

В работе будем использовать сЛГ пучок, записанный в виде конечной суммы мод ЭГ [4]

$$sLG_{n,\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)=\frac{(-1)^n}{2^{2n+3\ell/2}n!}\sum_{k=0}^{2n+\ell}(2i)\left(1+\varepsilon e^{ik\theta}\right)P_k^{(n+\ell-k,n-k)}(0)HG_{2n+\ell-k,k}(\boldsymbol{r}), \quad (1)$$

где $\boldsymbol{r}=(x,y)$, $P_k^{(n+\ell-k,n-k)}(\bullet)$ — многочлен Якоби, $HG_{2n+\ell-k,k}(\boldsymbol{r})$ — моды ЭГ, ε — управляющий амплитудный и θ — фазовый параметр [3].

Пусть сЛГ пучок (1) с радиальным числом n и азимутальным числом ℓ, падает на цилиндрическую линзу с фокусным расстоянием f_x имеющий длину Рэлея равную $z_0=kw_0$. Такой сЛГ пучок преобразуется в астигматический (асЛГ), имеющий комплексную амплитуду $asLG_{n,\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)$ рассчитанную ранее в работе [3] формула (15). При $\theta=0$ и $\varepsilon=1$ наш сЛГ пучок превращается в стандартную моду ЛГ.

Для формирования векторного оптического вихря необходимо сложить два ортогонально циркулярно-поляризованных оптических вихря с одинаковыми амплитудными профилями, но противоположными по знаку топологическими зарядами и определенной относительной фазовой разностью

$$\boldsymbol{asLG}_{n,\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)=asLG_{n,+\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)\boldsymbol{e}_-+e^{i\phi}asLG_{n,-\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)\boldsymbol{e}_+, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{e}_\pm$ — единичные векторы круговой (лево- и право-) поляризации в поперечной плоскости, ϕ — начальная относительная фаза между двумя компонентами, меняя значения которой можно получить такие векторные моды как *TM* и *TE*.

Для анализа тонкой поляризационной структуры использовали параметры Стокса, которые позволяют описывать тип поляризации и ее ориентацию. Ниже приводится выражения для численного моделирования (слева) в циркулярном базисе и стоксовые компоненты (справа) для экспериментального построения:

$$S_0=|\psi_R|^2+|\psi_L|^2,\ S_1=2\,Re(\psi_R\psi_L^*),\ S_2=2\,Im(\psi_R\psi_L^*),S_3=|\psi_R|^2-|\psi_L|^2, \quad (3)$$

где S_0 представляет собой полную интенсивность поля, S_1 и S_2 описывают линейную поляризацию (с разной ориентацией оси эллипса), а S_3 характеризует степень круговой поляризации и напрямую связан со спиновым угловым моментом света, а $\psi_R=asLG_{n,+\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)$ соответствует право циркулярной компоненте пучка, а $\psi_L=e^{i\phi}asLG_{n,-\ell}(\boldsymbol{r},\varepsilon,\theta)$ лево циркулярной компоненте пучка.

Эксперимент

Основными задачами нашего экспериментального исследования были, прежде всего, формирование векторного пучка по формуле (2) и исследование его астигматического преобразования. Для этого мы использовали экспериментальную установку, представленную на рис. 1 которая состояла из узла для формирования векторного пучка и узла астигматического преобразования, которые ранее были использованы в наших работах [4] и [3] соответственно.

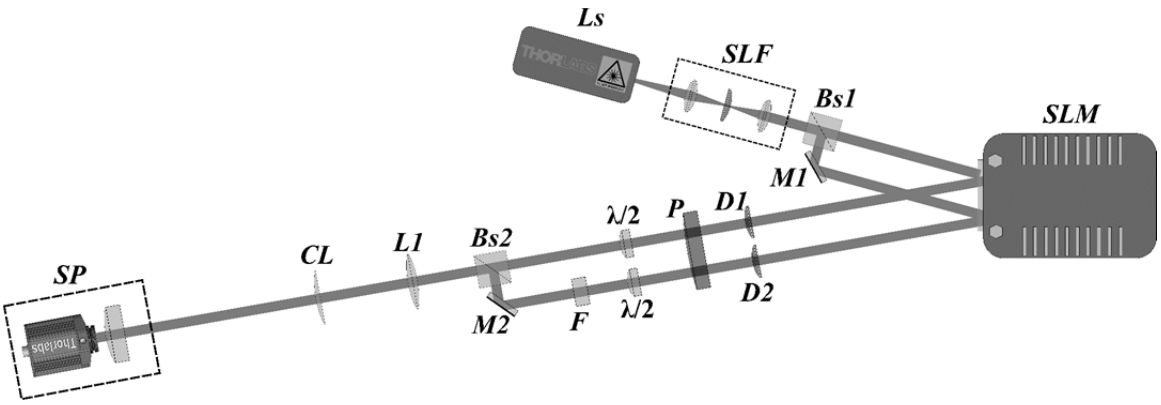


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: $Ls-He-Ne$ лазер ($\lambda = 0{,}633$ мкм), SLF — пространственный световой фильтр, M — зеркало, Bs — делительная призма, SLM — пространственный модулятор света, D — диафрагма, P — поляризатор, $\lambda/2$ — полуволновая пластина, F — световой фильтр, $\lambda/4$ — четверть волновая пластина, $L_{1,2}$ — сферическая линза, CL — цилиндрическая линза, SP — Стокс-поляриметр

При помощи пространственного модулятора света (SLM) контролировали начальную фазу ϕ в уравнении (2) для формирования различных типов мод. Для создания корректного астигматического преобразования нужно чтобы длина Рэлея падающего пучка на цилиндрическую линзу (CL) была равна $z_0 = 2f_{CL}$ [3]. На рис. 2 представлена эволюция астигматического преобразование для векторных *TM* и *TE* мод. Эти распределения поляризации были построены при помощи ПО дифференциальный поляриметр [5].

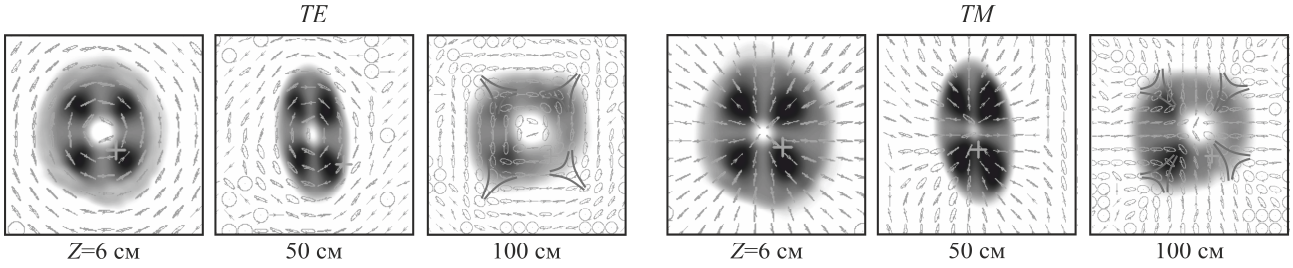


Рис. 2. Эволюция астигматического преобразования векторных TM и TE

Как видно на рис. 2, при астигматическом преобразовании *TE* и *TM* мод в двойном фокусном расстоянии цилиндрической линзы формируются поляризационные сингулярности типа «звезда» [6].

Заключение

В данной работе приведен анализ поляризационной структуры астигматических векторных *TE* и *TM* мод. Методом Стокс-поляриметрии показано, что в двойном фокусном расстоянии цилиндрической линзы формируются четыре поляризационные сингулярности типа «звезда».

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 24-22-00278).

Список источников

[1] *Forbes A., de Oliveira M., Dennis M.R.* Structured light // Nat. Photonics. 2021. Vol. 15. P. 253–262. https://doi.org/10.1038/s41566-021-00780-4

[2] *Porfirev A.P., Kovalev A.A., Kotlyar V.V.* Optical trapping and moving of microparticles using asymmetrical Bessel-Gaussian beams // Computer Optics. 2016. Vol. 40. № 2. P. 152–157. https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-2-152-157

[3] *Volyar A., Bretsko M., Khalilov S., Akimova Y.* Structurally Stable Astigmatic Vortex Beams with Super-High Orbital Angular Momentum (ABCD Matrix Approach) // Photonics. 2023. Vol. 10. № 9. Art. no. 1048. https://doi.org/10.3390/photonics10091048

[4] *Khalilov S.I., Bretsko M.V., Akimova Y.E. et al.* Digital Sorting of Structured Vector LG Beams by the Moment of Intensity Method // Optical Memory and Neural Networks. 2023. Vol. 32. № 1. P. S90–S96. https://doi.org/10.3103/S1060992X23050089

[5] *Воляр А.В., Фадеева Т.А.* Диференціальний поляриметр // Патент № 65939 Укр. 2004.

[6] *Dennis M.R.* Polarization singularities in paraxial vector fields // Optics Communication. 2002. Vol. 213. № 4–6. P. 201–221. https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)02088-6

Proceedings transformation of the polarization structure of a vector structured light beam under astigmatic transformation

S.I. Khalilov, M.V. Bretsko, S.I. Yakubov, Ya.E. Akimova, A.V. Volyar

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

The paper is devoted to the study of the influence of astigmatic transformation on vector structured Laguerre — Gaussian beams when passing through a cylindrical lens. It is shown that such beams demonstrate complex changes in their phase and polarization structure under the action of a cylindrical lens, which leads to the creation, merging and annihilation of polarization singularities, including C-points and V-points, as well as to a change in the topology of polarization ellipses. The results allow us to better understand the stability and transformability of vector modes when passing through optical elements with asymmetry and can be useful for controlling light states in modern photonic devices.

Keywords: *structured light, ABCD matrix, vector modes, polarization singularities*

Фурье-модальный метод с аналитическими кусочно-непрерывными функциями для эффективного анализа дифракции на одномерных решетках с произвольными профилями

С.И. Спиридонов, А.А. Щербаков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлена улучшенная формулировка Фурье-модального метода (ФММ) для случая решеток произвольного профиля, периодичных в одном направлении, являющаяся обобщением предыдущей работы авторов. Предлагаемый подход явно учитывает наклонные граничные условия для разрывной и непрерывной компонент электрического поля в каждом слое разложения профиля решетки, что приводит к новым матричным уравнениям и позволяет снизить влияние эффекта Гиббса. Результаты численных расчетов в сравнении с классическим ФММ демонстрируют значительное улучшение расчета ближнего поля структуры. Разработанный подход может найти применение в задачах поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии, нелинейной оптики и разработке сенсорных устройств.

Ключевые слова: *оптика, Фурье-модальный метод, ФММ, решетки с наклонными стенками, решетки произвольного профиля, ближнее поле*

Введение и основная часть

Фурье-модальный метод (ФММ), также известный в литературе как строгий анализ связанных волн (RCWA) [1], представляет собой численный метод для моделирования взаимодействия электромагнитных волн с периодическими структурами. Благодаря своей универсальности и относительной простоте реализации ФММ приобрел большую популярность в научном сообществе. Этот метод состоит из трех этапов: сначала рассматривается система уравнений Максвелла с использованием теоремы Блоха в усеченном пространстве Фурье. Затем система дифференциальных уравнений сводится к задаче на собственные значения. Наконец, используются подходы матрицы переноса и матрицы рассеяния для определения порядков дифракции. Одним из основных недостатков FMM является хорошо известный эффект Гиббса, который неявным образом влияет на сходимость метода и искажает расчет ближнего поля структуры. Проблема частично решается с помощью так называемых правил факторизации Ли [2], которые значительно улучшают сходимость, и подхода Ф. Лаланна и М. Вайсмана для расчета ближнего поля [3, 4]. Однако полностью устранить влияние эффекта Гиббса пока не удалось. В недавней работе авторов доклада [5] был предложен переформулированный Фурье-модальный метод, в котором аналитически учитываются граничные условия разрывной и непрерывной компонент электрического поля внутри структуры. Подход был проверен на простейшем примере одномерной фотонно-кристаллической пластины с прямыми стенками и продемонстрировал высокую эффективность по сравнению с другими решениями.

Однако случай решеток произвольного профиля более интересен из-за возможности более гибкого управления оптическими параметрами. Для моделирования таких структур классический ФММ требует ступенчатой аппроксимации профиля решетки тонкими слоями с прямыми стенками [6, 7]. Однако этот подход не учитывает наклонные границы срезов, что снижает точность расчетов. В связи с этим был предложен подход и успешно используется подход, учитывающий наклон стенок [8, 9]. Тем не менее, проблемы, связанные с влиянием эффекта Гиббса, остаются и в этом случае.

В этой работе представлено обобщение описанной выше формулировки [5] на случай решеток произвольного профиля, как альтернатива подходам [6–9]. В предлагаемом подходе структура произвольного профиля разбивается на тонкие слои с наклонными стенками, и затем, подобно случаю одномерной фотонно-кристаллической пластины с прямыми стенками, явно учитываются наклонные граничные условия разрывной и непрерывной компонент поля внутри каждого слоя.

Результаты численного моделирования показывают, что предложенный подход позволяет значительно точнее рассчитывать ближнее поле структуры в сравнении с классическим ФММ, значительно снизив влияние осцилляций, вызванных эффектом Гиббса. На рис. 1 представлен пример структуры с профилем в форме трапеции. На рис. 2 представлены результат расчета модуля проекции электрического поля в середине структуры на ось периодичности для кремниевой структуры с периодом, в два раза большим длины волны излучения для 35 гармоник разложения в ряд Фурье. На рис. 2, а) показан расчет классическим ФММ, на рис 2, б) с помощью предлагаемого подхода. Видно, что во втором случае осцилляции Гиббса отсутствуют.

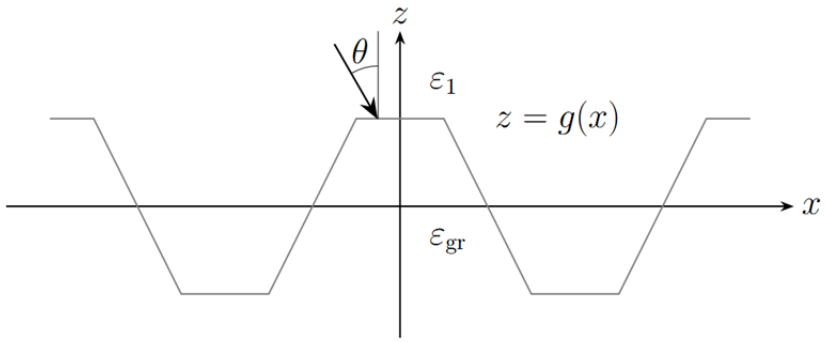
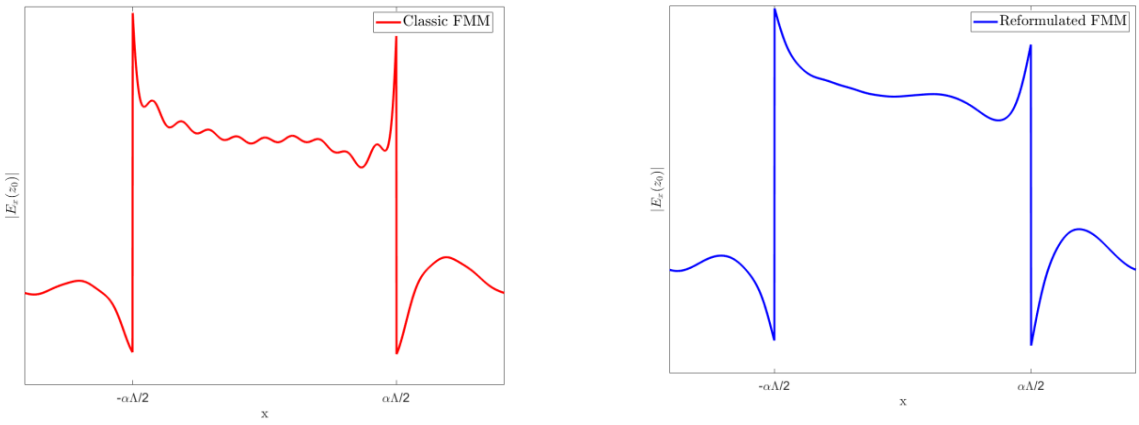


Рис. 1. Пример структуры с профилем в виде трапеции



а) б)

Рис. 2. Пример расчета поля структуры: а) — классический ФММ; б) — новая формулировка

Заключение

Предложенная формулировка Фурье-модального метода с аналитическими кусочно-непрерывными функциями позволяет значительно точнее рассчитывать ближнее поле структур произвольного профиля в сравнении с классическим подходом, сохранив все его преимущества. Разработанный подход может найти применение в задачах поверхностно-усиленной рамановской спектроскопии, нелинейной оптики и разработке сенсорных устройств.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00153-П).

Список источников

[1] *Moharam M.G., E.B. Grann, D.A. Pommet, T.K. Gaylord* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings // Journal of the Optical Society of America A. 1995. Vol. 12. № 5. P. 1068–1076.

[2] *Li L.* Use of Fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures // Journal of the Optical Society of America A. 1996. Vol. 13. № 9. P. 1870–1876.

[3] *Lalanne P., Jurek M.P.* Computation of the near-field pattern with the coupled-wave method for transverse magnetic polarization // Journal of modern optics. 1998. Vol. 45. № 7. P. 1357–1374.

[4] *Weismann M., Gallagher D.F.G., Panoiu N.C.* Accurate near-field calculation in the rigorous coupled-wave analysis method // Journal of Optics. 2015. Vol. 17. № 12. Art. no. 125612.

[5] *Spiridonov S., Shcherbakov A.A.* Reformulated Fourier Modal Method with improved near field computations // Journal of Computational Science. 2023. Vol. 67. Art. no. 101936.

[6] *Moharam M.G., Gaylord T.K.* Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings // Journal of the Optical Society of America. 1982. Vol. 72. № 10. P. 1385–1392.

[7] *Peng S., Morris G.M.* Efficient implementation of rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings // Journal of the Optical Society of America A. 1995. Vol. 12. № 5. P. 1087–1096.

[8] *Popov E., Nevière M.* Grating theory: new equations in Fourier space leading to fast converging results for TM polarization // Journal of the Optical Society of America A. 2000. Vol. 17. № 10. P. 1773–1784.

[9] *Gushchin I., Tishchenko A.V.* Fourier modal method for relief gratings with oblique boundary conditions // Journal of the Optical Society of America A. 2010. Vol. 27. № 7. P. 1575–1583.

Fourier Modal Method with analytical piecewise continuous functions for efficient diffraction analysis of one-dimensional gratings with arbitrary profile

S.I. Spiridonov, A.A. Scherbakov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

In this paper, we present the improved Fourier Modal Method for the case of one-dimensional gratings of arbitrary profile. The proposed approach explicitly takes into account the slanted boundary conditions for the discontinuous and continuous components of the electric field in each layer of the grating profile decomposition, that leads to new matrix equations and reduces the influence of the Gibbs effect. The results of numerical calculations demonstrate a significant improvement of the calculation of the near field inside the structure in comparison with the classical FMM. The developed approach can be used in the tasks of surface-enhanced Raman spectroscopy, nonlinear optics and the development of sensor devices.

Keywords: *optics, Fourier modal method, FMM, gratings with slanted walls, gratings of arbitrary profile, near field*

Влияние аберраций волнового фронта на ФРТ при острой фокусировке для различных типов поляризации

П.А. Хорин[1], Н.А. Ивлиев[1], А.В. Черных[1, 2], С.Н. Хонина[1, 3]

[1] *Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия*
[2] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *«Институт систем обработки изображений – Самара» КККиФ НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия*

Как правило, аберрации волнового фронта рассматриваются как негативный фактор, который приводит к искажениям формирования пучков или изображений. В данной работе численно исследуется влияние аберраций волнового фронта как на отдельные компоненты электрического поля, так и на полную интенсивность векторного поля при острой фокусировке для линейного типа поляризации. При моделировании использован формализм расчета поля в фокальной области в приближении Дебая. Получено, что в некоторых случаях специально внесенная аберрация может способствовать уменьшению размера светового пятна, особенно при острой фокусировке.

Ключевые слова: *волновые аберрации, острая фокусировка, поляризация*

Введение

Острая фокусировка (sharp focusing) — это метод позволяющий формировать предельно узкое и интенсивное фокального пятно. При такой фокусировке оптическая система обеспечивает максимальную пространственную локализацию энергии, что критически важно для приложений, требующих высокой концентрации света. В частности, используется для оптического манипулирования, ускорения электронов, обработки материалов, в микроскопии и других приложениях [1–4].

В статье представлено численное моделирование влияния аберраций волнового фронта при острой фокусировке лазерного излучения в приближении Дебая [5, 6]. Исследование направлено на анализ преобразований фокального распределения интенсивности, возникающих при наличии различных типов аберраций, включая астигматизм, кому, трилистник и четырехлистник. Особое внимание уделяется влиянию аберраций волнового фронта на отдельные компоненты электрического поля и на полную интенсивность векторного поля при острой фокусировке. Объективными критериями являются максимальная интенсивность, поперечный и продольный размеры, а также степень асимметрии, от величины и вида аберрационных искажений.

Результаты

Рассмотрим аберрированный волновой фронт, который описывается следующим уравнением [7, 8]:

$$w(r,\varphi)=\exp\left[\,i\frac{2\pi}{\lambda}\sum_{n,m}c_{nm}Z_n^m(r,\varphi)\right]\,\square \tag{1}$$

где фаза λ — длина волны излучения, c_{nm} — весовой коэффициент функций Цернике $Z_n^m(r,\varphi)$:

$$Z_n^m(r,\varphi)=\sqrt{\frac{n+1}{\pi\, r_0^2}}R_n^m(r)\begin{Bmatrix}\cos(m\varphi)\\ \sin(m\varphi)\end{Bmatrix},\quad |m|\le n,\quad (n-m)\ \text{— четное}, \tag{2}$$

где $R_n^m(r)$ — радиальные полиномы Цернике [9]:

$$R_n^m(r)=\sum_{p=0}^{(n-m)/2}\frac{(-1)^p(n-p)!}{p!\big((n+m)/2-p\big)!\big((n+m)/2-p\big)!}\left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-2p}, \tag{3}$$

Компоненты электрического поля при острой фокусировке можно вычислить по формулам следующим формулам [5, 6]:

$$\mathbf{E}(r,\varphi,z)=-\frac{if}{\lambda}\int_0^{\Theta}\int_0^{2\pi}T(\theta)F(\theta,\phi)\mathbf{P}(\theta,\phi)\exp\big[ik(r\sin\theta\cos(\phi-\varphi)+z\cos\theta)\big]\sin\theta d\theta d\phi, \tag{4}$$

где

$$\mathbf{P}(\theta,\phi)=\begin{bmatrix}A(\theta,\phi) & C(\theta,\phi)\\ C(\theta,\phi) & B(\theta,\phi)\\ -D(\theta,\phi) & -E(\theta,\phi)\end{bmatrix}\begin{pmatrix}c_x(\theta,\phi)\\ c_y(\theta,\phi)\end{pmatrix},$$

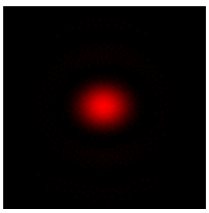
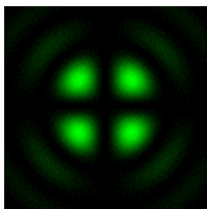
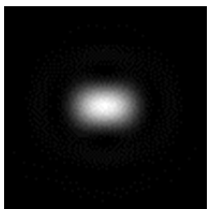
$$A(\theta,\phi)=1+\cos^2\phi(\cos\theta-1),\quad B(\theta,\phi)=1+\sin^2\phi(\cos\theta-1),$$
$$C(\theta,\phi)=\sin\phi\cos\phi(\cos\theta-1),\quad D(\theta,\phi)=\cos\phi\sin\theta,\quad E(\theta,\phi)=\sin\phi\sin\theta. \qquad (5)$$

В выражениях (4), (5) (r,φ,z) — цилиндрические координаты в фокальной области, (θ,ϕ) — сферические угловые координаты на выходе зрачка фокусирующей системы, sin(Θ)=NA — числовая апертура системы, F(θ,ϕ) — пропускающая (входная) функция, T(θ) — функция аподизации, k = 2π/λ — волновое число, λ — длина волны излучения, f — фокусное расстояние, $\left(c_x(\theta,\phi),\ c_y(\theta,\phi)\right)^T$ — вектор поляризационных коэффициентов входного поля.

При моделировании были использованы следующие параметры: λ=1 мкм, f=101 мкм, NA=0.99.

В табл. 1 показаны картины распределения интенсивности в фокальной плоскости для отдельных компонент и их суммы (полная) при различных типах однородной поляризации входного поля в виде ограниченной круговой апертурой радиусом R=100 мкм плоской волны.

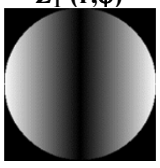
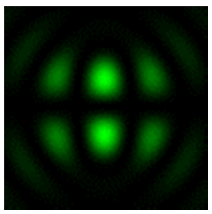
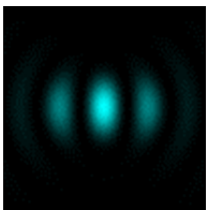
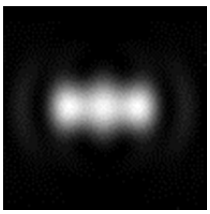
Таблица 1. Результаты острой фокусировки X-линейно поляризованного поля в отсутствии аберраций

Распределение интенсивности в фокальной плоскости			
X-компонента	Y-компонента	Z-компонента	Полная
			

По результатам, представленным в табл. 1, хорошо видно удлинение фокального пятна вдоль оси линейной поляризации, которое происходит из-за усиления продольной компоненты электрического поля при острой фокусировке (FWHMx=0.75λ, FWHMy=0.5λ).

В табл. 2 показаны картины распределения интенсивности в фокальной плоскости (FWHMx=1.5λ, FWHMy=0.64λ) при внесении в падающий плоский пучок с X-поляризацией для одного типа аберраций. Как видно, аберрация позволяют сформировать в одной из компонент электрического поля компактное центральное световое пятно. В частности, аберрации вида Z_n^1(r,φ) (n = 1 — наклон), нивелируют расщепление Z-компоненты (табл. 2).

Таблица 2. Результаты острой фокусировки X-линейно поляризованного поля при наличии аберраций

Тип аберрации	Распределение интенсивности в фокальной плоскости			
	X-компонента	Y-компонента	Z-компонента	Полная
Z_1^1(r,φ)  FWHMx = 1.5λ, FWHMy = 0.64λ				

Заключение

Таким образом, результаты моделирования острой фокусировки световых полей с однородной поляризацией (линейной) показали, что некоторые типы аберраций низкого порядка ($|m|$<2) позволяют сформировать в одной из компонент электрического поля компактное центральное световое пятно. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации систем фокусировки и минимизации аберрационных искажений в реальных оптических установках.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10101, https://rscf.ru/project/24-79-10101/ (в части численного моделирования), а также в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (в теоретической части).

Список источников

[1] *Salamin Y.I., Keitel C.H.* Electron acceleration by a tightly focused laser beam // Physical Review Letters. 2002. Vol. 88(9). Art. no. 095005.

[2] *Khonina S.N., Golub I.* How low can STED go? Comparison of different write-erase beam combinations for stimulated emission depletion microscopy // Journal of the Optical Society of America A. 2002. Vol. 29(10). P. 2242–2246.

[3] *Nivas J.J., Allahyari E., Cardano F. et al.* Vector vortex beams generated by q-plates as a versatile route to direct fs laser surface structuring // Appl. Surf. Sci. 2019. Vol. 471. P. 1028–1033.

[4] *Porfirev A., Khonina S., Kuchmizhak A.* Light-matter interaction empowered by orbital angular momentum: Control of matter at the micro-and nanoscale // Progress in Quantum Electronics. 2023. Vol. 88. Art. no. 100459. https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2023.100459.

[5] *Pereira S.F., Nes A.V.D.* Superresolution by Means of Polarisation, Phase and Amplitude Pupil Masks // Opt. Commun. 2004. Vol. 234. Art. no. 119.

[6] *Khonina S.N.* Vortex beams with high-order cylindrical polarization: features of focal distributions // Applied Physics B. 2019. Vol. 125. Art. no. 100. https://doi.org/10.1007/s00340-019-7212-1

[7] *Khorin P.A., Dzyuba A.P., Khonina S.N.* Optical wavefront aberration: detection, recognition, and compensation techniques — a comprehensive review // Optics & Laser Technology. 2025. Vol. 191. Art. no. 113342. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2025.113342

[8] *Wang J.Y., Silva D.E.* Wave-front interpretation with Zernike polynomials // Appl. Opt. 1980. Vol. 19 (9). P. 1510–1518.

[9] *Lakshminarayanan V., Fleck A.* Zernike polynomials: a guide // Journal of Modern Optics. 2011. Vol. 58 (7). P. 545–561.

Effect of wave front aberrations on the PSF at sharp focusing for different types of polarization

P.A. Khorin[1], N.A. Ivliev[2], A.V. Chernykh [1, 2], S.N. Khonina[1, 3]

[1] *Samara National Research University, Samara, Russia*
[2] *ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*
[3] *Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara, Russia*

Wave front aberrations are generally considered as a negative factor that leads to distortions in beam or image formation. In this paper, the influence of wave front aberrations on both individual components of the electric field and the total intensity of the vector field at sharp focusing for linear polarization is numerically investigated. The formalism of calculating the field in the focal region in the Debye approximation is used in the modeling. It is found that in some cases, a specially introduced aberration can contribute to a decrease in the size of the light spot, especially at sharp focusing.

Keywords: *wave aberrations, sharp focus, polarization*

Перестраиваемый генератор оптических вихрей на основе кубических уголковых отражателей

Д.Д. Решетников[1], А.А. Рыжая[2], М.Е. Павелина[1], Е.К. Юрьева[2], А.А. Севрюгин[2], А.Л. Соколов[3], В.М. Петров[1], В.Ю. Венедиктов[2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Целью работы является разработка и экспериментальное исследование генератора скалярных оптических вихрей 1-го порядка на основе поляризационного интерферометра Маха — Цендера с кубическими уголковыми отражателями. Предложена оригинальная оптическая схема такого генератора, а также результаты исследования зависимости структуры формируемых оптических пучков от относительной фазы в плечах интерферометра.

Ключевые слова: *оптика, структурированный свет, оптические вихри, кубические уголковые отражатели, поляризационный интерферометр*

Введение

Оптические пучки с ненулевым орбитальным угловым моментом (ОУМ) или оптические вихри широко используются в задачах оптической связи в открытом пространстве. Это обусловлено несколькими важными факторами: оптические вихри обладают большей устойчивостью к воздействию случайных фазовых искажений, по сравнению с пучками с плоским волновым фронтом [1], разработаны методы восстановления волнового фронта оптических вихрей, в том числе, с использованием искусственных нейронных сетей [2], кроме того, использование оптических вихрей в качестве алфавита для кодирования информации, сохраняет возможность применения мультиплексирования для увеличения информационной емкости каналов связи [3]. При этом «бутылочным горлышком» существующих систем является низкая скорость генерации оптических вихрей с различными значениями орбитального углового момента. Наиболее популярным методом является использование пространственных модуляторов света (SLM), скорость работы которых ограничена частотой 1 кГц. Предлагаемая в настоящей работе оптическая схема демонстрирует возможность построения быстрого генератора вихрей ±1 порядка на основе интерферометра Маха — Цендера с кубическими уголковыми отражателями. Изменение порядка оптического вихря осуществляется посредством модуляции фазы в одном из плеч интерферометра, для чего могут быть использованы резонансные объемные модуляторы фазы с частотой переключения до нескольких ГГц [4].

Описание метода

Свойствами оптических вихрей обладают Лагерр — Гауссовы моды с отличным от 0 значением азимутального числа l. Предлагаемый в данной работе способ генерации основан на известной связи Лагерр — Гауссовых мод и Эрмит — Гауссовых мод:

$$LG_{0,\pm1} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(HG_{0,1} \pm i \cdot HG_{1,0}\right).$$

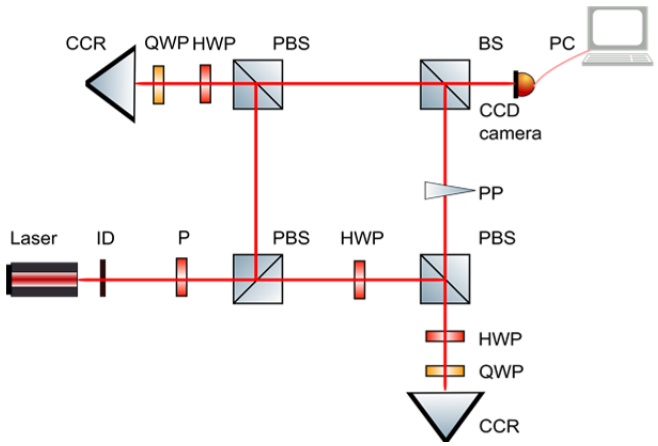
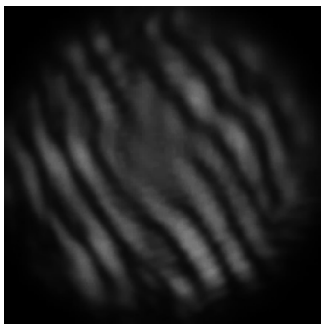


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Laser — HeNe лазер 635 нм, ID — диафрагма, P — поляризатор, PBS — поляризационный светоделитель, BS — светоделитель, HWP, QWP — полу- и четвертьволновые пластинки, CCR — кубический уголковый отражатель, PP — регулируемая фазовая пластинка

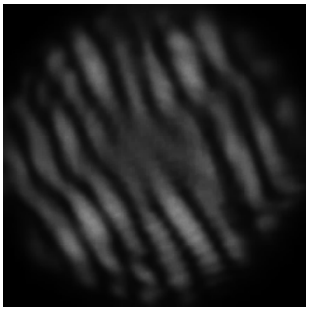
В работе [5] была показана возможность формирования мод Эрмита — Гаусса и Лагерра — Гаусса в поляризационном интерферометра Маха — Цендера на основе уголковых отражателей. Управление формированием моды на выходе интерферометра осуществляется посредством изменения состояний поляризации в плечах интерферометра. Таким образом возможно сгенерировать необходимые моды Эрмит — Гаусса в двух плечах интерферометра, а за счет изменения относительной фазы обеспечить необходимый результат интерференции этих мод на выходном светоделительном кубе. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Результаты эксперимента

Для определения фазовой структуры мод на выходе интерферометра использовался метод интерференции с опорным гауссовым пучком под небольшим углом. При этом в случае наличия ОУМ у пучка в интерференционной картине будет наблюдаться характерная «вилка», причем число ее зубьев будет соответствовать топологическому заряду оптического вихря, а их направление — знаку заряда. Представленные на рис. 2, а), б) интерференционные картины соответствуют относительной разности фаз в плечах интерферометра $\pm i$. На интерференционных картинах видны характерные изображения «вилки», причем направленные в разные стороны, что говорит об изменении знака топологического заряда, в соответствии с теоретическим описанием. Расплывчатое пятно в центре интерференционной картины характеризует точку сингулярности в центре оптического вихря — область пространства с нулевой интенсивностью и неопределенной фазой.



а) Оптический вихрь с зарядом -1



б) Оптический вихрь с зарядом 1

Рис. 2. Результат интерференции оптического вихря с опорным гауссовым пучком

Заключение

В работе предложена оригинальная управляемая схема для генерации оптических вихрей ±1 порядка на основе поляризационного интерферометра Маха — Цендера с кубическими уголковыми отражателями. Показана возможность изменения знака топологического заряда вихрей за счет изменения относительной фазы в плечах интерферометра на π. Оптическая схема на основе кубических уголковых отражателей формирует оптический вихрь в дальней зоне дифракции и обеспечивает низкую дифракционную расходимость пучка, что позволяет ее эффективно применять для оптических каналов связи спутник-спутник и спутник-земля [6].

Список источников

[1] *Adam I.A., Yashin D.A., Kargina D.A., Nasedkin B.A.* Comparison of Gaussian and vortex beams in free-space QKD with phase encoding in turbulent atmosphere // Nanosystems: Phys. Chem. Math. 2022. Vol 13. № 4. P. 392–403.

[2] *Wei H., Wei H., Xue X., Jia P., Shi C.* Wavefront reconstruction of vortex beam propagation in atmospheric turbulence based on deep learning // Optik. 2023. Vol. 279. Art. no. 170635.

[3] *Ren Y., Hao H., Guodong X. et al.* Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing // Opt. Lett. 2013. Vol. 38. P. 4062–4065.

[4] *Benea-Chelmus I.C., Mason S., Meretska M.L. et al.* Gigahertz free-space electro-optic modulators based on Mie resonances // Nat Commun. 2022. Vol 13. Art. no. 3170.

[5] *Reshetnikov D.D., Ryzhaya A.A., Pavelina M.E. et al.* A Mach — Zehnder interferometer based on cube corner reflectors and beams with a controlled polarization structure // Opticheskii Zhurnal. 2025. Vol. 92. № 3. P. 58–67. (In Russ.).

[6] *Reshetnikov D.D., Sokolov A.L., Vashukevich E.A. et al.* Quantum Key Distribution Protocol Using Axially Symmetric Polarization Beams in an Atmospheric Channel // Radiophys Quantum El. 2024. Vol. 67. P. 51–63.

Tunable optical vortex generator based on cube corner reflectors

D.D. Reshetnikov[1], A.A. Ryzhaya[2], M.E. Pavelina[1], E.K. Iureva[2], A.A. Sevryugin[2], A.L. Sokolov[3], V.M. Petrov[1], V.Yu. Venediktov[2]

[1] *Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*
[2] *Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia*
[3] *National Research University "MPEI", Moscow, Russia*

The objective of the present study is to develop and experimentally study a scalar optical vortex generator of the 1st order based on a Mach — Zehnder polarizing interferometer with cube corner reflectors. It is proposed that an original optical scheme for such a generator be established, in addition to conducting a study of the dependence of the structure of the generated optical beams on the relative phase in the arms of the interferometer.

Keywords: *optics, structured light, optical vortices, cube corner reflectors, polarizing interferometer*

Голографический датчик волнового фронта

А.В. Горелая [1, 2, 3], Д.В. Масыгин[2], А.А. Рыжая[2], Е.К. Юрьева[2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

Данные тезисы написаны, чтобы напомнить читателям о проекте голографического датчика волнового фронта. Кратко изложен теоретический принцип работы и следующее из этого преимущество в большем быстродействии, по сравнению с традиционно применяемыми датчиками. Приведена схема лабораторной установки и логика проведения экспериментов. При юстировке установки получены изображения, схожие с визуализацией математического моделирования описания отдельных составляющих волнового фронта. Также приводятся усилия команды по развитию проекта.

Ключевые слова: *голография, волновой фронт, полиномы Цернике*

Введение

Для задач анализа волнового фронта чаще всего применяется датчик Шака-Гартмана (ДШГ). Универсальный и надежный прибор. Однако для улучшения его быстродействия есть ограничения. Было предложено создать такой датчик на основе голографии. Главная идея в том, что каждая голограмма реагирует на свою составляющую со скоростью света. Анализируя яркость света от каждой голограммы, можно быстро проанализировать кривизну волнового фронта в полиномах Цернике. Они математически не зависят друг от друга, поэтому голограмма с одним полиномом не реагирует на другие.

Принцип работы датчика основан на способности голограмм воспроизводить мнимое изображение объектной волны при освещении ее опорной волной. Каждая голограмма записывается со своей аберрацией волнового фронта в объектном пучке, описываемой через полиномы Цернике (рис. 1, 2). Таким образом датчик состоит из нескольких голограмм, каждая из которых реагирует на свою аберрацию и восстанавливает опорную волну. Ставится задача создания лабораторной установки для записи и испытания таких голограмм.

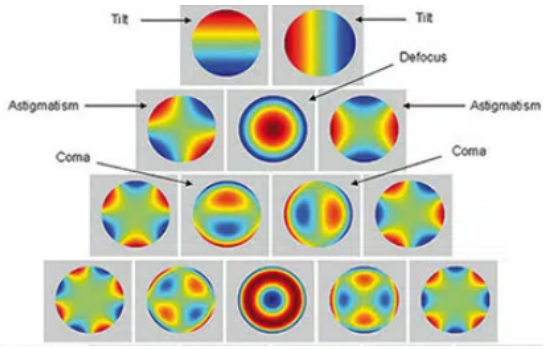


Рис. 1. Фазовые изображения полиномов Цернике

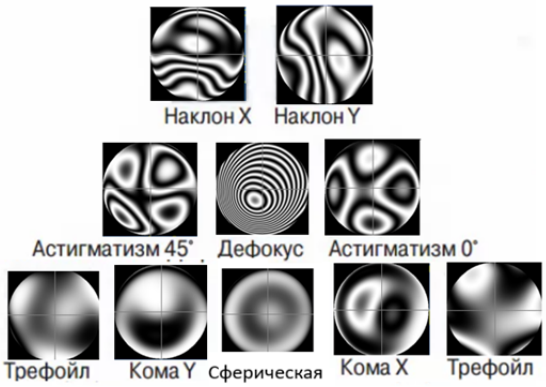


Рис. 2. Фазовые изображения полиномов Цернике, полученные при юстировке лабораторной установки

Экспериментальная установка и результаты эксперимента

Лабораторная установка для записи голограмм использует схему Лейта-Упатниекса. На фотопластинку одновременно падают два луча при записи голограммы. Один луч объектный (2 мкА) – падает перпендикулярно фотопластинке, объектом служит мембранное зеркало. Второй луч – опорный (8,4 мкА) – падает под углом. С помощью откидного зеркала можно менять направление падения опорного пучка: слева или справа. Схема хода лучей и расположения элементов изображена на рисунке 3.

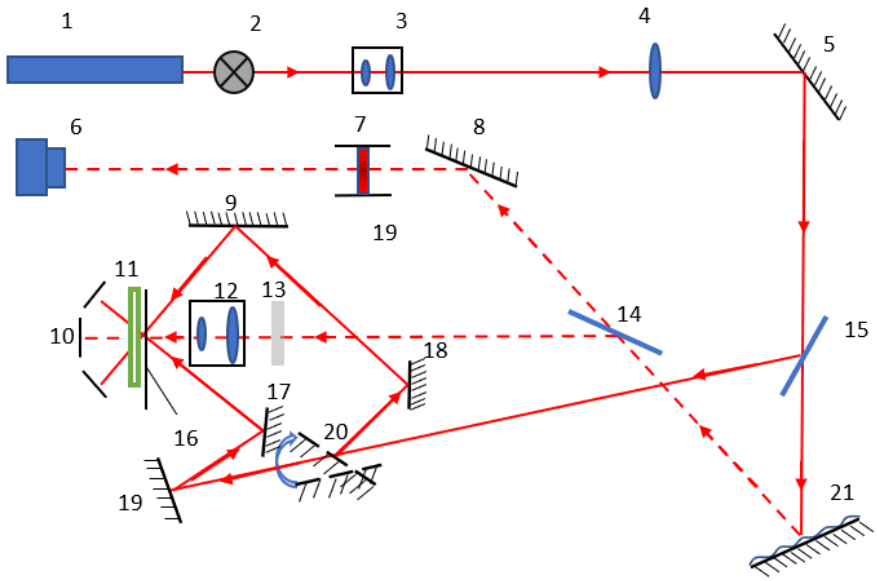


Рис. 3. Схема хода лучей в лабораторной установке:
прямая линия — опорная волна; линия с пунктиром — объектная волна (1 — He–Ne лазер; 2,— диафрагма; 3— микрообъектив; 4 — линза; 5, 8, 9,17, 18,19 — глухие зеркала; 6 — датчик Шака — Гартмана; 7 — светофильтр; 10 — экраны; 11 — фотопластинка; 12 — объектив Гелиос; 13— диффузор; 14, 15 — светоделители; 16 — подвижная диафрагма; 20 — откидное зеркало; 21— мембранное зеркало)

Голограммы записываются на фотопластинках ПФГ-01 в виде окружностей, диаметром 2 мм и с шагом между центрами в 3 мм (рис. 4). Проявляются и устанавливаются обратно в тоже место установки, как при записи. Далее исследуются сигналы голограмм массива на освещение разными волновыми фронтами. Вычисляется дифракционная эффективность.

Рис. 4. Записанный массив голограмм с различными аберрациями волнового фронта

Заключение

Уже несколько лет идет работа над этим проектом в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Была собрана установка для записи и испытания голограмм. Было проведено много совместных измерений, доработок установки и записи голограмм. Для создания аберраций волнового фронта мы используем гибкое зеркало, а для его контроля ДШГ. В прошлом году удалось договориться об использовании нового ДШГ и проверить им наше оборудование.

Список источников

[1] *Бездидько С.Н., Ровенская Т.С.* Полиномы Цернике в проектировании оптических систем. Ч. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 44 с.

[2] *Больбасова Л.А., Лукин В.П.* Адаптивная оптика. Томск: Изд-во Томского государственного университета, 2021. 70 с.

[3] *Суетин П.К.* Классические ортогональные многочлены. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2007. 480 с.

[4] *Венедиктов В.Ю.* Основы адаптивной оптики. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 48 с.

Holographic wavefront sensor

A.V. Gorelaya[1,2,3], D.V. Masygin [2], A.A. Ryzhaya [2], E.K. Yuryeva [2]

[1] *Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Professor, Department of Physics, Saint Petersburg, Russia*
[2] *Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia*
[3] *Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia*

This article is written to remind readers of the holographic wavefront sensor project. It briefly outlines the theoretical operating principle and the resulting advantage of increased response speed compared to traditional sensors. A diagram of the laboratory setup and the experimental logic are provided. During setup adjustment, images were obtained that resembled visualizations of mathematical modeling describing individual wavefront components. The team's efforts to develop the project are also described.

Keywords: *holography, wavefront, Zernike polynomials*

Секция 3
Системы визуализации и отображения информации для AR/VR

Нейрофизиологические и оптические аспекты восприятия AR: от конфликта к комфорту

Д.Д. Шаров[1], С.К. Стафеев[1, 2], А.М. Алексеев[2], Е.М. Алексеев[2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

В работе представлен анализ существующих исследований и экспериментальных подходов к изучению вергентно-аккомодационного конфликта (ВАК), возникающего при использовании устройств дополненной реальности (AR). Исследуются зрительные и когнитивные аспекты пользовательского опыта в условиях наложения виртуальных объектов на реальный мир. Авторы оценивают влияние конструктивных особенностей AR-гарнитур на восприятие глубины, аккомодацию и комфорт, используя комбинацию нейрофизиологических методов и адаптивной оптики. Эксперименты направлены на выявление факторов, влияющих на зрительное напряжение, а также на разработку решений для повышения эргономики AR-сред.

Ключевые слова: *дополненная реальность, вергентно-аккомодационный конфликт, носимые устройства дополненной реальности, визуальный комфорт, восприятие глубины*

Введение

Дополненная реальность все шире применяется в профессиональных и повседневных задачах — от медицины и образования до промышленности и транспортной безопасности. Однако технические и физиологические ограничения, особенно связанные со зрительным восприятием, остаются сдерживающим фактором широкого внедрения AR-технологий.

Одним из ключевых различий AR-гарнитур является способ интеграции виртуального контента в поле зрения пользователя. Устройства pass-through формируют изображение на основе видеопотока с камер, полностью блокируя реальное зрение, но обеспечивая точную контрольную среду для визуального восприятия. В свою очередь, see-through системы используют прозрачную оптику (например, полупрозрачные зеркала или волноводы), позволяя наблюдать реальный мир напрямую с наложенными виртуальными объектами. Такой подход, хотя и обеспечивает более естественное восприятие окружающего пространства, вызывает значительный ВАК из-за расхождения между физической и виртуальной дистанцией фокусировки [1]. ВАК остается и для passthrough дисплеев, поскольку несмотря на фиксированное расстояние до экрана с информацией, такие устройства стремятся имитировать объем и вызывают конвергенцию глаз, сохраняя при этом параметры аккомодации.

Обзор литературы

Одной из ключевых проблем визуализации в дополненной и виртуальной реальности является вергентно-аккомодационный конфликт (ВАК) — фундаментальное несоответствие между конвергенцией глаз и аккомодацией хрусталика при фокусировке на виртуальных объектах, находящихся на неподходящей глубине. Kramida систематизирует причины ВАК в гарнитурах HMD и AR-дисплеях, описывая широкий спектр технических решений: от мультифокальных дисплеев до систем со световыми полями [2]. Автор делает вывод, что конфликт может быть как существенно минимизирован, так и полностью устранен при должной технологической реализации.

В этом направлении работают и другие исследователи. Hua акцентирует внимание на оптических методах генерации фокусных подсказок, позволяющих симулировать корректную аккомодацию [3]. Практическая реализация подобных решений встречается, например, в голографическом максвелловском дисплее с мультиплексированными зрачками, обеспечивающем независимость изображения от аккомодации [4], и в HOE-дисплеях с управляемым eyebox, которые динамически подстраиваются под взгляд пользователя [5]. Несмотря на перспективность, массовое внедрение таких решений затруднено из-за технической сложности и габаритов устройств.

Восприятие глубины в AR также является критическим фактором. Эксперименты Swan и соавторов показывают, что в условиях see-through AR пользователи систематически недооценивают расстояние до виртуальных объектов по сравнению с реальными [6, 7]. Это подтверждают и другие исследования: Adams и коллеги выявили влияние визуальных факторов, таких как контраст, тени и пространственное расположение объектов, на точность глубинных суждений [8], а обзор El Jamiy и Marsh систематизирует эти эффекты в рамках общей проблемы восприятия расстояний [9]. Дополнительные сложности связаны с техническими ограничениями AR-устройств — ограниченным полем зрения и невысоким разрешением. Nakajima и др. подчеркивают, что динамические визуальные подсказки (например, параллакс и движение) могут компенсировать эти недостатки, однако для

достижения точного совмещения виртуальных и реальных объектов необходимо тщательно оптимизировать оптические параметры дисплеев [10].

Нельзя игнорировать и влияние окружающей среды. Согласно Lappin и др., такие факторы, как освещенность, наличие ориентиров и общая конфигурация сцены, могут искажать визуальные оценки расстояния даже при стандартных условиях [11]. Эти выводы особенно важны при проектировании интерфейсов и сценариев использования AR в реальной среде.

Для комплексной оценки зрительного комфорта и когнитивной нагрузки в AR/VR применяются нейрофизиологические методы. Nolte и коллеги предложили методику синхронного анализа ЭЭГ и айтрекинга, позволяющую регистрировать фиксации внимания и вызванные потенциалы в виртуальных средах [12]. Подобную задачу решали и Larsen и др., добившись временной точности синхронизации данных менее 2 мс, что делает возможным достоверный анализ нейрофизиологических реакций [13]. В свою очередь, Vo и др. выявили закономерности развития ментального утомления, зафиксированные в спектрах мозговой активности [14], а Thorp и соавторы проанализировали влияние уровня иммерсивности на когнитивную нагрузку [15].

Следует отметить, что хотя в большинстве этих исследований применялись passthrough-гарнитуры, их результаты релевантны и для see-through AR. Однако все эксперименты имеют важное ограничение — минимальное движение участников. Активные перемещения искажают данные айтрекеров и ЭЭГ, что затрудняет достоверную интерпретацию полученных результатов.

Используемые методы

Для проверки различных условий зрительного восприятия в see-through AR-среде была разработана серия экспериментов, направленных на изучение влияния глубины представления, когнитивной нагрузки и проявлений зрительной усталости. Исследование опирается на интеграцию психофизических тестов, адаптивной оптики, айтрекинга и нейрофизиологической регистрации.

В одной из экспериментальных конфигураций использовался стационарный HUD-дисплей с возможностью задания виртуальных стимулов на различных фокусных дистанциях. Для регистрации активности мозга применялась система электроэнцефалографии BrainVision ActiCHamp, синхронизированная с системой слежения за взглядом Pupil Capture от Pupil Labs. Такая связка обеспечивала точное определение моментов фиксации и сопоставление их с ЭЭГ-сигналами, что позволяло оценивать зрительную нагрузку и динамику утомления при выполнении зрительно-нагруженных задач.

В параллельных экспериментах, ориентированных на оценку вергентно-аккомодационного конфликта, использовались see-through AR-очки на основе birdbath-оптики. В этих условиях моделировались сцены с различной глубиной виртуальных объектов, предъявляемых в виде текста или меток на фоне реального пространства. Участникам предлагались задачи чтения и пространственного распознавания, при которых оценивались субъективное качество восприятия, точность локализации объектов и уровень зрительного напряжения. Особое внимание уделялось оценке ситуаций с бинокулярным соперничеством и размытием изображения, возникающим из-за несоответствия между фокусной плоскостью и глубиной виртуального объекта.

Результаты исследования

На момент подготовки настоящих тезисов сбор экспериментальных данных продолжается, однако уже полученные результаты позволяют сделать ряд предварительных наблюдений.

Участники демонстрировали характерное смещение субъективной оценки глубины при наблюдении виртуальных объектов, размещенных вне плоскости физической фокусировки. Эти искажения особенно ярко выражены в условиях ближней проекции и совпадают с выводами, представленными в работах Swan и др. и Adams и др. [7, 8].

По данным ЭЭГ, в ситуациях с выраженным визуальным конфликтом наблюдались изменения спектральных характеристик и повышение латентности вызванных потенциалов. Это согласуется с результатами исследования Thorp и др., в котором иммерсивность среды и наличие визуальных помех напрямую влияли на эффективность выполнения пространственных задач [15].

Анализ перцептивных отчетов показал, что субъективный уровень утомления и визуального напряжения возрастал при длительном взаимодействии с интерфейсом без компенсации VAC. Полученные данные подтверждают чувствительность предложенной экспериментальной методики к ключевым факторам, определяющим зрительный комфорт в AR-среде.

Выводы

Комплексная методика, сочетающая оптические решения и нейрофизиологию, необходима для точной оценки зрительного дискомфорта и выявления ключевых факторов, влияющих на комфорт взаимодействия с AR-средой. Полученные результаты подтверждают необходимость учета индивидуальных зрительных особенностей пользователей при проектировании AR-устройств. В дальнейшем планируется расширение выборки испытуемых и полноценная интеграция объективных офтальмологических измерений (например, авторефрактометрии) в протокол исследования.

Список источников

[1] *Shrestha P.K., Antonio J.K., Tank D.W., Schmid A.M., Whatley R.W.* Accommodation-Free Head Mounted Display with Comfortable 3D Perception and an Enlarged Eye-box // Research. 2019. Vol. 2019. Art. no. 2639527. https://doi.org/10.34133/2019/2639527

[2] *Kramida G.* Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays: A Review of Problem Assessments, Potential Solutions, and Evaluation Methods. Technical Report, University of Maryland, 2016.

[3] *Hua H.* Optical methods for enabling focus cues in head-mounted displays for virtual and augmented reality // SPIE Proceedings. 2017. Vol. 10219. Art. no. 102190L. https://doi.org/10.1117/12.2269893

[4] *Chang C., Lee M., Whatley R.W., Hua H.* Computational holographic Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Art. no. 18749.

[5] *Park J.H., Kim S.B.* Optical see-through holographic near-eye-display with eyebox steering and depth of field control // Optics Express. 2018. Vol. 26. P. 27076–27088.

[6] *Swan J.E., Jones M.A., Livingston M.A., Smallman D., Gabbard B.C.* Egocentric depth judgments in optical, see-through augmented reality // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2007. Vol. 13. № 3. P. 429–442.

[7] *Swan J.E., Jones M.A., Kolstad A.S., Livingston M.A., Gabbard B.C.* Matching and Reaching Depth Judgments with Real and Augmented Reality Targets // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2015. Vol. 21. № 11. P. 1289–1298.

[8] *Adams H., Evans J., Thomas K.* Depth Perception in Augmented Reality: The Effects of Display, Shadow, and Position. URL: https://varjo.com/products/xr-3/ (accessed 25.05.2025).

[9] *El Jamiy F., Marsh R.* Distance estimation in virtual reality and augmented reality: A survey // IEEE Int. Conf. on Electro Information Technology. 2019. P. 063–068.

[10] *Fujiwara K., Yoshimoto S., Yamada M., Ito K., Nakamura T.* Binocular vs Monocular Depth Perception in Optical See-Through Augmented Reality: Accuracy and Oculomotor Factors // Transactions of the Virtual Reality Society of Japan. 2023. Vol. 27. № 2. P. 141–150. https://doi.org/10.18974/tvrsj.27.2_141

[11] Lappin J.S., Shelton A.T., Vecera D.R. Environmental context influences visually perceived distance // Perception and Psychophysics. 2006. Vol. 68. № 4. P. 571–581.

[12] *Nolte D., Wenzel S., Müller M., Herrmann T.* Combining EEG and eye-tracking in virtual reality: Obtaining fixation-onset event-related potentials and event-related spectral perturbations // Attention, Perception, and Psychophysics. Springer. 2024. https://doi.org/10.3758/s13414-024-02917-3

[13] *Larsen O.F.P., Tresselt W.G., Lorenz E.A., Holt T., Sandstrak G., Hansen T.I., Su X., Holt A.* A method for synchronized use of EEG and eye tracking in fully immersive VR // Frontiers in Human Neuroscience. 2024. Vol. 18. Art. no. 1347974. https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1347974

[14] *Vo V., H. Lee, J. Lee.* Power-law scaling of brain wave activity associated with mental fatigue. URL: http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2020.08.03.234120 (accessed 25.05.2025).

[15] *Thorp S.O., Walker K.N., Adams L.J.* Comparative analysis of spatial ability in immersive and non-immersive virtual reality: the role of sense of presence, simulation sickness and cognitive load // Frontiers in Virtual Reality. 2024. Vol. 5. https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1001456

Neurophysiological and optical aspects of AR perception: from conflict to comfort

D.D. Sharov[1], S.K. Stafeev[1, 2], A.M. Alekseev[2], E.M. Alekseev[2]

[1] *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

This paper presents an experimental approach to investigating the vergence-accommodation conflict (VAC) that arises in the use of see-through augmented reality (AR) devices. The study examines both visual and cognitive aspects of user experience when virtual objects are overlaid onto the real environment. The authors assess how specific optical designs of AR headsets influence depth perception, accommodation, and user comfort by combining neurophysiological methods with adaptive optics. The experimental setup is aimed at identifying key factors contributing to visual strain and at developing technical solutions to enhance the ergonomic performance of AR systems.

Keywords: *augmented reality, vergence-accommodation conflict, wearable augmented reality devices, visual comfort, depth perception*

Асимметричные схемы мультипликации выходного зрачка HMD систем

А.Н. Путилин[1,2], С.С. Копенкин[1,2], Н.А. Путилин[1,2], С.Е. Дубынин[1], Ю.П. Бородин[1,2]

[1] *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия*

В работе представлено исследование по анализу схем построения, моделированию и экспериментальной записи голографических волноводных устройств мультипликации выходного зрачка для HMD (Head-Mounted-Display) дисплеев. Показаны варианты исполнения волноводного голографического перископа в зависимости от параметров формируемого виртуального изображения. Особенностью оптических схем такого типа дисплеев является использование волноводной дифракции и компенсация хроматизма дифракционных элементов. Экспериментально записывались схемы дифракционных перископов с выходным зрачком, ассиметрично мультиплицируемым по одной координате.

Ключевые слова: *волноводные голограммы, голографические оптические элементы, дисплеи дополненной реальности, HMD*

Введение

Наиболее удивительное свойство дисплеев дополненной реальности, построенных на базе волноводных совместителей пучков (beam-combiners), это естественная для волноводной голографии мультипликация выходного зрачка оптической проекционной системы [1, 2]. Однако это же и является причиной невысокой эффективности такого типа схем. С другой стороны, такая низкая эффективность, по нашему мнению, не является следствием физики процесса, а скорее неразвитости технологии и схемотехники этой, достаточно новой, области дисплейных технологий. Поэтому попытки видоизменить ставшие традиционными схемы и разработать новые оптические элементы для дисплеев дополненной реальности имеют шанс на успех.

Волноводный голографический перископ как базовый элемент HMD

Рассмотрим волноводный голографический перископ как элемент мультипликации зрачка оптической системы. Для этого необходимо определить функционал, который отличает его от других технологий, прежде всего от зеркальных многослойных мультиплексоров [3]. Но базовая функция и того и другого элемента, все-таки, вспомогательная, по сравнению с наиболее дорогой частью HMD — проектора виртуального изображения. Поэтому дешевизна и высокая технологичность выводит волноводные дифракционные перископы (ВДП) на первое место в соревновании принципов построения бим-комбайнеров [4]. Вторая, на наш взгляд, перспективная черта ВДП — это возможность трансформации схем построения таких элементов, определяемая только воображением разработчика, поскольку на исследовательском этапе применение универсальных голографических методов формирования дифракционных оптических элементов открывает практически неограниченные перспективы. Затем, после отработки новой схемотехники, можно применить электронную литографию с 3D наноимпринтом [5]. В этой работе мы представим несколько вариантов построения голографических (дифракционных) волноводных перископов для достижения какого-либо специфического свойства дисплея дополненной реальности.

В большинстве схем, использованных в разработках для массового рынка HMD, применяются схемы с двухкоординатным размножением выходного зрачка, но это не единственный вариант получения необходимых выходных параметров ВДП. На рис. 1 показана схема волноводного однокоординатного перископа работающего в режиме двухкоординатного размножения выходного зрачка. Исследование режимов работы такого перископа показало, что по вертикали перископ формирует виртуальное изображение до 35° (зависит от показателя преломления волновода), а по горизонтали схема может формировать виртуальное изображение в угле до 100°, но адекватного проектора для такой схемы найти непросто. При формировании виртуального изображения при таких больших углах наблюдается эффективная мультипликация выходного зрачка — рис. 1, б, при этом двухкоординатная мультипликация зрачка происходит на однокоординатной решетке, работающей в режиме двухлучевого ввода [6]. Данная схема демонстрирует асимметричную работу волноводного мультиплексора зрачка, поскольку размножение по горизонтали и по вертикали происходит при разных режимах дифракции на волноводных решетках, что подтвердилось компьютерным моделированием таких схем — рис. 1, в.

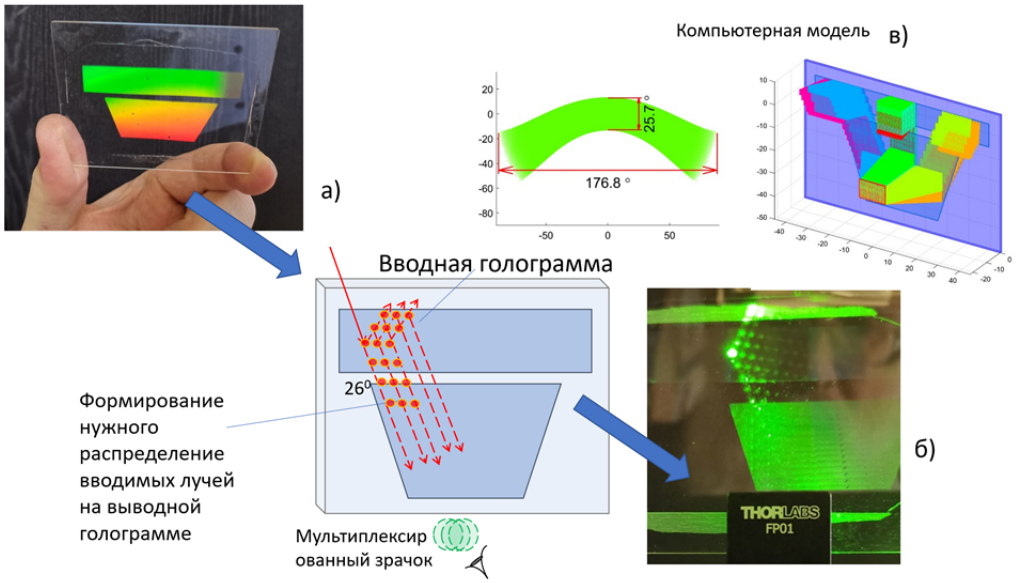


Рис. 1. Волноводный голографический перископ с асимметричной мультипликацией зрачка

Вообще, для использования HMD в различных прикладных задачах часто необходимо создание специализированной схемы формирования выходного зрачка оптической системы, например при необходимости обеспечения расширения зоны рассматривания виртуального изображения только на периферии апертуры окуляра (например, двумя глазами одновременно) можно применить схему, показанную на рис. 2.

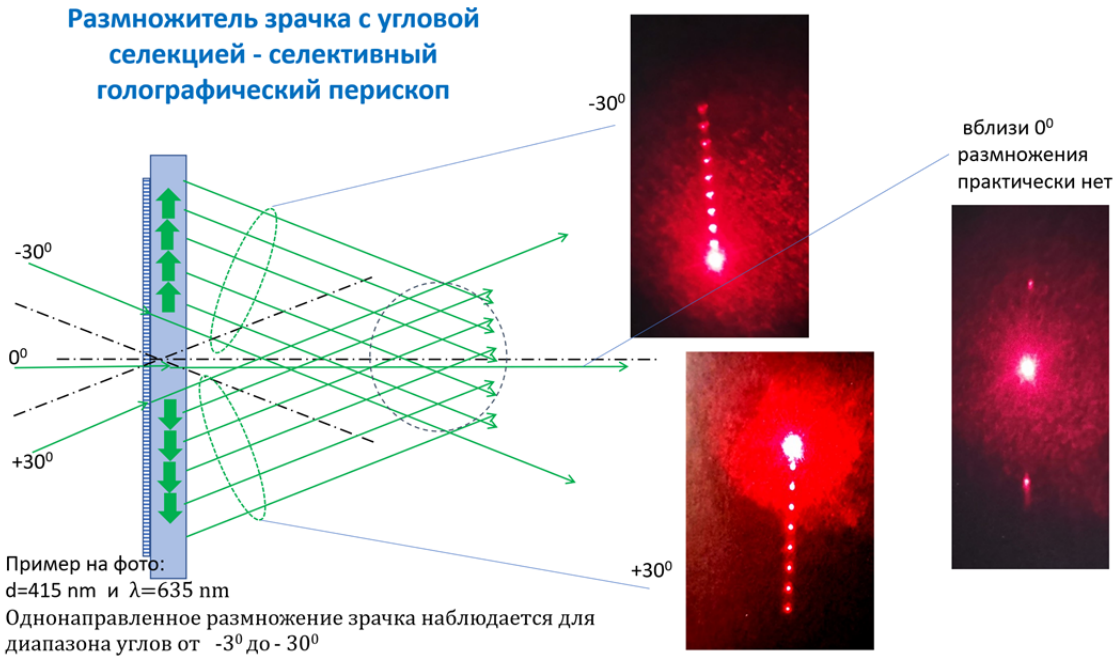


Рис. 2. Волноводная однонаправленная мультипликация выходного зрачка

Область мультипликации зрачка виртуального изображения, формируемого проектором, эффективно работает только для больших углов относительно оптической оси проектора до ±30 градусов, волноводный перископ образован решеткой с периодом чуть меньшим λ/n. Такого типа перископы применялись нами для расширения поля зрения большеразмерных визирных устройств и HUD дисплеев. Таким образом, в конкретном случае конфигурация волноводного перископа может быть модифицирована под оптимальное использование.

Для расширения углового диапазона волноводной дифракции использование волноводов с большим показателем преломления крайне желательно, однако, как правило, это значительно уве-

личивает себестоимость производства дисплеев дополненной реальности [4]. Есть и другие способы увеличение рабочих диапазонов волноводной дифракции, например возможно использование балансной схемы или нескольких вводных решеток совместно с общей выводной голограммой в волноводном перископе, например схемы HMD фирмы DigiLens, такая схема позволяет увеличить угловую апертуру HMD в несколько раз по горизонтали, хотя не сильно изменяет эргономику, но необычное расположение проекторов потребует изменения его конструкции, например с использованием микролинзового растра как в известных схемах виртуального шлема фирмы NVidia. Вариантами создания новых схем волноводных голографических перископов могут быть модификации известных схем с нанесением дифракционных элементов на две поверхности волновода [7].

Заключение

В большинстве современных дисплеев дополненной реальности, построенных на принципах дифракционного волноводного перископа, используется трех-голограммные схемы волноводных перископов — Hololens1 и WaveOptics, однако исследование и разработка в этой области не должно ограничиваться известными схемами, для иллюстрации других возможных подходов и была написана эта статья. Разработка новых схем, например с нанесением дифракционных волноводных решеток на обе стороны планарного волновода, а также непланарные волноводные схемы иллюстрируют оригинальные подходы в разработке новых дисплеев дополненной реальности.

Список источников

[1] *Levola T.* Diffractive optics for virtual reality displays // J. Soc. Inf. Display. 2006. Vol. 14. № 5. P. 467–475.

[2] *Kress B.C., Pace M.* Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets // Light: Advanced Manufacturing. 2022. Vol. 3. № 4. P. 771–801. https://doi.org/10.37188/lam.2022.042

[3] *Frommer A.* 11-3: Invited Paper: Lumus Optical Technology for AR // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2017. Vol. 48. https://doi.org/10.1002/sdtp.11589

[4] *Steiner S. et al.* Enabling mass manufacturing of industry-standard optical waveguide combiners // Journal of Optical Microsystems. 2023. Vol. 3. № 3. P. 033502–033502.

[5] *Ding Y., Yang Q., Li Y. et al.* Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges // eLight. 2023. Vol. 3. № 1. P. 24–58. https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z

[6] *Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н., Копенкин С.С., Бородин Ю.П.* Волноводные голографические перископы с двухкоординатной мультипликацией выходного зрачка на одномерной дифракционной решетке // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 7. С. 35–51. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-07-35-51

[7] *Wang L., Zhao Y., Zeng L.* High combiner efficiency and self-aligned compact double-sided diffractive waveguide based on linear surface relief gratings // Opt. Exp. 2024. Vol. 32. № 27. P. 48072–48092. https://doi.org/10.1364/OE.544302

Asymmetric schemes of eyebox multiplication for HMD systems

A.N. Putilin[1, 2], S.S. Kopenkin[1, 2], N.A. Putilin[1, 2], S.E. Dubynin[1], Yu.P. Borodin[1, 2]

[1] *Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[2] *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

The paper presents the analysis of optical schemes for constructing, modeling and experimental recording of holographic waveguide eyebox multiplication for HMD (Head-Mounted-Display) displays. The variants of the waveguide holographic periscope are shown depending on the parameters of the generated virtual image. The application of waveguide diffraction and compensation of chromatic aberrations of diffraction elements are the specific features of such a type of optical schemes. Schemes with single-coordinate diffraction periscopes, which form an asymmetric exit pupil, were experimentally recorded.

Keywords: *waveguide holograms, holographic optical elements, augmented reality displays, HMD*

Исследование аберраций в оптических схемах с волноводным распространением излучения: ограничения и возможные преимущества волноводной голографии

Н.А. Путилин [1], С.Е. Дубынин [1], А.Н. Путилин [1, 2], С.С. Копенкин [1, 2], Ю.П. Бородин [1, 2]

[1] *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия*

В работе рассматриваются особенности возникновения аберраций в системах дополненной реальности на основе волноводных дифракционных элементов. Также анализируется возможность применения данных элементов для исследования аберраций объективов и окуляров. Целью работы является определение ограничений и преимуществ, связанных с волноводным распространением излучения. В ходе работы использовались специализированные программы для компьютерного моделирования рассматриваемых схем. Проводились экспериментальные исследования изготовленных дифракционных элементов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов контроля качества оптических компонентов или отдельных поверхностей.

Ключевые слова: *волноводная голография, дифракционные оптические элементы, аберрации оптических систем, системы дополненной реальности*

Введение

Элементы на основе волноводного распространения света получили весьма широкое распространение в области систем дополненной реальности в качестве совместителей световых пучков [1–3]. Использование рельефно-фазовых дифракционных решеток в качестве элементов ввода и вывода излучения из волновода закладывает потенциал массового производства таких элементов [4]. Это делает актуальным исследование механизмов возникновения аберраций в подобных системах, анализ специфических типов искажений изображения, характерных для рассматриваемых элементов [5, 6]. Стоит отметить, что для дисплеев дополненной реальности весьма востребовано формирование изображения на конечном расстоянии, данному вопросу в работе уделено отдельное внимание.

Оценка качества оптических систем на основе ВДП

В большинстве случаев волноводные дифракционные перископы (ВДП) реализуются на основе плоских волноводов. При выполнении условия замкнутости цепочки векторов решеток, ВДП является анаберрационной оптической системой. Однако в действительности возникают искажения изображения, связанные, во-первых, с погрешностями изготовления ВДП, во-вторых — с аберрациями проекционной оптической системы.

Многократное взаимодействие излучения в среде в разы усиливает геометрические аберрации, что выливается в чрезвычайно жесткие требования к плоскостности и разнотолщинности волноводов. Причем данные параметры важно выдерживать не только для исходной подложки, но и в процессе наноимпринта рельефно-фазовых решеток. Однако важно отметить, что для рассматриваемых оптических систем дополненной реальности формируемый выходной зрачок многократно превышает по размеру зрачок глаза пользователя. В связи с этим, рационально ввести понятия «мгновенный выходной зрачок» и «область выходного зрачка». Тогда оценку качества изображения необходимо проводить для размера мгновенного выходного зрачка порядка 2–8 мм, причем желательно выполнять данный анализ при разных уровнях яркости и, соответственно, размерах зрачка. При моделировании также следует учитывать указанное обстоятельство, как это показано на рис. 1а. Тогда, например, при диаметре мгновенного выходного зрачка 4 мм даже при цилиндричности (изгибе) волновода с радиусом 10 м угловые аберрации не превышают 5'.

Оценка аберраций для большей области может приводить к заметно завышенным требованиям к компонентам. Так, на рис. 1 представлены сравнительные фотографии виртуальных изображений в схеме с однокоординатным ВДП с подложкой достаточно низкого качества, имеющей сагиттальную клиновидность (около 6'…7'). Фотографии на рис. 1б и рис. 1в отличаются относительным отверстием объектива при съемке. Для рис. 1в, даже несмотря на заметную дисторсию изображения, качество может быть удовлетворительным для отображения простой графической информации. Размер кадра: 6,3°×9,4°.

Стоит отметить, что дополнительно также может быть необходимо оценивать изменения аберраций при перемещении глаза в плоскости выходного зрачка в заданных пределах. При этом для наголовных систем такие перемещения малы (как правило, менее 10 мм), а положение глаза относительно устройства слабо меняется во время работы. А для индикаторов на лобовом стекле (ИЛС)

перемещения могут составлять 100…200 мм и более. При этом для ИЛС как для коллиматорного прицела также предъявляются особые требования к отсутствию локальных изменений углов изображения, то есть к отсутствию локальных (по области выходного зрачка) изменений дисторсии.

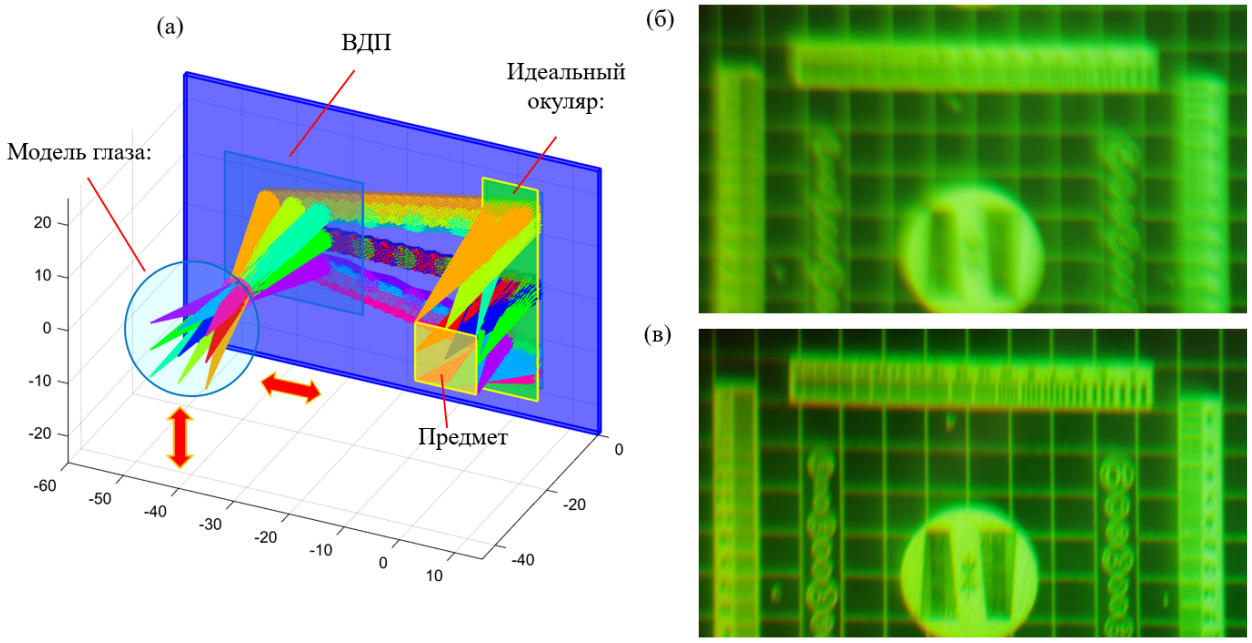


Рис. 1. Сравнение качества изображения в схеме с однокоординатным ВДП: (а) — схема модели для оценки требований к ВДП, (б) — фотография виртуального изображения после ВДП при диаметре апертуры объектива 48 мм, (в) — фотография при апертуре 6 мм

Ограничения в применении ВДП для формирования изображения на конечном расстоянии

С точки зрения функционала очень привлекательно было бы иметь возможность перестраивать расстояние до формируемого виртуального изображения в пределах от бесконечности до 30–40 см. В связи с этим известны работы, в которых использовались фазовые модуляторы света в качестве входного компонента, для того чтобы получить изображение на конечном расстоянии [7]. Проанализируем те ограничения, которые возникают при попытке использовать ВДП на основе плоских волноводов для формирования изображения на конечном расстоянии.

Рассмотрим данный вопрос сначала на примере толстого волновода (5 мм), как это показано на рис. 2, а. На входе и выходе расположены модели идеальных объективов. Вводной объектив формирует изображение на удалении 300 мм. Стоит отметить, что после ВДП, как и при вводе в него, идут сходящиеся пучки лучей, то есть при рассмотрении глазом изображение становится мнимым. Чтобы наблюдаемое глазом после ВДП изображение было действительным, проектор должен формировать мнимое изображение. В рассматриваемом случае на рис. 2, б (увеличенный фрагмент рис. 2, а) видно, что после ВДП пучки сходятся к точке, которая ранее была точкой фокуса, однако они при этом формируют здесь кружок рассеяния. Если пересчитать данные аберрации в угловые величины (через фокусное расстояние объектива), то получим 3,8°, что совершенно неприемлемо. При этом для каждого переотражения мы можем наблюдать меридиональные и сагиттальные фокусы (рис. 2, б, в). В меридиональной плоскости они расположены на разной глубине (из-за разного пути в волноводе). Таким образом, для отдельного переотражения мы наблюдаем появление астигматизма в изображении. Когда же в зрачок попадает несколько переотражений, мы должны наблюдать двоение / троение изображения.

С учетом вышесказанного можно было бы предположить, что для достаточно толстого волновода в область зрачка глаза будет попадать только одно переотражение и двоения изображения не будет. Однако период точек возврата различен для разных углов, поэтому в широком угловом поле обязательно будут зоны, в которых присутствует двоение. При меньшей толщине волновода (1 мм) и размере выходного зрачка 4 мм (мгновенный выходной зрачок) мы наблюдаем картину, показанную на рис. 2, г и 2, д. В данном случае в размер зрачка глаза попало 3 переотражения (троение).

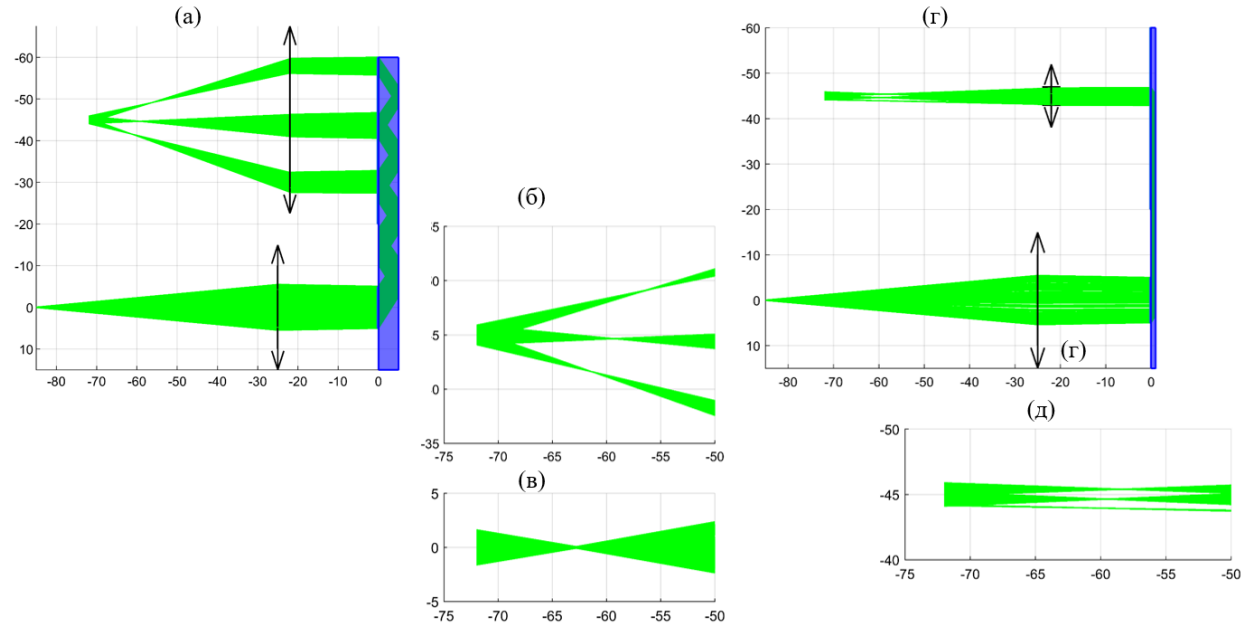


Рис. 2. Моделирование влияния дефокусировки проекционного объектива на качество виртуального изображения: (а), (б), (в) — для волновода толщиной 5 мм и апертуры объектива 35 мм; (г), (д) — для волновода толщиной 1 мм, апертура объектива на выходе — 4 мм

На рис. 3 представлены экспериментальные данные. На рис 3, а, б показаны изображения, полученные при дефокусировке проекционного объектива (транспарант не в фокальной плоскости объектива). На увеличенном фрагменте рис. 3, в особенно хорошо видно двоение изображения. При этом, как и говорилось, наблюдаемое двоение или троение может быть локально сильнее или слабее для отдельного угла поля зрения. Камера с автофокусировкой не может поймать устойчивый фокус, в виду отсутствия плоскости с четким изображением.

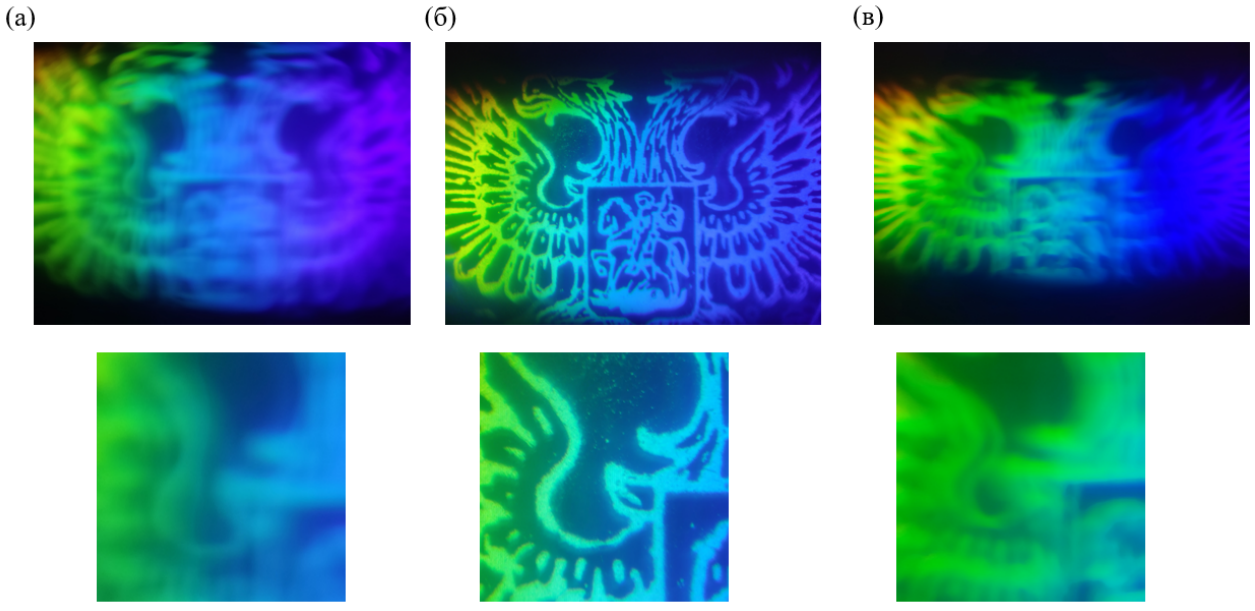


Рис. 3. Фотографии виртуального изображения при дефокусировке: (а) — проектор формирует действительное изображение на расстоянии 300 мм, (б) изображение на бесконечности, (в) — проектор формирует мнимое изображение

Как часто бывает в прикладных областях науки, то, что для отдельных задач является недостатком, может стать достоинством при решении иных задач. Так, ВДП может быть использован как эталонный элемент при выполнении фокусировки объективов. Формируемые на выходе приемного

объектива в схеме на рис. 2, а астигматические перетяжки имеют весьма характерную форму и могут быть измерены экспериментально (рис. 4, а, б).

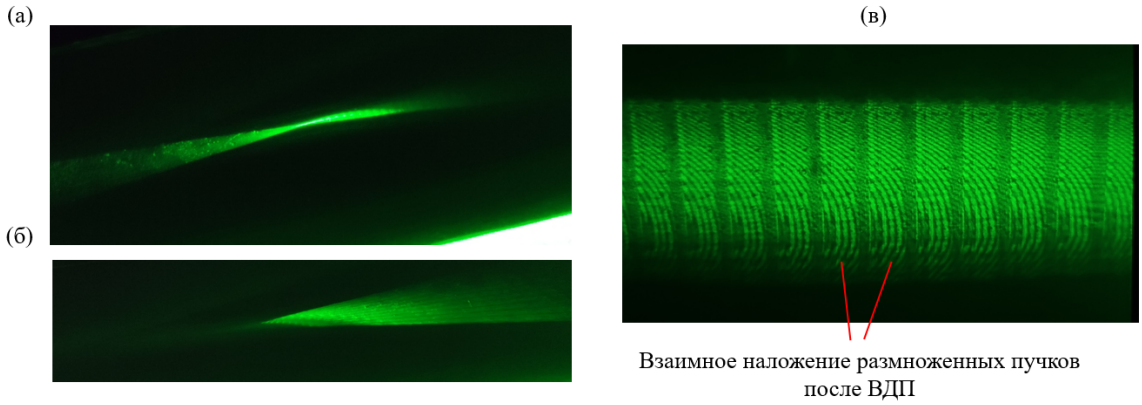


Рис. 4. Возможные применения ВДП для измерения аберраций: (а), (б) фотографии перетяжки пучка, сфокусированного объективом после ВДП, (в) интерференция между пучками, размноженными в ВДП

Стоит отметить, что сам волновод может стать неким аналогом интерферометра Фабри — Перо: в местах переналожения пучков на выходе из ВДП можно наблюдать интерференционную картину (рис 4, в). Видность интерференционных полос достаточно высокая, так как соседние переотражения незначительно отличаются по средней интенсивности. Свойства ВДП могут быть использованы для создания различных вариантов интерферометров, в частности таких, которые были ли бы чувствительны к отклонениям от плоскостности волнового фронта на входе.

Заключение

Волноводные дифракционные перископы — достаточно новый компонент в сравнении с известными веками классическими оптическими системами. В связи с этим для адекватной оценки требований к погрешностям изготовления элементов в схемах с ВДП требуется тщательно анализировать функциональное назначение рассматриваемых элементов и всей оптической системы в целом. Важно учитывать особенности наблюдения изображения, а именно: размеры зрачка глаза и подвижность зрителя относительно ВДП, назначение прибора. Системы на основе плоских волноводов с использованием дифракционных решеток с постоянным периодом не могут быть полноценно использованы для формирования изображения на конечном расстоянии без потери качества изображения или заметного ограничения углового поля. Волноводные дифракционные перископы могут быть использованы в качестве эталонного компонента в схемах контроля качества фокусировки объективов и в качестве специфического элемента интерферометров.

Список источников

[1] *Ding Y., Yang Q., Li Y. et al.* Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges // eLight. 2023. Vol. 3. № 1. P. 24–58. https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z

[2] *Kress B.C., Pace M.* Holographic optics in planar optical systems for next generation small form factor mixed reality headsets // Light: Advanced Manufacturing. 2022. Vol. 3. № 4. P. 771–801. https://doi.org/10.37188/lam.2022.042

[3] *Cheng D., Wang Q., Liu Y. et al.* Design and manufacture AR head-mounted displays: A review and outlook // Light: Advanced Manufacturing. 2021. Vol. 2. № 3. P. 350–369. https://doi.org/10.37188/lam.2021.024

[4] *Steiner S., Jotz M., Bachhuber F. et al.* Enabling mass manufacturing of industry-standard optical waveguide combiners // Journal of Optical Microsystems. 2023. Vol. 3. № 3. P. 033502–033502. https://doi.org/10.1117/1.JOM.3.3.033502

[5] *Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н., Копенкин С.С., Бородин Ю.П.* Искажения виртуального изображения в схемах дисплеев дополненной реальности на волноводных голограммах: возникновение тангенциальной дисторсии и хроматизма увеличения // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 79–94. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-79-94

[6] *Solomashenko A., Kuznetsov A., Nikolaev V. et al.* Development of a holographic waveguide with thermal compensation for augmented reality devices // Appl. Sci. 2022. Vol. 12. № 21. Art. no. 11281. http://doi.org/10.3390/app122111281

[7] *Yeom H.-J., Kim H.-J., Kim S.-B. et al.* 3D holographic head mounted display using holographic optical elements with astigmatism aberration compensation // Optics Express. 2015. Vol. 23. № 5. Art. no. 251327. http://doi.org/10.1364/OE.23.032025

Investigation of aberrations in optical systems with waveguide propagation of light: limitations and possible advantages of waveguide holography

N.A. Putilin[1, 2], S.E. Dubynin[1], A.N. Putilin[1, 2], S.S. Kopenkin[1, 2], Yu.P. Borodin[1, 2]

[1] *Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[2] *Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia*

The paper considers the specificity of aberration occurrence in augmented reality systems based on waveguide diffractive elements. The possibility of using these elements for measurement of aberrations of lenses and eyepieces is also analyzed. The aim of the work is to determine the limitations and advantages associated with waveguide propagation of light. During experiments the specialized programs for computer modeling of the considered schemes was used. Experimental investigation was performed with application of recorded diffractive elements. The results obtained can be used in the development of quality control methods for optical components or specific surfaces.

Keywords: *waveguide holography, diffraction optical elements, aberrations of optical systems, augmented reality systems*

Секция 4
Оптические защитные технологии

Нанофотонные физически неклонируемые защитные метки: создание, оптические свойства и протоколы считывания

П.Н. Кустов, М.П. Сандомирский, Е.А. Петрова, Д.А. Зуев

Физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены работы по разработке нанофотонных физически неклонируемых защитных меток для применения в системах защиты от подделок. Представлены лазерные методы создания микро- и наноструктур на основе кремниевых и золото-кремниевых гибридных материалов, обладающих невоспроизводимыми оптическими свойствами и/или стохастическим расположением. Исследованы спектральные характеристики рассеяния, комбинационного рассеяния и фотолюминесценции, демонстрирующие высокий уровень вариативности между метками. Предложены и протестированы протоколы оптического считывания с использованием алгоритмов компьютерного зрения и др. для аутентификации предложенных защитных меток. Полученные результаты подтверждают перспективность физически неклонируемых меток для практического использования в качестве идентификационных знаков и в системах защиты от подделки.

Ключевые слова: *нанофотоника, физически неклонируемые функции, защитные метки, наноструктуры, лазерные методы создания наноструктур, алгоритмы аутентификации*

Оптические физически неклонируемые функции (PUF) стремительно развиваются как мощные криптографические примитивы для применения в системах повышенной безопасности [1]. Эти системы используют свою врожденную случайность для генерации уникальных, неповторимых оптических откликов, что открывает новые горизонты в технологиях защиты от подделок [1]. Однако существующие оптические PUF опираются на микромасштабные пространственные особенности, что ставит под угрозу их долгосрочную надежность в условиях стремительного развития средств микроскопической манипуляции [2]. Кроме того, быстрый перенос инноваций из науки в промышленность предоставляет злоумышленникам передовые инструменты для воспроизведения защитных технологий от подделок, в то время как развитие квантовых вычислений ставит под угрозу существующие протоколы шифрования [3, 4]. Для противодействия этим вызовам особенно важно развитие аппаратных решений в криптографии, в частности физически неклонируемых функций [5, 6]. В настоящем докладе представлены работы по лазерно-индуцированному созданию наноструктур, на основе кремниевых и золото-кремниевых наночастиц, полученных с помощью прямого лазерного переноса, прямой лазерной записи или деветтинга (распада тонких пленок при нагреве). В первом случае, получены Ми-резонансные кремниевые наночастицы (диаметром 100–550 нм), обладающие уникальным расположением в массиве, а также уникальными спектрами рассеяния, комбинационного рассеяния и фотолюминесценцией [7–9]. Во втором случае получены 3 типа золото-кремниевых наноструктур, обладающих различной формой, а именно параболической, конической и полой [10]. В третьем случае формируются мультирезонансные наночастицы золота-кремния [2]. Гибридные наносистемы получаемые во втором и третьем случаях демонстрируют невоспроизводимую широкополосную фотолюминесценцию в диапазоне 400–900 нм, причем последняя, в силу специфики метода лазерного создания, имеет четкие, сложные внутренние конфигурации наночастиц, которые неизбежно влияют на широкополосные спектры фотолюминесценции. В дополнение к перечисленным трем случаям, предложен метод лазерно-индуцированного химического жидкостного осаждения для формирования медных электродов на полимерной подложке полимиида. Такие электроды обладают выраженными морфологическими особенностями, сформированными в процессе их создания, что в конечном счете детектируется в геометрии пропускания или другими микроскопическими методами. На основе предложенных типов наноструктур и их уникальных оптических откликов предложены различные концепты считывания, демонстрирующие высокие показатели кодирующей емкости (до 10^{240000}). Для обработки сигналов и их криптографической обработки использовались различные программные алгоритмы, включая алгоритм k-средних [2, 7], полярные коды [10], алгоритмы компьютерного зрения [2, 7], шифрование одноразовых паролей на основе машинного обучения [2] и др.

Таким образом, представленные работы закладывают концептуальную основу для использования присущей в наномасштабе случайности нанофотонных структур для приложений следующего поколения в аппаратной криптографии и оптических защитных технологий против подделок.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 25–12–00310, https://rscf.ru/project/25-12-00310/.

Список источников

[1] *Arppe R., Sørensen T.J.* Physical unclonable functions generated through chemical methods for anti-counterfeiting // Nature Reviews Chemistry. 2017. Vol. 1. № 4. Art. no. 0031.

[2] *Sandomirskii M., Petrova E., Kustov P., Chizhov L., A. Larin, Bruyère S., Yaroshenko V., Ageev E., Belov P., Zuev D.* Spectral physical unclonable functions: downscaling randomness with multi-resonant hybrid particles // Nature Communications. 2025. Vol. 16. № 1. P. 1–12.

[3] *Schiansky P., Kalb J., Sztatecsny E., Roehsner M.-C., Guggemos T., Trenti A., Bozzio M., Walther P.* Demonstration of quantum-digital payments // Nature Communications. 2023. Vol. 14. № 1. Art. no. 3849.

[4] *Bernstein D.J., Lange T.* Post-quantum cryptography // Nature. 2017. Vol. 549. № 7671. P. 188–194.

[5] *Lounis K., Zulkernine M.* Lessons learned: Analysis of PUF-based authentication protocols for IoT // Digital threats: research and practice. 2023. Vol. 4. № 2. P. 1–33.

[6] *Wang K., Shi J., Lai W., He Q., Xu J., Ni Z., Liu X., Pi X., Yang D.* All-silicon multidimensionally-encoded optical physical unclonable functions for integrated circuit anti-counterfeiting // Nature Communications. 2024. Vol. 15. № 1. Art. no. 3203.

[7] *Kustov P.* Mie-resonant silicon nanoparticles for physically unclonable anti-counterfeiting labels // ACS Applied Nano Materials. 2022. Vol. 5. № 8. P. 10548–10559.

[8] *Kustov P., Petrova E., Sandomirskii M., Zuev D.* All-dielectric silicon nanoparticles on flexible substrate for anticounterfeiting labels // Sixteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials). 2022. P. 244–246. https://doi.org/10.1109/Metamaterials54993.2022.9920716

[9] *Petrova E., Kustov P., Sandomirskii M., Sun Y., Zuev D.* Multiphoton Luminescence in Resonant Silicon Nanoparticles for Physically Unclonable Anticounterfeiting Labels // IEEE 23rd International Conference on Nanotechnology (NANO). 2023. P. 754–757. https://doi.org/ 10.1109/NANO58406.2023.10231179

[10] *Ponkratova E., Ageev E., Trifonov P., Kustov P., Sandomirskii M., Zhukov M., Larin A., Mukhin I., Belmonte T., Nominé A., Bruyère S., Zuev D.* Coding of Non-Linear White-Light Luminescence from Gold-Silicon Structures for Physically Unclonable Security Labels // Advanced Functional Materials. 2022. Vol. 32. № 41. Art. no. 2205859.

Nanophotonic physically unclonable anti-counterfeiting: fabrication, optical properties and reading protocols

P.N. Kustov, M.P. Sandomirskii, E.A. Petrova, D.A. Zuev

Faculty of Physics, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The report presents research on the development of nanophotonic physically unclonable security labels for use in anti-counterfeiting systems. Laser-based fabrication methods for creating micro- and nanostructures using silicon and gold-silicon hybrid materials are described. These structures exhibit irreproducible optical properties and/or stochastic spatial distributions. The spectral characteristics of scattering, Raman scattering, and photoluminescence were studied, revealing a high degree of variability among the proposed security labels. Optical readout protocols employing computer vision algorithms and other techniques for authentication are proposed and tested. The results confirm the high potential of physically unclonable labels for practical implementation in anti-counterfeiting systems, as well as identification marks.

Keywords: *nanophotonics, physically unclonable functions, security labels, nanostructures, laser- induced fabrication, authentication algorithms*

Acknowledgement

This work is supported by Russian Science Foundation grant No 25–12–00310, https://rscf.ru/project/25-12-00310/.

Секция 5
Интегральная фотоника

Поляризующие интегрально-оптические волноводы на основе тонкопленочного ниобата лития

А.В. Булатова[1, 2], Д.Н. Москалев[2, 3], А.А. Козлов[1, 3], В.А. Журавлев[1, 3], М.А. Ветошкин[1, 3], Е.Д. Вобликов[1, 2], У.О. Салгаева[4, 5], В.В. Криштоп[1, 2, 3]

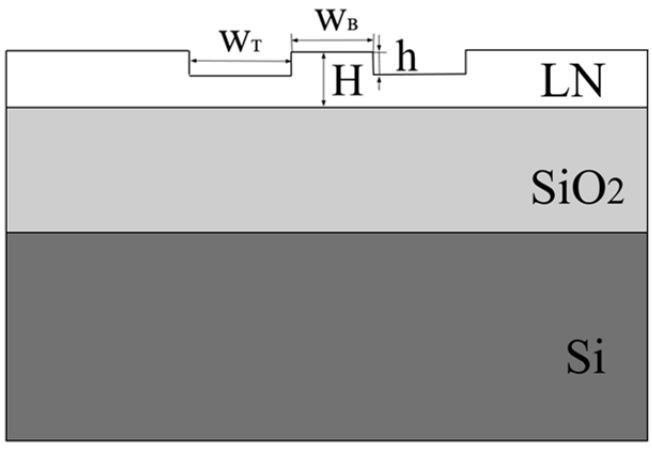
[1] *Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия*
[2] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*
[3] *Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия*
[4] *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*
[5] *ООО «Дифра Лаб», Пермь, Россия*

В работе описаны особенности проектирования поляризующих волноводов на основе тонкопленочного ниобата лития X-среза (с толщиной пленки ниобата лития 0,6 мкм), поддерживающих распространение TE-моды оптического излучения с длиной волны 1,55 мкм. Проведено численное моделирование оптических волноводов с целью определения набора геометрических параметров поперечного сечения, обеспечивающих распространение фундаментальной TE-моды и максимальное затухание фундаментальной TM-моды. Для проверки полученных результатов были изготовлены образцы интегрально-оптических волноводов для экспериментальной оценки затухания TM- и TE-моды. Измерения оптических потерь мощности фундаментальных мод в волноводах качественно подтвердили значения, полученные в результате численного моделирования.

Ключевые слова: *поляризация, интегрально-оптический волновод, тонкопленочный ниобат лития, фундаментальные TE- и TM-моды*

Для задач оптического приборостроения применяются интегрально-оптические волноводы, поддерживающие распространение фундаментальной моды с заданной поляризацией. Настоящая работа направлена на изучение возможностей формирования поляризующего волновода на основе тонкопленочного ниобата лития, ТНЛ (X-срез, распространение по Y), поддерживающего распространение TE-моды оптического излучения с длиной волны 1,55 мкм.

В работе рассмотрен метод формирования поляризующих волноводов в копланарной конфигурации [1]. На рисунке показано поперечное сечение предлагаемого поляризующего волновода: H — высота волновода, h — глубина травления, $w_в$ — ширина волновода, $w_т$ — ширина вытравленной области.



Поперечное сечение предлагаемого поляризующего волновода

С целью определения геометрических параметров поперечного сечения было проведено численное моделирование поляризующих волноводов с помощью программного обеспечения Difra. Значения H и $w_в$ были подобраны таким образом, чтобы выполнялось условие одномодовости распространения оптического излучения на длине волны 1,55 мкм. Значения $w_т$ варьировались от 1,5 мкм до 4 мкм с шагом 0,5 мкм. Для каждого поперечного сечения были получены значения эффективного показателя преломления для TE и TM мод. Для обеспечения оптической связи между TM_0 модой и TE_N модами высших порядков планарного волновода в вытравленной области необходимо, чтобы выполнялось условие: $n_{тр_TEN} > N_{эфф_TM}$ [2], где $n_{тр_TEN}$ — эффективный показатель преломления TE_N моды высшего порядка планарного волновода в вытравленной области, $N_{эфф_TM}$ — эффективный показатель преломления TM_0 моды гребенчатого волновода.

В результате удалось определить набор геометрических параметров поперечного сечения, обеспечивающего распространение фундаментальной TE-моды и максимальное затухание фундаментальной TM-моды. Согласно расчетам, величина оптических потерь в волноводе для TM_0 моды на 2 порядка превышает оптические потери для TE_0.

Для экспериментального подтверждения результатов моделирования был получен чип размером 10×10 мм^2 с поляризующими волноводами на подложке ТНЛ X — среза производства компании NanoLN (толщина пленки H = 0,6 мкм, толщина пленки SiO_2 = 4,7 мкм). Поверх чипа методом магнетронного напыления был нанесен буферный слой SiO_2. Чип представлял собой набор волноводов шириной $w_в$ = 1 мкм с вытравленными областями, ширина которых варьировалась от 1,5 мкм до 4 мкм, глубина травления h = 0,3 мкм. Полученные волноводы имели неровность линии края, LER ≤ 0,03 мкм и угол наклона боковой стенки, θ ≈ 75°.

Тестирование волноводов выполнялось на установке оптической стыковки, точность микропозиционеров 50 нм. В чип было введено деполяризованное излучение с помощью оптического волокна UHNA 7, вывод поляризованного излучения из чипа осуществлялся с помощью оптического волокна с сохранением поляризации типа Panda производства ПАО «ПНППК». В качестве источника излучения был использован усилитель спонтанной эмиссии производства ПАО «ПНППК» с длиной волны 1,55 мкм. Измерение коэффициента экстинкции было выполнено с помощью измерителя коэффициента поляризационной экстинкции.

В результате были получены экспериментальные данные коэффициента экстинкции волноводов. Построен график зависимости коэффициента экстинкции от ширины тренча $w_т$. Экспериментальные данные качественно подтверждают результаты численного моделирования.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Габидуллину А.Р. (ЦКП «Чистые помещения для микро- и нанообработки», Сколтех) за помощь в проведении лазерной литографии. Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0006).

Список источников

[1] *Wang Y.C., Lu S.Y., Yen T.H., Wei C.C., Chiu Y.J., Liu R.Y., Hung Y.J.* Silicon photonics multi-function integrated optical circuit for miniaturized fiber optic gyroscope // Journal of lightwave technology. 2023. Vol. 41. Art. no. 6324. https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3282976

[2] *Saitoh E., Kawaguchi Y., Saitoh K., Koshiba M.* TE/TM-Pass polarizer based on lithium niobate on insulator ridge waveguide // IEEE Photonics Journal. 2013. Vol. 5. Art. no. 660610. https://doi.org/10.1109/JPHOT.2013.2250938

Single-polarization integrated optical waveguides based on thin film lithium niobate

A.V. Bulatova[1, 2], D.N. Moskalev[1, 2, 3], A.A. Kozlov[1, 3], V.A. Zhuravlev[1, 3], M.A. Vetoshkin[1, 3], E.D. Voblikov[1, 2], U.O. Salgaeva[4, 5], V.V. Krishtop[1, 2, 3]

[1] *Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia*
[2] *Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*
[3] *Perm State National Research University, Perm, Russia*
[4] *Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*
[5] *LLC "Difra Lab", Perm, Russia*

The paper describes the design features of single-polarization waveguides based on X-cut thin-film lithium niobate (with a film thickness of lithium niobate 0.6 μm), supporting the propagation of optical TE-mode with the wavelength 1.55 μm. Numerical modeling of optical waveguides was carried out for determination of the set of geometrical cross section parameters, that ensure the propagation of the fundamental TE-mode and the maximum attenuation of the fundamental TM-mode. To verify the obtained numerical results, samples of integrated optical waveguides were fabricated for experimental evaluation of TM- and TE-modes attenuation. Measurements of the optical power losses of the fundamental modes in the waveguides qualitatively confirmed the values obtained by numerical modeling.

Keywords: *polarization, integrated optical waveguide, thin film lithium niobate, fundamental TE- and TM-modes*

Отожженные протонообменные волноводы в смешанных кристаллах твердого раствора ниобата-танталата лития

А.В. Сосунов[1], А.Р. Корнилицын[1], А.С. Паньков[1], Р.С. Пономарев[1], Д.Н. Москалев[1], Е.Д. Вобликов[1], А.А. Мололкин[2], Р.Р. Фахртдинов[3], Е.Д. Савельев[4], А.Р. Ахматханов[4], В.Я. Шур[4], М. Кунева[5]

[1] Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
[2] Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия
[3] Институт проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, Черноголовка, Россия
[4] Институт естественных наук и математики, Екатеринбург, Россия
[5] Институт физики твердого тела Болгарской академии наук, София, Болгария

Работа посвящена формированию канальных волноводов методом протонного обмена в новых смешанных кристаллах твердого раствора ниобата-танталата лития X- и Z-срезов. Было выявлено наличие пор в структуре смешанных кристаллов и повышенная плотность дислокаций. Структурные неоднородности приводят к повышенным оптическим потерям. Оптические потери в два раза выше, чем в аналогичных волноводах в ниобате лития. Полученные результаты являются основой дальнейшего развития, как технологии роста смешанных кристаллов, так и в качестве материальной платформы для задач нелинейной фотоники.

Ключевые слова: *оптические материалы, волновод, дефекты*

Большой потенциал кристаллов ниобата лития (НЛ) и танталата лития раскрыт для их использования в области интегральной фотоники [1]. Однако потенциал смешанных кристаллов твердых растворов ниобата-танталата лития (ЛНТ) практически не изучен. Это связано, прежде всего, с неоднородностью состава, возникающей при выращивании кристаллов [2]. Техническая возможность использования твердых растворов ЛНТ обусловлена тем, что в последние годы были получены смешанные кристалла ЛНТ достаточно высокого акустического/оптического качества [3].

Одним из ключевых элементов фотонных интегральных схем является оптический волновод. В связи с этим одной из первых задач является изготовление канальных оптических волноводов с требуемыми характеристиками в объемных кристаллах. Основными методами создания таких волноводов являются диффузия Ti и протонный обмен. Целью работы является формирование канальных волноводов методом протонного обмена в смешанных кристаллах твердого раствора ЛНТ X- и Z-срезов и оценка их оптических потерь.

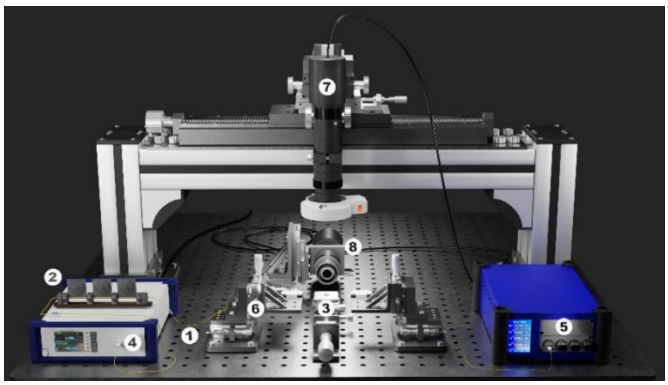
Экспериментальные образцы ЛНТ X- и Z-срезов состава $LiNb_{0.97}Ta_{0.03}O_3$ были выращены модифицированным методом Чохральского в Институте проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов (Россия). Волноводы формировали в закрытом циркониевом реакторе в расплаве чистой бензойной кислоты при 190 °C в течение 2 часов с последующим отжигом на воздухе при температуре 370 °C в течение 8 часов (X-срез) и при 350 °C в течение 5 часов (Z-срез). Структура образцов была охарактеризована с помощью дифракционного структурного анализа, оптической профилометрии и селективного химического травления с последующей визуализацией методом электронной микроскопии.

Оптические потери волноводов измеряли с помощью ручной системы выравнивания волокно-волокно с точностью позиционирования 500 нм (рисунок). Использовались стандартные оптические волокна SMF-28e и UHNA-4, стабильный источник света 1550 нм Golight OS-TL и измеритель оптической мощности Dimension Alpha.

Оптические потери диффузных волноводов обусловлены тремя факторами: шероховатость поверхности, дефекты в объеме волновода и изгибные потери, которыми мы пренебрегаем, так как измерения проводили на прямых каналах. Оптические потери, в нашем случае, будут обусловлены дефектами поверхности и объема кристалла ЛНТ. В результате структурных исследований были обнаружены дефекты кристалла ЛНТ в виде клиновидных лунок. Ширина лунки составила около 1 мкм, глубина до 60 нм, плотность этих дефектов достигала 2 шт./мм^2.

Также проводили анализ плотности дислокаций ρ (ямок травления) путем химического селективного травления в исходных кристаллах ЛНТ (таблица). Было обнаружено примерно двукратное увлечение плотности дислокаций для каждой кристаллографической ориентации кристаллов ЛНТ. Оптические потери, измеренные методом волокно-волокно, показали также двукратное увеличение для кристаллов ЛНТ по сравнению с кристаллами НЛ. Волноводы получены при идентичных режимах.

Таким образом, выявлена взаимосвязь между дефектностью структуры ЛНТ и оптическими потерями. Проведено сравнение образцов ЛНТ и НЛ. Новые смешанные кристаллы ЛНТ имеют перспективы применения в интегральной и нелинейной фотонике. Для наиболее эффективного использования исследуемых кристаллов ЛНТ необходимо снизить их дефектность.



Экспериментальная схема измерения оптических потерь в канальных волноводах: 1 — оптическое волокно; 2 — контроллер поляризации; 3 — образец; 4 — лазер; 5 — измеритель мощности; 6 — микроподвижки; 7 — вертикальная камера; 8 — торцевая камера

Плотность дислокаций и оптические потери

Ориентация кристалла		$\rho\times10^{-4}$, см$^{-2}$	Оптические потери, дБ
X-срез	НЛ	8	8.6
	ЛНТ	13±3	19.0
Z-срез	НЛ	2	3.8
	ЛНТ	6±3	6.2

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края, грант № С26-37.

Список источников

[1] *Boes A.* Lithium niobate photonics: Unlocking the electromagnetic spectrum // Science. 2023. Vol. 379. Art. no. eabj4396.

[2] *Bashir U.* Evaluation and thermodynamic optimization of phase diagram of lithium niobate tantalate solid solutions // J. Mater. Sci. 2024. Vol. 59. Art. no. 12305.

[3] *Roshchupkin D.* Single crystals of ferroelectric lithium niobate–tantalate LiNb1–xTaxO3 solid solutions for high-temperature sensor and actuator applications // Acta Crystallographica Sect. B Structural Sci. Cryst. Eng. Mater. 2020. Vol. 76. Art. no. 1071.

Annealed proton-exchange waveguides in mixed lithium niobate-tantalate solid solutions

A.V. Sosunov[1], A.R. Kornilicyn[1], A.S. Pankov[1], R.S. Ponomarev[1], D.N. Moskalev[1], E.D. Voblikov[1], A.A. Mololkin[2], R.R. Fakhrtdinov[3], E.D. Savelyev[4], A.R. Akhmatkhanov[4], V.Ya. Shur[4], M. Kuneva[5]

[1] *Perm State University, Perm, Russia*
[2] *National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*
[3] *Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials RAS, Moscow, Russia*
[4] *School of Natural Sciences and Mathematics, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*
[5] *Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

The work is dedicated to the formation of channel APE waveguides in new mixed crystals of lithium niobate-tantalate solid solution of X- and Z-cuts. The presence of pores in the structure of mixed crystals and an increased dislocation density were revealed. Structural inhomogeneities lead to increased optical losses. Optical losses are twice as high as in similar waveguides in lithium niobate. The obtained results are the basis for further development of both the technology of mixed crystal growth and as a material platform for nonlinear photonics problems.

Keywords: *optical materials, waveguide, defects*

Исследование оптического эффекта самовоздействия в гибридных наноструктурах типа металл - полупроводник

А.О. Ларин, Э.И. Агеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В докладе представлены результаты исследования эффекта самовоздействия и его роли при генерации нелинейно-оптического отклика в гибридных наноструктурах типа металл-полупроводник. Рассмотрен подход к их изготовлению с описанием морфологии, исследовано взаимодействие гибридных наноструктур с лазерным излучением фемтосекундной длительности на длинах волн ближнего ИК, а также построены численные модели для интерпретации полученных результатов оптических измерений. Результаты исследования имеют перспективы для разработки наноразмерных ап-конверсионных источников излучения для фотонных интегральных схем в качестве активных компонент.

Ключевые слова: *наноструктуры, нелинейная оптика, гибридная нанофотоника*

Фотонные интегральные схемы (ФИС) применяются для работы с большими базами данных [1, 2], обучение искусственного интеллекта [3–5] и решения математических задач [6]. Преимуществом оптических систем над электронными аналогами является высокое быстродействие при низком тепловыделении. Однако, текущие реализации ФИС представляют собой совокупность оптических и электронных пассивных и активных компонент.

В настоящее время активно ведется работа по замене электронных активных компонентов на оптические аналоги [7]. При этом основные усилия направлены на поиск и исследование эффектов для создания полностью оптических активных элементов, которые могут быть интегрированы в системы на одной подложке. Оптическим состоянием таких компонент можно управлять за счет света, что важно для отказа от управления с помощью электрических сигналов. Одним из многообещающих методов создания оптических активных элементов является использование эффектов самовоздействия света в резонансных наноструктурах [8–10]. Особое внимание привлекают резонансные наноструктуры, созданные на основе сочетания металлов и полупроводников, которые совместимы с КМОП-структурами, например, на основе кремния. Такие гибридные структуры расширяют возможности для реализации эффектов самовоздействия света и позволяют настраивать положение оптических резонансов, и все это в рамках одной наносистемы.

В настоящем докладе представлены результаты работ на тему исследования эффекта самовоздействия света в гибридных наноструктурах типа металл-полупроводник при облучении их фемтосекундными лазерными импульсами на длине волны ближнего инфракрасного диапазона. В первой части показано полностью оптическое управление нелинейной восприимчивостью второго порядка за счет квазистатического электрического поля, возникающего в области контакта металл-полупроводник. Во второй части продемонстрировано управление спектром фотолюминесценции кремния за счет оптической генерации электрон-дырочной плазмы высокой концентрации.

Представленные системы имеют перспективы применения для разработки таких активных компонент ФИС как нелинейные преобразователи оптической частоты, оптические аналоги мемристора, перестраиваемые источники широкополосного излучения.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-72-10075, https://rscf.ru/project/24-72-10075/.

Список источников

[1] *Shen X. et al.* Silicon photonic integrated circuits and its application in data center // Proceedings of Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. 2021. Vol. 11763. https://doi.org/10.1117/12.2587538

[2] *Sunny F.P. et al.* A survey on silicon photonics for deep learning // ACM J. Emerg. Technol. Comput. Syst. Association for Computing Machinery (ACM). 2021. Vol. 17. № 4. P. 1–57.

[3] *Ning S. et al.* Photonic-electronic integrated circuits for high-performance computing and AI accelerators // J. Lightwave Technol. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2024. Vol. 42. № 22. P. 7834–7859.

[4] *Shastri B.J. et al.* Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing // Nat. Photonics. Springer Science and Business Media LLC, 2021. Vol. 15. № 2. P. 102–114.

[5] *Saharia A. et al.* Integrated Photonics for Artificial Intelligence Applications // VLSI and Hardware Implementations Using Modern Machine Learning Methods. Boca Raton: CRC Press, 2021. P. 293–303.

[6] *Ye J. et al.* Reconfigurable application-specific photonic integrated circuit for solving partial differential equations // Nanophotonics. Walter de Gruyter GmbH, 2024. Vol. 13. № 12. P. 2231–2239.

[7] *Shalf J.* The future of computing beyond Moore's Law // Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci. The Royal Society. 2020. Vol. 378. № 2166. Art. no. 20190061.

[8] *Sinev I.S. et al.* Observation of ultrafast self-action effects in quasi-BIC resonant metasurfaces // Nano Lett. ACS Publications, 2021. Vol. 21. № 20. P. 8848–8855.

[9] *Mathew A. et al.* Nonreciprocal metasurfaces with epsilon-near-zero materials // Nano Lett. American Chemical Society (ACS). 2025. Vol. 25. № 8. P. 3259–3264.

[10] *Shilkin D.A., Lyubin E.V, Fedyanin A.A.* Nonlinear excitation and self-action of Bloch surface waves governed by gradient optical forces // ACS Photonics. American Chemical Society (ACS), 2022. Vol. 9, № 1. P. 211–216.

Study of optical self-action effect in hybrid metal-semiconductor nanostructures

A.O. Larin, E.I. Ageev

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The report presents the results of the study of self-action effect and its role in the generation of a nonlinear optical response in hybrid metal-semiconductor nanostructures. The approach to their fabrication with a description of morphology is considered, the interaction of hybrid nanostructures with femtosecond laser radiation at near-IR wavelengths is studied, and numerical models are constructed to interpret the obtained results of optical measurements. The results of the study have prospects for the development of nanoscale up-conversion radiation sources for photonic integrated circuits as active components.

Keywords: *nanostructures, nonlinear optics, hybrid nanophotonics*

Многоуровневое переключение фазоизменяемой ячейки в интегральной фотонной схеме

А.А. Невзоров[1], А.И. Проходцов[1, 2], В.В. Ковалюк[1, 3], П.И. Лазаренко[2], А.Д. Голиков[1, 2], С.А. Козюхин[4], Г.Н. Гольцман[5]

[1] *Лаборатория фотонных газовых сенсоров, МИСИС, Москва, Россия*
[2] *Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия*
[3] *Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*
[4] *Институт общей и неорганической химии имени им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия*
[5] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*

Работа посвящена исследованию фотонных интегральных схем с перестраиваемыми ячейками на основе халькогенидных фазоизменяемых материалов (ФИМ). Тонкие пленки ФИМ, нанесенные на поверхность одномодового интегрального волновода из нитрида кремния, позволили нам изменять пропускание интегральной схемы на 1,5 dB с помощью лазерных импульсов, распространяющихся в самом волноводе. В работы мы описываем экспериментальную схему и протокол управления созданными структурами, который позволяет получать не менее четырех безошибочно различимых состояний интегрального элемента, характеризующихся различными уровнями пропускания. Полученные нами результаты позволят создать энергонезависимую многоуровневую ячейку полностью оптической памяти, а также могут найти применение в интегральных оптических нейроморфных системах.

Ключевые слова: *интегральные фотонные схемы, фазоизменяемые материалы, оптические элементы памяти, нейроморфные технологии, энергонезависимая память*

Введение

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) в настоящее время активно исследуются и уже используются во множестве технологических решений, однако пока не нашли коммерческого применения в задачах интегральной фотоники. При этом использование таких материалов может открыть перспективы построения высокоэффективных оптических вычислительных ускорителей [1], энергонезависимых элементов, а также полностью оптических элементов памяти [2]. Причинами подобных перспектив являются такие особенности ФИМ, как большой контраст оптических свойств в разных фазовых состояниях (кристаллическое или аморфное), которые, кроме того, долговременно сохраняется в широком диапазоне температур [3]. Основными задачами, которые сегодня ставятся перед исследователями фазоизменяемых халькогенидных материалов являются поиск новых сплавов, которые позволят достигнуть большого количества циклов обратимого изменения фазового состава [4], а также получить устройства с воспроизводимым многоуровневым переключением [5].

Материалы и методы экспериментального исследования

Мы изготовили фотонные интегральные схемы на платформе нитрида кремния с пленками ФИМ напыленными поверх участка волновода. В качестве ФИМ использовался сплав германия, сурьмы и теллура со стехиометрическим соотношением 1–4–7. Как показали предварительные исследования такой материал превосходит классический хорошо исследованный GST 225 в величине контраста оптических свойств при изменении стабильной фазы.

Многослойная подложка состояла из кремния (Si) покрытого термическим диоксидом кремния (SiO_2) толщиной 2,6 мкм, а на котором располагается стехиометрический LPCVD нитрид кремния (Si_3N_4) толщиной 450 нм.

Для исследований нами были выбраны прямые участки волновода, поверх которого располагались пленки ФИМ шириной 3 мкм. Именно такой размер обеспечивает наилучший контраст пропускания между аморфным и кристаллическим состояниями материалов при низких потерях в структуре.

Для исследований мы использовали схему pump-probe с отстройкой зондирующего и возбуждающего излучения на 4 нм. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Лазер накачки формировал импульсы аморфизации и кристаллизации на длине волны 1549 нм через массив волокон. Излучение под углом 8 градусов вводилось в чип, после этого импульс проходил через структуру. Зондирующее излечение на длине волны 1553 нм подавалось в чип аналогичным образом. Зондовый CV сигнал поступал на полосовой фильтр для дополнительного ослабления сигнала накачки, который являлся для детекторов паразитным. 90 % зондового сигнала регистрировалось детектором с рабочей полосой 250 МГц, а 10 % поступало на медленный детектор с большой чувствительностью. Циркуляторы и интегральные структуры с дифракционными решетки обладают поляризационной чувствительностью, поэтому в схеме использовалось 4 контроллера поляризации.

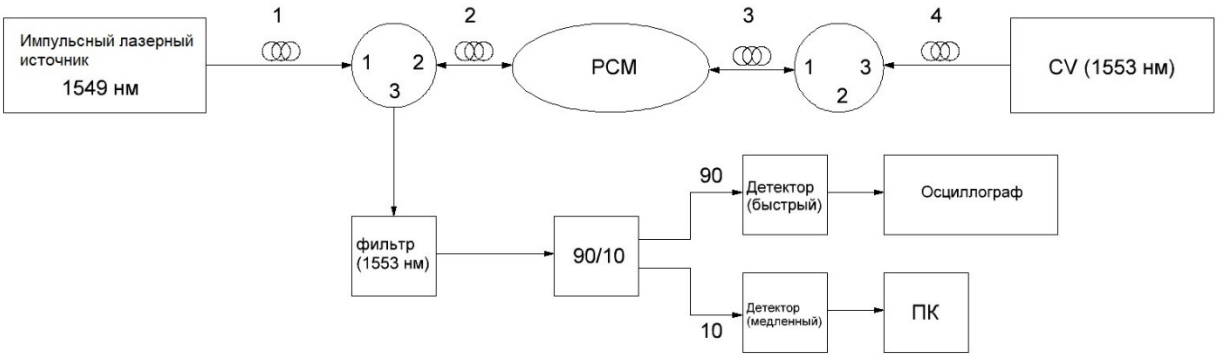


Рис. 1. Схема эксперимента

Экспериментальные результаты

На рис. 2 приведены переключения состояний структуры после нескольких сотен циклов кристаллизации и аморфизации пленок ФИМ. Мы использовали последовательность из 6ти аморфизующих импульсов длительностью 25 нс в диапазоне мощностей от 1,2 до 2,2 мВт. Мощность воздействия последовательно росла с каждым импульсом. После этого мы воздействовали на пленку двадцатью импульсами длительностью 100 нс и мощностью 1 мВт. Все управляющие импульсы были эквидистанты. Такой протокол переключения повторялся циклически.

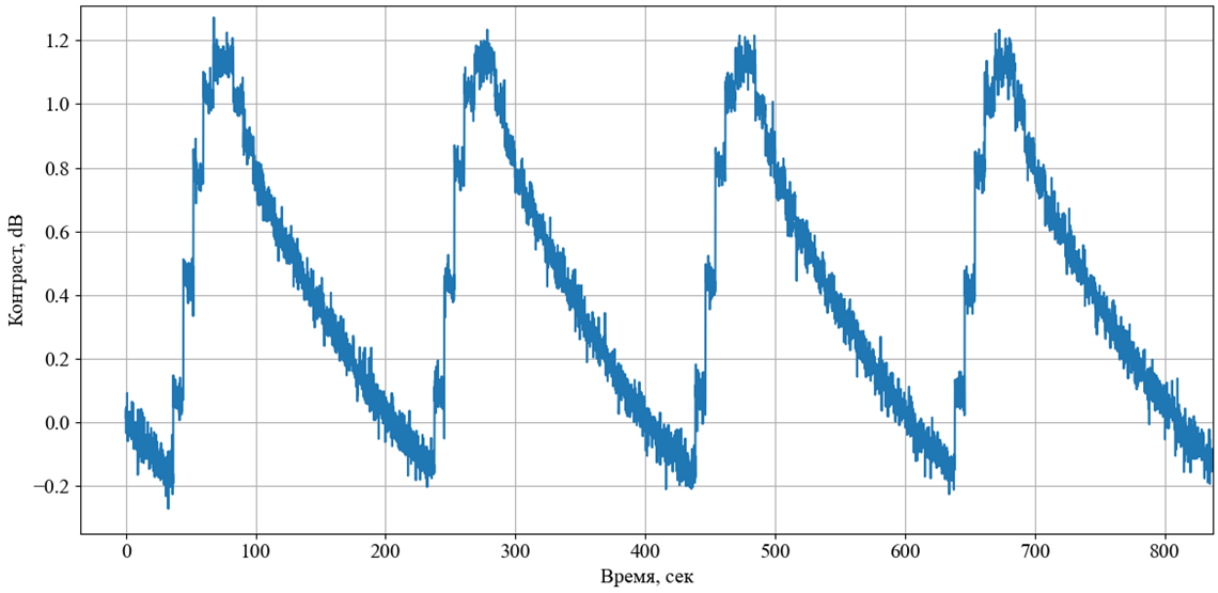


Рис. 2. Циклическое переключение состояния устройства с пленкой ФИМ

Контраст на рис. 2 это изменение пропускания структуры относительно ее начального состояния, в качестве которого выбиралось состояние после медленного отжига материала на температуре немного выше температуры кристаллизации [6]. Рост контраста вызван аморфизацией материала после коротких мощных импульсов, а уменьшение пропускания это следствие кристаллизации пленки ФИМ лазерными импульсами.

На рис. 3 приведены переключения пропускания структуры после аморфизующих импульсов в увеличенном временном масштабе.

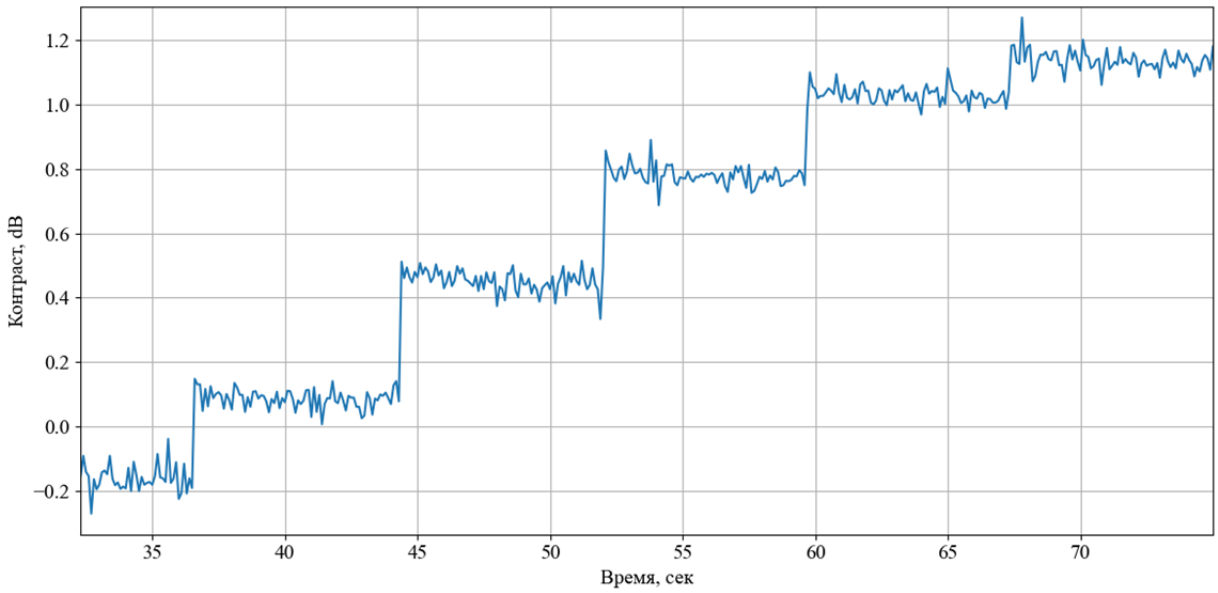


Рис. 3. Последовательная аморфизация тонкой пленки ФИМ на поверхности волновода

На рис. 3 хорошо видно, что при аморфизации образца короткими лазерными импульсами возрастающей мощности можно добиться как минимум четырех хорошо различимых по контрасту пропускания состояний.

Заключение

Использование материала GST 147 в качестве активного элемента на интегральном фотонном волноводе позволило нам добиться энергонезависимого управления пропусканием волновода с помощью коротких лазерных импульсов. Была экспериментально продемонстрирована возможность воспроизводимого и хорошо контролируемого переключения между состояниями интегральной структуры. Использование разработанного нами специального протокола управления параметрами лазерного воздействия позволило добиться не менее чем четырех достоверно различимых и повторяемых уровней пропускания.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования FSME-2025-0002 (исследование детекторов) и федеральной программы академического лидерства «Приоритет 2030» СТП «Квантовый интернет» НИТУ МИСИС (изготовление детекторов).

Список источников

[1] *Ríos C. et al.* In-memory computing on a photonic platform // Science advances. 2019. Vol. 5. № 2. Art. no. eaau5759.

[2] *Manolis A. et al.* Non-volatile integrated photonic memory using GST phase change material on a fully etched Si3N4/SiO2 waveguide // CLEO: Science and Innovations. Optica Publishing Group, 2020. Art. no. STh3R. 4.

[3] *Elliott S.R.* Chalcogenides: Metastability and Phase Change Phenomena // Philos. Mag. B. 1978. Vol. 37. Art. no. 553.

[4] *Debunne A. et al.* Evidence of crystallization–induced segregation in the phase change material Te-rich GST // Journal of The Electrochemical Society. 2011. Vol. 158. № 10. Art. no. H965.

[5] *Ríos C. et al.* Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory // Nature photonics. 2015. Vol. 9. № 11. P. 725–732.

[6] *Yu W., Yi X., Wright C.D.* Analysis of crystallization behaviour of $Ge_2Sb_2Te_5$ used in optical and electrical memory devices // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. 2014. Vol. 6. P. 415–424.

Multilevel switching of a phase-change cell in an integrated photonic circuit

A.A. Nevzorov[1], A.I. Prokhodtsov[1], V.V. Kovaluk[1], P.I. Lazarenko[2], A.D. Golikov[1,2], S.A. Kozhukhin[3], G.N. Goltsman[5]

[1] *Laboratory of Photonic Gas Sensors, MISIS, Moscow, Russia*
[2] *National Research University "MIET", Zelenograd, Russia*
[3] *Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia*
[4] *N.S. Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, RAS, Moscow, Russia*
[5] *National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia*

This work investigates tunable integrated photonic circuits based on chalcogenide phase-change materials (PCMs). Thin PCM films deposited on a single-mode silicon nitride waveguide enabled modulation of the circuit's transmission by 6 dB using laser pulses propagating through the waveguide itself. We describe the experimental setup and control protocol for these structures, which allows for at least four distinct, error-free distinguishable states characterized by varying transmission levels. Our results pave the way for the development of non-volatile multilevel optical memory cells and may find applications in integrated optical neuromorphic systems.

Keywords*: integrated photonic circuits, phase-change materials, optical memory elements, neuromorphic technologies*

Узкополосный лазерный источник на основе РОС-лазера с интегральным кремниевым кольцевым резонатором

А.И. Вергулес[1], Д.С. Земцов[1], А.К. Земцова[1], А.С. Смирнов[1], Д.М. Жигунов[1], К.Н. Гарбузов[1], С.С. Косолобов[1], В.П. Драчев[1], А.А. Фотиади[2], А.В. Иванов[3], М.А. Ладугин[3], Е.П. Кицюк[4], В.В. Светухин[4]

[1] *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*
[2] *Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия*
[3] *НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия*
[4] *НПК «Технологический центр», Москва, Россия*

Целью работы является создание компактного узкополосного лазера для когерентной оптической связи, генерации малошумящих микроволновых сигналов, оптической сенсорики и спектроскопии. На платформе «кремний-на-изоляторе» 220 нм спроектирован и изготовлен микрокольцевой резонатор для его использования в качестве внешнего резонатора РОС-лазера с добротностью ~150 000. Излучение РОС-лазера вводилось в резонатор с помощью полированного оптического волокна, пристыкованного к решеткам ввода/вывода излучения на чипе с суммарными потерями на приклейку 3 дБ. Используя метод самогетеродинной интерферометрии с длинной волоконной задержкой, показано сужение спектральной ширины лазерной линии с 210 кГц до 200 Гц.

Ключевые слова: *фотонные интегральные схемы, кремний-на-изоляторе, узкополосный лазер, эффект самозахвата частоты, кольцевой резонатор*

Полупроводниковые лазеры, в частности, лазеры с распределенной обратной связью (РОС), имеют небольшие размеры и вес, а также обладают относительно высокой выходной мощностью. Однако спектральная ширина линии таких лазеров обычно лежит в диапазоне от одного до нескольких МГц и ограничена размерами резонатора, его невысокой добротностью и частотным дрейфом, вызванным тепловыми и электронными шумами. Эти ограничения являются ключевыми факторами, затрудняющими внедрение РОС-лазеров в приложения, где уровнем фазовых шумов и спектральной шириной лазерной линии определяются разрешающая способность и допустимый уровень шумов оптической системы. Повысить частотную стабильность и добиться существенного уменьшения спектральной линии лазера до суб-кГц величин можно, используя эффект самозахвата частоты внешним интегральным резонатором. Такой подход может открыть возможности для применения таких лазеров в когерентных линиях оптической связи, генерации спектрально малошумящих микроволновых сигналов, высокоточной оптической сенсорике и спектроскопии. Таким образом, целью данной работы является создание узкополосного источника лазерного излучения в С-диапазоне одномодового оптического волокна на основе РОС-лазера и внешнего интегрального кремниевого резонатора.

Эффект самозахвата частоты описывается уравнениями Ланга — Кобаяши, моделирующими влияние оптической обратной связи на динамику лазера [1]. Сущность эффекта заключается в том, что часть лазерного излучения фильтруется внешним высокодобротным резонатором, выступающим в качестве частотно-селективного зеркала и обеспечивающим обратную связь. Отраженный от внешнего резонатора свет обусловлен обратным Рэлеевским рассеянием, и, следовательно, когерентен по фазе. Возвращаясь в лазерный резонатор, он интерферирует с внутренним полем, тем самым снижая порог лазерной генерации на захваченной частоте. Стабильность режима работы лазера в режиме самозахвата частоты определяется мощностью и фазой обратной связи.

Внешний резонатор для РОС-лазера был изготовлен на стандартной подложке кремний-на-изоляторе (КНИ) с толщиной слоя кремния 220 нм и представляет собой высокодобротный кольцевой резонатор типа «стадион» радиусом 500 мкм и длиной области связи 1200 мкм. Добротность и резкость резонатора составила ~170 000 и 12 соответственно. Процесс включал электронно-лучевую литографию кольцевого резонатора и решеток ввода/вывода излучения, травление с использованием индуктивно-связанной плазмы и осаждение 1 мкм SiO_2. Для того, чтобы обеспечить ввод излучения в чип, к нему было пристыковано два оптических волокна с сохранением поляризации с торцом, полированным под углом, обеспечивающим перенаправление излучения в область решеток ввода/вывода излучения на чипе за счет эффекта полного внутреннего отражения. Суммарные потери на стыковку обоих портов составили около 3 дБ.

На рис. 1 представлена схема, содержащая лазер с подключенным к нему внешним резонатором на чипе, и самогетеродинный интерферометр с задержкой 50 км (~240 мкс) для измерения ширины лазерной линии [2, 3]. В качестве источника использовался РОС- лазер с волоконным выводом с сохранением поляризации с длиной волны 1530 нм, изготовленный в НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стель-

маха. На Рис. 2 показаны измеренные спектры для лазера, работающего в свободном режиме (в отсутствии внешнего резонатора) и в режиме самозахвата частоты. Использование внешнего резонатора позволяет получить спектрально более чистый сигнал, снижая уровень шумов более чем на 20 дБ. Оба спектра аппроксимировались функцией Фойгта, являющейся сверткой Гауссовской и Лоренцевской компонент. Согласно данным, полученным в результате аппроксимации, удалось добиться сужения фундаментальной лазерной линии с 210 кГц до 150 Гц (Лоренцевская ширина линии) и с 2,7 МГц до 36,6 кГц для Гауссовой составляющей спектра.

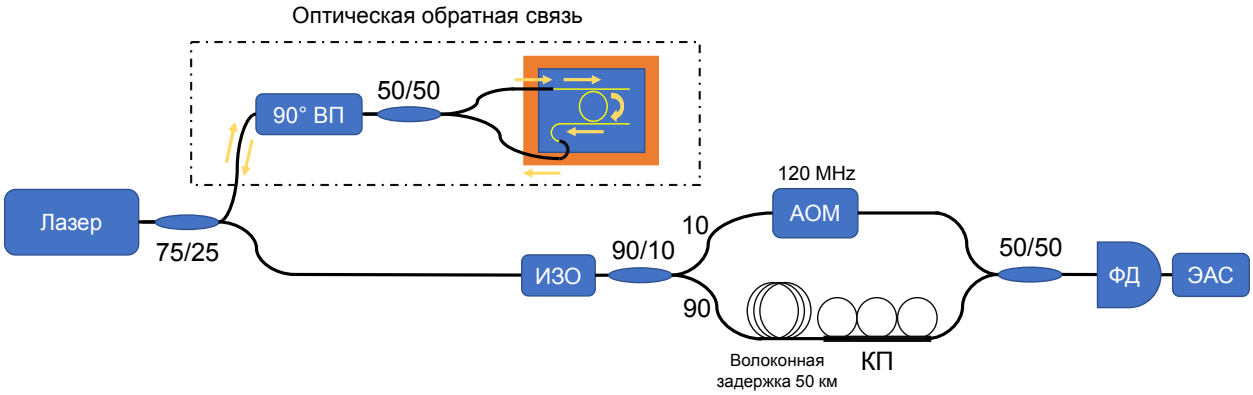


Рис. 1. Оптическая волоконная схема для сужения спектральной линии РОС-лазера с помощью интегрального кремниевого кольцевого резонатора и самогетеродинный интерферометр с задержкой 50 км для характеризации ширины лазерной линии: ВП — вращатель поляризации, ИЗО — оптический изолятор, АОМ — акусто-оптический модулятор, ФД — фотодиод, КП — контроллер поляризации, ЭАС — электрический анализатор спектра

Таким образом, в данной работе была успешно продемонстрирована работа РОС-лазера с внешним интегральный кольцевым резонатором с добротностью ~170 000, выполненным на платформе КНИ, в режиме самозахвата частоты. Результаты измерений спектральной ширины лазерной линии методом самогетеродинной интерферометрии с задержкой показали сужение фундаментальной линии лазера с 210 кГц до 150 Гц, что подтверждает эффективность метода и его потенциал для создания недорогих узкополосных источников лазерного излучения в телекоммуникационном диапазоне длин волн.

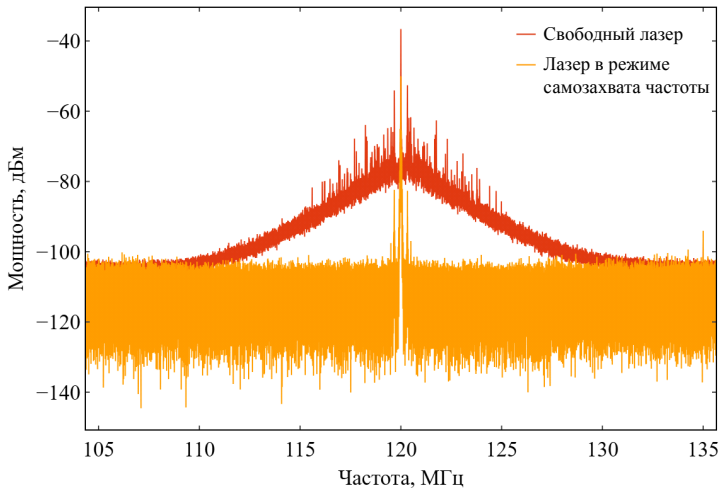


Рис. 2. Спектр РОС-лазера в свободном режиме и в режиме самозахвата частоты внешним интегральным кольцевым резонатором

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-91-06301 «Компактные лазерные генераторы высокой когерентности».

Список источников

[1] *Schunk N., Petermann K.* Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2002. Vol. 24. № 7. P. 1242–1247.

[2] *Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A.* Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum // Electronics letters. 1980. Vol. 16. № 16. P. 630–631.

[3] *Tran M.A., Huang D., Bowers J.E.* Tutorial on narrow linewidth tunable semiconductor lasers using Si/III-V heterogeneous integration // APL photonics. 2019. Vol. 4. № 11.

Narrowband Laser Source Based on a DFB Laser with an Integrated Silicon Microring Resonator

A.I. Vergules[1], D.S. Zemtsov[1], A.K. Zemtsova[1], A.S. Smirnov[1], D.M. Zhigunov[1], K.N. Garbuzov[1], S.S. Kosolobov[1], V.P. Drachev[1], A.A. Fotiadi[2], A.V. Ivanov[3], M.A. Ladugin[3], E.P. Kitsyuk[4], V.V. Svetukhin[4]

[1] *Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*
[2] *Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*
[3] *Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russia*
[4] *Scientific-Manufacturing Comples "Technological Centre", Moscow, Russia*

The aim of this work is developing a compact narrowband laser for coherent optical networks, generation of pure microwave signals, optical sensing, and spectroscopy. A microring resonator with Q-factor of ~150 000 is designed and fabricated on a 220 nm "silicon-on-insulator" platform to serve as an external resonator for a DFB laser. The laser radiation is coupled into the resonator using polished optical fibers through the grating couplers on the chip, with total coupling losses of 3 dB. Using the delayed self-heterodyne interferometry, the spectral linewidth of the laser was narrowed from 210 kHz down to 200 Hz.

Keywords: *photonic integrated circuits, silicon-on-insulator, narrowband laser, self-injection locking, microring resonator*

Излучающие свойства топологических дефектов в фотонных кристаллах, сформированных на кремниевых структурах с наноостровками Ge(Si)

Е.О. Смолина[1], А.В. Перетокин[2], И.А. Чуприн[3], М.В. Степихова[2], М.В. Шалеев[2], Е.Е. Родякина[4], Д.В. Шенгуров[2], А.В. Новиков[2]

[1] *Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия*
[2] *Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия*
[3] *Высшая школа общей и прикладной физики ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*
[4] *Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия*

В работе обсуждаются результаты исследований излучающих свойств топологических дефектов в двумерных фотонных кристаллах (ФК), сформированных на кремниевых структурах с наноостровками Ge(Si). Рассмотрены фотонные кристаллы с решеткой типа «пчелиные соты», топологический дефект в которых формировался поворотом сегмента ФК на 90° (так называемый «петлевой дефект»). Показано, что конфигурации такого типа позволяют локализовать электромагнитное поле в малой области дефекта, обеспечивая тем самым значительное (в 5 и более раз) усиление сигнала фотолюминесценции. Люминесцентный отклик таких дефектов представлен серией дублетных и синглетных мод, характеризуемых специфичными поляризационными особенностями и диаграммой направленности. Добротность наблюдаемых мод достигает значений ~ 700.

Ключевые слова: *фотонные кристаллы, топологические дефекты, люминесценция, интегральная фотоника*

Введение

Фотонные кристаллы и метаповерхности привлекают в последнее время значительное внимание исследователей, что связано с новыми открывающимися возможностями манипулирования излучением на наноуровне, управления потоками информации в схемах интегральной фотоники, созданием источников излучения для квантовых компьютеров нового поколения и др. [1]. Перспективным здесь представляется и относительно новое направление, развивающееся в этой области, связанное с задачами топологической фотоники, изучающей устойчивые к локальным возмущениям состояния света, в частности, состояния, связанные с топологическими дефектами в пространственной структуре решетки фотонного кристалла (ФК). Топологические дефекты (ТД) представляют собой кристаллографические дефекты, возникающие за счет перегруппировки структурных элементов решетки ФК без их удаления или добавления. Как показывают результаты последних исследований, свойства мод таких дефектов устойчивы к локальным деформациям, что представляет интерес с точки зрения возможности создания на их основе новых функциональных элементов фотоники [2, 3].

В данной работе рассмотрены излучающие свойства топологических дефектов петлевого типа, впервые предложенных в работе [4]. Дефекты петлевого типа реализуются поворотом сегмента фотонного кристалла на 90° и представляют собой замкнутую границу зерен в решетке ФК типа «пчелиные соты». Изученные в данной работе ФК с топологическими дефектами были получены на кремниевых структурах с наноостровками Ge(Si), излучающих в диапазоне длин волн 1,2–16 мкм. Мы покажем, что формирование таких дефектов в ФК действительно позволяет локализовать электромагнитное поле в малой области дефекта, обеспечивая тем самым значительное усиление сигнала фотолюминесценции наноостровков. Наблюдаемый люминесцентный отклик топологического дефекта хорошо согласуется с результатами теоретических расчетов, и может быть описан серией дублетных и синглетных мод, характеризуемых специфичными поляризационными особенностями и диаграммой направленности. Добротность наблюдаемых мод петлевого дефекта (Q) достигает в эксперименте значений ~ 700.

Образцы и методы исследования

Фотонные кристаллы с топологическими дефектами формировались на структуре с наностровками Ge(Si). Исходная структура выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке SOI с «захороненным» слоем оксида кремния толщиной 2 мкм. Структура содержала 5 слоев наноостровков Ge(Si), перемежающихся слоями кремния толщиной 15 нм, полная толщина структуры над слоем окисла составила 257 нм (по данным эллипсометрии). Для формирования ФК с топологическими дефектами использовались стандартные методики электронно-лучевой литографии и плазмохимического травления. Были получены фотонные кристаллы с периодами решетки a = 455–475 нм, диаметр отверстий (d) в ФК варьировался от 180 до 220 нм. В качестве примера СЭМ снимок одного из таких ФК приведен на рис. 1.

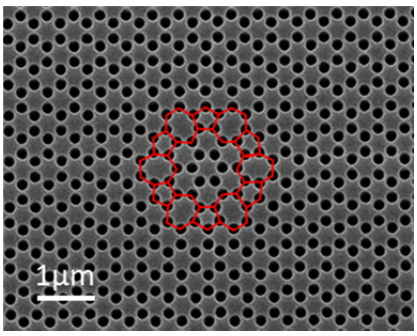


Рис. 1. СЭМ снимок фотонного кристалла с топологическим дефектом петлевого типа. Граница дефекта выделена красным цветом. Приведен ФК с периодом решетки a = 465 нм, диаметр отверстий d = 220 нм

Исследования проводились методом спектроскопии микро-фотолюминесценции (микро-ФЛ) с высоким спектральным (до 0,01 $см^{-1}$) и пространственным (до 1 мкм) разрешением. Спектральное разрешение в данном случае обеспечивалось Фурье-спектрометром «Bruker» IFS 125 HR, пространственное разрешение обеспечивалось объективами «Mitutoyo» с 50-ти кратным увеличением. Использовались объективы «M Plan APONIR 50xHR» (NA=0.65) и «M Plan APONIR 50x» (NA=0.42), позволяющие фокусировать лазерный луч в пятно диаметром 1 и 2 мкм. Сигнал ФЛ возбуждался твердотельным лазером с длиной волны возбуждения 532 нм. В серии исследований диаграмм направленности излучения и их поляризационных особенностей использовалась методика измерений микро-ФЛ с угловым разрешением [5].

Результаты и обсуждение

Спектры микро-ФЛ полученных ФК с топологическими дефектами приведены на рис. 2. На рисунке показаны в сравнении спектры микро-ФЛ исходного, не процессированного образца, фотонного кристалла и топологического дефекта, сформированного в таком ФК. Данные приведены выборочно для ФК с периодами решетки 455 и 465 нм, с диаметром отверстий 220 нм. Можно видеть, что измеряемый в топологическом дефекте сигнал микро-ФЛ представлен серией узких резонансных линий, интенсивность которых в 5 и более раз превосходит интенсивность сигнала ФЛ самого ФК. Спектры ФК в значительной степени воспроизводят сигнал ФЛ исходного образца, отражая люминесцентный отклик наноостровков Ge(Si). Можно показать, что наблюдаемые резонансные линии

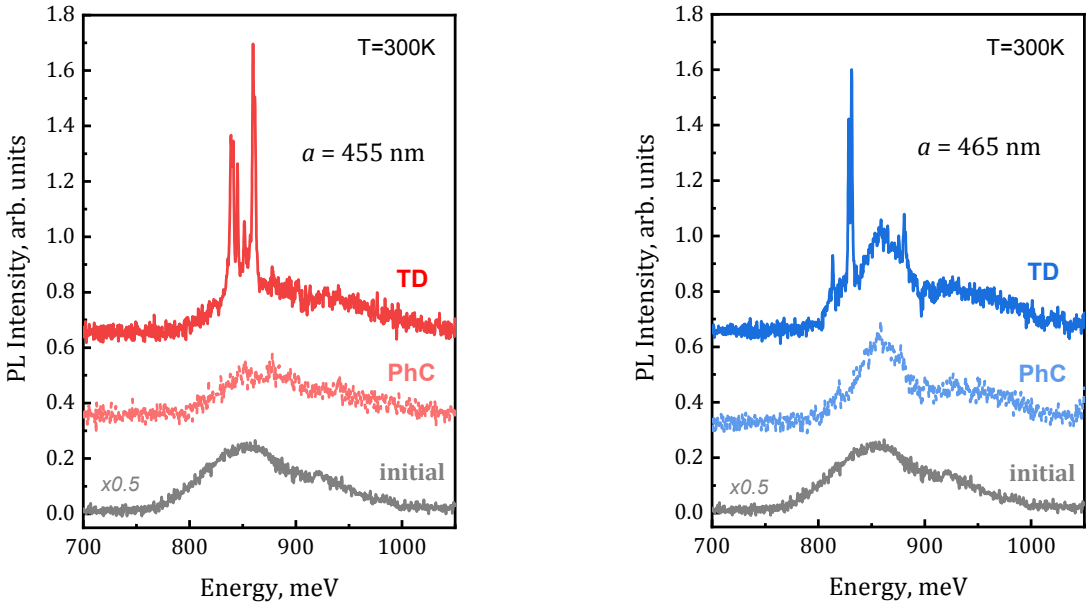


Рис. 2. Спектры микро-ФЛ исследованных ФК с топологическими дефектами: а) ФК с параметрами: a = 455 нм, d = 220 нм; б) ФК с параметрами: a = 455 нм, d = 220 нм. Приведены спектры микро-ФЛ, измеренные непосредственно в топологическом дефекте (TD), в фотонном кристалле, в котором это дефект был сформирован (PhC), а также в исходной, не процессированной области образца (initial)

в спектрах ФЛ топологических дефектов описываются серией дублетных (линии в диапазонах энергий 840 и 860 мэВ на рис. 2, а) и синглетных (линии 845 и 852 мэВ на рис. 2, а) мод, соответствующих модам $Q_{1,2}^{ii}$, $D_{1,2}^{i}$, M^{i} и H^{ii}, предсказанным теоретически (см. работу [4]). Как и в теоретических расчетах, максимальной добротностью в спектре микро-ФЛ характеризуется синглетная мода M^{i}. Добротность этой моды в эксперименте достигает значений ~ 700. Теоретические расчеты показывают, что выделенные моды топологического дефекта характеризуются специфическими поляризационными особенностями и диаграммой направленности. Так, для моды M^{i} должна наблюдаться нетривиальная поляризационная структура, обладающая топологическим зарядом, равным 1. При этом дублетные моды $D_{1,2}^{i}$ должны характеризоваться сильной направленностью излучения по нормали к плоскости ФК. Действительно, результаты эксперимента позволяют показать, что диаграмма направленности мод $D_{1,2}^{i}$ локализована в довольно узком диапазоне углов ~ 20° относительно нормали к поверхности ФК. Эти моды линейно поляризованы, тогда как поляризация моды M^{i} плавно меняется при обходе вокруг нормали к поверхности.

Заключение

Таким образом, в данной работе мы экспериментально продемонстрировали особенности проявлений петлевых топологических дефектов в люминесцентном отклике фотонных кристаллов с решеткой типа «пчелиные соты». Показано проявление связанной с топологическим дефектом серии мод, характеризуемых высокими значениями добротности. Рассмотрены поляризационные особенности и диаграммы направленности излучения выделенных мод. Показана возможность усиления сигнала ФЛ в петлевом топологическом дефекте в 5 и более раз, что является перспективным с точки зрения создания на базе таких структур источников излучения, интегрируемых в фотонные схемы.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25-22-00386).

Список источников

[1] *Schulz S.A., Oulton R.F., Kenney M. et al.* Roadmap on photonic metasurfaces // Appl. Phys. Lett. 2024. Vol. 124. Art. no. 260701.

[2] *Zhang X., Zangeneh-Nejad F., Chen Z.-G., Lu M.-H., Christensen J.* A second wave of topological phenomena in photonics and acoustics // Nature. 2023. Vol. 618. P. 687–697.

[3] *Lin Z.-K., Wang X.-R., Zhu X.-Y., Xiao M., Chen Y.-F.* Topological phenomena at defects in acoustic, photonic and solid-state lattices // Nature Reviews Physics. 2023. Vol. 5. № 8. P. 483–495.

[4] *Smolina E.O., Stepikhova M.V.* Loop Defects in Honeycomb Photonic Crystals // Physica status solidi (RRL) — Rapid Research Letters. 2025. Art. no. 2400247.

[5] *Peretokin A.V., Stepikhova M.V., Yablonskiy A.N., Shaleev M.V., Dyakov S.A., Gippius N.A., Novikov A.V.* Revealing the emissivity of a photonic crystal slab with Ge(Si) nanoislands beyond the Γ point of the Brillouin zone // J. Appl. Phys. 2025. Submitted.

Light-emitting properties of topological defects in photonic crystals realized on silicon structures with Ge(Si) nanoislands

E.O. Smolina[1], A.V. Peretokin[2], I.A. Chuprin[3], M.V. Stepikhova[2], M.V. Shaleev[2], E.E. Rodyakina[4], D.V. Shengurov[2], A.V. Novikov[2]

1 Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia
2 Institute for Physics of Microstructures RAS, Nizhny Novgorod, Russia
3 Higher School of General and Applied Physics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia
4 Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

The paper discusses the results of studies carried out in order to analyze the light-emitting properties of topological defects in two-dimensional photonic crystals (PhC) formed on silicon structures with Ge(Si) nanoislands. Photonic crystals with a honeycomb lattice are considered, in which a topological defect was formed by rotating a PhC segment by 90° (the so-called "loop defect"). It is shown that defects of this type make it possible to localize the electromagnetic field in a small region of the defect, thereby providing a significant (5 times or more) enhancement of the photoluminescence signal. The luminescent response of such defects is represented by a series of doublet and singlet modes characterized by specific polarization features and a directional pattern. The quality factor of the observed modes reaches values of ~ 700.

Keywords: *photonic crystals, topological defects, luminescence, integrated photonics*

Волоконные лазеры на основе эффектов захвата частоты

И.С. Паняев[1], П.А. Итрин[1], В.А. Рибенек[1], Д.А. Коробко[1], А.А. Фотиади[1, 2]

[1] *Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия*
[2] *Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Метод захвата частоты является эффективным механизмом самостабилизации лазерной генерации в фотонных интегральных схемах для приложений, где критически важны узкая спектральная линия и низкий фазовый шум. В докладе обсуждаются экспериментальные конфигурации подобных лазеров, собранных из стандартных телекоммуникационных волоконных компонентах и обеспечивающие суб-100-Гц лоренцеву ширину линии генерации.

Ключевые слова: *узкополосные лазеры, высокодобротные резонаторы, захват частоты*

В отличие от традиционных методов фазовой стабилизации, основанных на сложной и дорогостоящей оптоэлектронной технике, эффект захвата частоты обеспечивает пассивную стабилизацию за счет захвата лазером моды внешнего оптического резонатора, обладающего высоким Q-фактором. Пока технологии изготовления интегральных резонаторов с высокой добротностью еще находятся на ранней стадии развития, волоконные конфигурации благодаря большой длине резонатора и низким оптическим потерям уже сегодня позволяют достигать рекордных значений Q-фактора. Применение стандартных телекоммуникационных компонентов делает такие лазеры доступными и пригодными для многих приложений.

В докладе будет продемонстрировано несколько экспериментальных реализаций узкополосных лазерных источников, собранных на основе DFB-диода, работающего в режиме самозахвата частоты с внешним волоконным кольцевым резонатором [1, 2]. Среди них наиболее перспективными являются конфигурации полностью выполненные на волоконных компонентах с сохранением поляризации. Такие схемы не требуют использования поляризационных контроллеров, и соответственно, их периодической подстройки, обладают большей устойчивостью к акустическим и температурным флуктуациям. Применение термофазосдвигателя под управлением простейшей USB-DAQ карты в петле оптической обратной связи обеспечивает надежную стабилизацию лазера против внешних шумов, предотвращая скачки мод. По совокупности реализаций, в лазерных конфигурациях на основе PM компонент достигнута рекордная ширина линии генерации (по Лоренцу) ~ 20 Гц. Типичная мощность выходного сигнала составляет ~ 8 мВт, частотный дрейф не превышает 0,5 МГц/мин, а абсолютные флуктуации частоты не превышают 8 МГц. В среднем, использование в схеме PM компонентов приводит к снижению фазового и амплитудного шума (RIN) на ~ 50 дБн/Гц и ~ 10 дБн/Гц соответственно, по сравнению с аналогичными схемами без сохранения поляризации. Предложенная архитектура имеет большой потенциал для создания лазерных источников узкополосного и малошумящего излучения и представляет интерес для приложений в области когерентной связи, высокоточной спектроскопии, микроволновой фотоники и распределенных волоконно-оптических систем мониторинга

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 23-79-30017) и Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FEUF-2023-0003).

Список источников

[1] *Фотиади А.А., Коробко Д.А., Золотовский И.О.* Бриллюэновские лазеры и сенсоры: тенденции и перспективы // Автометрия. 2023. Т. 59. № 1. С. 74–86.

[2] *Panyaev I.S., Itrin P.A., Korobko D.A., Fotiadi A.A.* Sub-100-Hz DFB Laser Injection-Locked to PM Fiber Ring Cavity // Journal of Lightwave Technology. 2024. Т. 42. № 8. С. 2928–2937.

Fiber lasers based on injection locking effects

I.S. Panyaev[1], P.A. Itrin[1], V.A. Ribenek[1], D.A. Korobko[1], A.A. Fotiadi[1, 2]

[1] *Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia*
[2] *Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia*

Injection locking is an effective mechanism for stabilizing generation in photonic integrated circuits designed for applications requiring a narrow spectral linewidth and low phase noise. Unlike traditional phase stabilization methods that rely on complex and costly optoelectronic systems, lasers based on injection locking achieve passive stabilization by locking to a high-Q resonator mode. While the fabrication technologies for integrated high-Q resonators are still in the early stages of development, fiber laser configurations already demonstrate record Q-factors due to the long cavity length. The presentation will demonstrate experimental implementations of narrow-linewidth fiber lasers built from standard telecommunications components and discuss the features of injection locking mechanisms that are promising for future integration into photonic chips.

Keywords: *narrow-band lasers, high-Q resonators, injection-locking*

Секция 6
Интерферометрия и оптическая метрология

Спектральная интерферометрия: от классической к квантовой и далее к квантово-вдохновленной

Т.А. Маковецкая, Ю. Хунцюнь, А.А. Маркварт, Н.А. Ушаков

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

Измерение расстояний и микроперемещений является важной задачей во многих областях промышленности и научно-технической деятельности человека. Различные интерферометрические методы обеспечивают возможность реализации таких измерений. Тем не менее, улучшение разрешающей способности измерений и подавления негативных эффектов остается важной задачей. В докладе проведена параллель между различными интерферометрическими методами: рассмотрены аналитические выражения, описывающие интерференционные сигналы и разрешающие способности классических интерферометрических измерений. Будет показано потенциальное улучшение измерительных характеристик спектральной интерферометрии при использовании бифотонных состояний в качестве зондирующего излучения, а также обсуждены сложности реализации спектральной бифотонной интерферометрии. Предложен подход спектральной интерферометрии, основанный на состояниях с супер-Пуассоновской статистикой, легко реализуемый экспериментально и позволяющий улучшить разрешающую способность классических методов.

Ключевые слова: *спектральная интерферометрия, бифотоны, оптическая когерентная томография, оптическая частотная рефлектометрия, неразрушающий контроль, разрешающая способность*

Методы классической спектральной интерферометрии давно занимают определенную нишу в системах опроса волоконно-оптических датчиков, оптической когерентной томографии и диагностики поверхности [1]. Несмотря на развитость данных областей, при их применении для решения практических задачах имеют место такие ограничения, как конечная разрешающая способность, ограниченная длиной волны излучения и отношением сигнал-шум, а также наличие паразитных интерференционных компонент. Отчасти данные ограничения могут быть преодолены с использованием методов квантовой оптики. Спектральная интерферометрия с использованием бифотонных состояний света представляет собой эффективный инструмент для прецизионных измерений, поскольку позволяет регистрировать не только амплитуду, но и фазу сигнала [2], что особенно важно для регистрации малых перемещений с высоким разрешением. Однако, для достижения всех преимуществ, необходимо реализовывать источники бифотонов со сложными формами совместного спектрального распределения [3], что связано с экспериментальными сложностями. Также ряд ограничений в характеристики измерительных устройств на основе квантовой интерферометрии вносит специфика работы детекторов одиночных фотонов.

Известны экспериментальные реализации бифотонной интерферометрии с использованием источников излучения, обладающих супер-пуассоновской статистикой [4]. Самым простым таким источником являются тепловые источники, подчиняющиеся распределению Бозе — Эйнштейна, что приводит к значительным избыточным флуктуациям интенсивности излучения по сравнению со средним уровнем интенсивности. Примерами таких источников являются лампы накаливания и т. п. Однако, применение подобных источников в практических измерительных системах затруднительно в связи со стремлением к нулю коэффициента захвата одномодовым волокном пространственно-некогерентного излучения теплового источника.

Предложенный в данной работе подход можно назвать квантово-вдохновленным, поскольку используемый измерительный принцип основан на регистрации флуктуаций интенсивности, лежащей в основе бифотонной интерферометрии. При этом в предложенном квантово-вдохновленном подходе используется классическое лазерное излучение со специальным образом подобранной широкополосной амплитудной модуляцией. Для модуляции интенсивности излучения использовался широкополосный электрооптический модулятор, рабочая точка которого устанавливалась вблизи экстремума. На управляющий вход модулятора подавалось шумовое напряжение с нормальным распределением, которое за счет нелинейности характеристики модулятора преобразовывалось и приобретало супер-пуассоновский вид. Промодулированный сигнал подавался на вход интерферометра с опорным и сигнальным плечами разной длины. Измеряя флуктуации интенсивности в обоих плечах и вычисляя их функцию взаимной корреляции, можно найти разность оптических путей интерферометра. Улучшение разрешающей способности возможно с помощью преобразования полученных двух сигналов с фотодетекторов (флуктуации интенсивности) в бифотонный спектральный интерференционный сигнал. Для этого два сигнала с фотодетекторов делились на набор узкополосных сигналов с помощью набора полосовых фильтров. Далее в попарно выделенных спектральных интервалах находились коэффициенты корреляции этих двух сигналов. В итоге полу-

чали комплексный спектральный интерференционный сигнал в виде зависимости коэффициентов корреляции, характеризующего интерференцию второго порядка, от частоты. Далее, применяя преобразование Фурье к полученном интерференционному сигналу и находя его фазовую компоненту, можно найти изменения разности фаз света в опорном и сигнальном плечах. Спектральная плотность наблюдаемых флуктуаций разности оптических путей интерферометра имеет уровень ниже пм/Гц$^{1/2}$, по сравнению с классическими интерферометрическими измерениями с таким же источником излучения улучшение составило 2–5 раз в зависимости от частоты. Также продемонстрирована возможность устранения паразитной интерференции при наличии нескольких оптических путей разной длины в сигнальном плече интерферометра при использовании источника излучения с меньшей длиной когерентности без ущерба для разрешающей способности измерения флуктуаций разностей оптических путей.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования разработанного метода генерации излучения с супер-пуассоновской статистикой и предложенного подхода квантово-вдохновленной интерферометрии в дальнейших исследованиях и практических приложениях. Предложенный подход сочетает в себе относительную простоту реализации и потенциал повышения точности измерений, что делает его привлекательным для применения в системах распределенного волоконно-оптического мониторинга и высокоточных датчиках.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10095, https://rscf.ru/project/23-72-10095/.

Список источников

[1] *Podoleanu A.G.* Fiber Optics, from Sensing to Non Invasive High Resolution Medical Imaging // Journal of Lightwave Technology. 2010. Vol. 28. № 4. P. 624–640.

[2] *Ushakov N., Markvart A., Liokumovich L.* Spectral-domain biphoton interferometry with frequency scanning: theoretical proposal and resolution limits // JOSA B. 2022. Vol. 39. № 11. P. 2905–2913.

[3] *Ушаков Н.А., Маковецкая Т.А., Маркварт А.А., Лиокумович Л.Б.* Теоретические основы квантовой спектральной оптической когерентной томографии с частотным сканированием // Письма в ЖЭТФ. 2023. Т. 117. № 1. P. 29–36.

[4] *Zhai Y.-H., Chen X.-H., Zhang D., Wu L.-A.* Two-photon interference with true thermal light // Physical Review A. 2005. Vol. 72. № 4. Art. no. 043805.

Spectral interferometry: from classical to quantum and further to quantum-inspired

T. A. Makovetskaya, Y. Hongqun[1], A.A. Markvart, N.A. Ushakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

Measuring distances and micro-displacements is an important task in many areas of industry and human scientific and technical activities. Various interferometric methods make it possible to carry out such measurements. Nevertheless, improving the measurement resolution and reducing negative effects remains an important task. The presentation draws a parallel between different interferometric methods: analytical expressions describing interference signals and the resolution of classical interferometric measurements are considered. The potential improvement of the measurement characteristics of spectral interferometry when using biphoton states as probing light will be shown, and the difficulties of implementing spectral biphoton interferometry will be discussed. An approach of spectral interferometry based on states with super-Poisson statistics is proposed, which is easily implemented experimentally and makes it possible to improve the resolution of classical methods.

Keywords: *spectral interferometry, biphotons, optical coherence tomography, optical frequency domain reflectrometry, nondestructive testing, measurement resolution*

Исследование процесса регистрации спекл-интерферограмм вибрирующего объекта при использовании цифровой камеры с кольцевой апертурной диафрагмой

А.В. Ивченко, А.И. Жужукин, Р.Н. Сергеев

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

С целью повышения чувствительности спекл-интерферометра с непрерывным лазером и диффузно-рассеивающим элементом, установленным перед тест-объектом, произведена регистрация нормальной составляющей смещения исследуемой поверхности при использовании кольцевой диафрагмы во входном зрачке объектива цифровой камеры. Получен ряд спекл-интерферограмм соответствующих статической деформации, используемого тест-объекта, а также его форм колебаний при вибрационном возбуждении. Показана возможность получения количественной информации о полях вибросмещения и деформации.

Ключевые слова: *спекл-интерферометр, видеокамера, кольцевая диафрагма, регистрация, объект, вибросмещение*

Известно, что пространственное разрешение и чувствительность в цифровой спекл-интерферометрии непосредственно зависит от размеров спеклов на поверхности светочувствительной матрицы видеокамеры и определяется характеристиками используемой оптической системы [1, 2]. Согласно [2] размеры субъективных спеклов зависит от числовой апертуры объектива и может быть задано установкой необходимого диафрагменного числа F/d. Уменьшение размеров субъективных спеклов происходит со снижением значения параметра F/d, но ограничивается аберрациями оптической системы, а также размерами светочувствительных элементов матрицы камеры.

Используя теоретические положения работы [3], в [4] была показана возможность повышения пространственного разрешения, регистрируемого методом спекл-фотографии интерференционного поля, путем использования кольцевой диафрагмы при тангенциальном смещении поверхности исследуемого объекта.

Настоящая работа связана с исследованием процесса записи спекл-интерферограмм, обусловленных нормальной составляющей деформации и вибросмещения регистрируемого объекта при использовании кольцевой апертурной диафрагмы, установленной перед объективом видеокамеры.

Схема используемой экспериментальной установки, представленная на рис. 1, соответствует работе [5]. Установка состоит из спекл-интерферометра (поз. 1–18) с непрерывным лазером и диффузно-рассеивающим элементом, установленным перед исследуемым тест-объектом, допплеровского виброметра Polytec PDV-100 (поз. 19) и источника искусственных помех (поз.20). Выбранная оптическая схема спекл-интерферометра обеспечивала параллельный ввод интерферирующих пучков во входной зрачок видеокамеры, что формировало условия для взаимодействия спекл-полей при использовании кольцевой диафрагмы. При этом наличие виброметра Polytec PDV-100 (поз.19) и додекаэдра Look line (поз.20) открывало возможность исследования влияния кольцевой апертурной диафрагмы на помехоустойчивость оптической схемы цифрового спекл-интерферометра.

В качестве тестового объекта (поз. 9) использовалась алюминиевая пластина с габаритами 150×185×5 мм, закрепленная по периметру на раме (поз. 10, 11). Нагружение тест-объекта для его деформации производилось микрометрическим винтом (не показан на рис. 1), а для возбуждения резонансных колебаний на частоте *f* осуществлялось пьезоэлектрическим приводом (поз. 15).

Запись спекл-интерферограмм исследуемого объекта производилось согласно методике, описанной в [6]. В этом случае глубина резкости сцены и размеры спеклов на матрице видеокамеры регулировалось за счет изменения диафрагменного числа F/d объектива Pentax H6Z810.

При выполнении экспериментов были использованы кольцевые диафрагмы с внутренним диаметром кольца в диапазоне d_{CH} = 1…42 мм и постоянным внешним диаметром D_{CH} =46 мм. Применение различных кольцевых диафрагм позволяло отслеживать влияние на процесс записи относительной ширины кольцевой апертуры $\varepsilon = d_{CH}/D_{CH}$.

Выполненные исследования показали возможность регистрации нормальной составляющей деформации (рис. 2) и вибрации (рис. 3) тестового объекта при использовании объектива с диафрагмой F/d>16. Однако при значениях ε>0,04 и F/d=22 на изображении фиксировалась тень от центрального участка кольцевой диафрагмы (см. поз. 1, рис. 2, 3). Исчезновение тени при F/d=22 наблюдалось лишь для кольцевых диафрагм с ε=0,01 … 0,02.

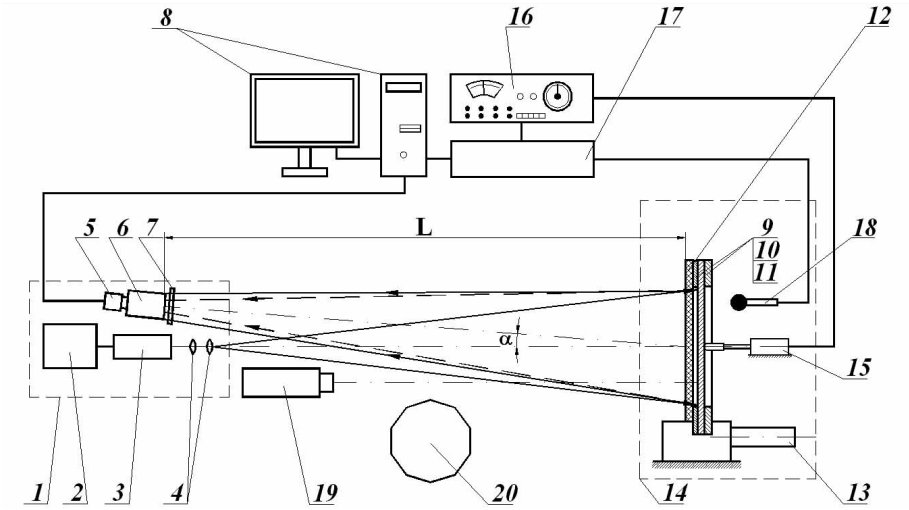
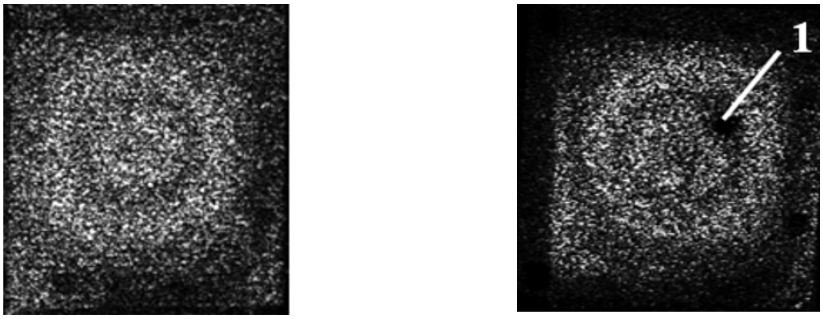
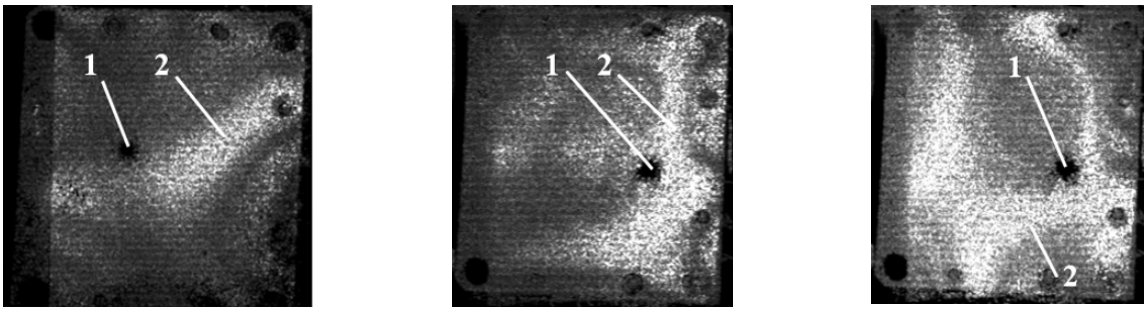


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации колебаний конструкций методом цифровой спекл-интерферометрии при использовании кольцевой диафрагмы, параметры оптической схемы спекл-интерферометра: L = 2000 мм, α<3–5°: *1* — подвижный штатив; *2* — источник питания твердотельного лазера с диодной накачкой; *3* — непрерывный лазер KLM-532/SLN-100; *4* — формирователь пучка; *5* — видеокамера WAT-902 H 300 (640×480 пикс.); *6* — объектив Pentax H6Z810; *7* — кольцевая диафрагма; *8* — компьютер; *9* — тест-объект (пластина); *10, 11* — крепежная рама; *12* — диффузно-рассеивающий элемент; *13* — тиски; *14* — оптический стол; *15* — пьезоэлектрический привод; *16* — генератор звуковых частот; *17* — осциллограф; *18* — микрофон, *19* —допплеровский виброметр Polytec PDV-100; *20* — додекаэдр Look line с генератором шума D 301



а) б)

Рис. 2. Характерный вид спекл-интерферограмм нормальной составляющей статической деформации металлической пластины, зажатой по контуру при регистрации традиционным способом (а) и при использовании кольцевой диафрагмы (б): D_{CH}=46 мм — внешний диаметр кольца, d_{CH}=2 мм — внутренний диаметр кольца, $\varepsilon=d_{CH}/D_{CH}$=0,04; диафрагменное число объектива F/d=22; 1 — тень от центральной зоны кольцевой диафрагмы



а) *f*=256 Гц б) *f*=420 Гц в) *f*=470 Гц

Рис. 3. Зарегистрированные формы колебаний возбуждаемого тест-объекта на резонансной частоте при использовании кольцевой диафрагмы. Параметры кольцевой диафрагмы: D_{CH}=46 мм, ε=0.04. Диафрагменное число объектива F/d=22; 1 — тень от центральной зоны кольцевой диафрагмы, 2 — узловая линия колебаний пластины

Это ограничивает эффективность применения кольцевых апертур для повышения чувствительности цифровых спекл-интерферометров и приводит к необходимости поиска новых путей регулирования пространственного разрешения спекл-структур при регистрации нормальной составляющей вибрации и деформации исследуемого объекта.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-10066.

Список источников

[1] *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл-интерферометрия. М.: Мир, 1986, 327 с.

[2] *Франсон М.* Оптика спеклов. М.: Мир, 1980, 176 с.

[3] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973, 720 с.

[4] *Осипов М.Н., Шапошников М.Ю.* Применение кольцевой апертурной диафрагмы в спекл-интерферометрии // Компьютерная оптика. 2002. В. 24, С. 110–113.

[5] *Ивченко А.В., Сафин А.И.* Исследование влияния широкополосных механических возмущений на качество записи интерферограмм колебаний рабочего колеса ГТД при использовании цифрового спекл-интерферометра панорамного типа // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23. № 1. С. 160–176. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2024-23-1-160-176

[6] *Журавлев О.А., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д., Комаров С.Ю.* Применение методов голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрации и шума механических конструкций. Самара: Изд-во СГАУ, 2005. 193 с.

The investigation of the speckle - interferograms recording for a vibrating object by a digital camera with an annular aperture

A.V. Ivchenko, A.I. Zhuzhukin, R.N. Sergeev

Samara National Research University, Samara, Russia

In order to increase the sensitivity of the speckle interferometer with a CW-laser and a diffuse-scattering element placed in front of the test object, the normal component of the subject surface displacement was recorded by using an annular aperture in the entrance pupil of the digital camera lens. A set of speckle interferograms corresponding to the static deformation of the test object as well as its vibration modes under vibration excitation, were acquired. The registration possibility of quantitative information on the vibration displacement and deformation fields was demonstrated.

Keywords: *speckle interferometer, video camera, annular aperture, registration, subjecte, vibration displacement*

Эффект одновременного получения теневой, шлирен и интерферометрической фотографии при применении классических фотоматериалов для голографической интерферометрии плазмы

А.В. Павлов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Для диагностики фазовых неоднородностей, возникающих над поверхностью образцов, испаряющихся под действием высокояркостного излучения реализована схема двухэкспозиционной лазерной голографической интерферометрии. Голограмма сфокусированного изображения регистрируется на голографической пленке ВРП-М. Показано, что при сканировании пленки в режиме сканирования слайдов получается только картина распределения амплитуды интенсивности, что, в сущности, является теневой фотографией. Отверстие около 5 мм в экране затемнения выступает в качестве диафрагмы, что создает «шлирен» эффект. Таким образом, из интерферограммы удается получить и теневую, и шлирен фотографии, по которым уточняются границы слоев исследуемых газо-плазменных потоков, в том числе ударных волн, на которых интерференционные полосы имеют скачки.

Ключевые слова: *двухэкспозиционная лазерная голографическая интерферометрия, теневая фотография, шлирен-фотография*

Актуальность исследования

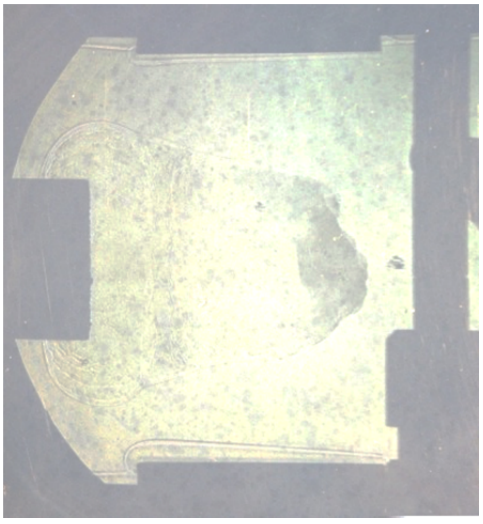
Современные методы диагностики быстротекущих плазменных процессов требуют комплексного подхода для получения достоверных данных о пространственно-временных характеристиках. Особую сложность представляет анализ газоплазменных потоков, образующихся при испарении материалов под воздействием высокоинтенсивного излучения.

Предлагаемая методика позволяет в рамках одного экспериментального измерения получать три взаимодополняющих типа визуализации: голографическую интерферограмму (для количественного анализа фазовых неоднородностей), теневую фотографию (для выявления градиентов плотности), шлирен-изображение (для визуализации оптических неоднородностей). Такой комплексный подход существенно повышает информативность диагностики по сравнению с традиционными методами, требующими раздельных измерений.

Методика эксперимента

Универсальная оптическая диагностика [1], включала в себя формирование двух голограмм сфокусированного изображения исследуемой области влияния ВУФ излучения плазмы разряда МПК.

Эти голограммы соответствовали двум состояниям объекта, до и во время интересующего времени воздействия и фиксировались на одной пленке ВРП-М. В результате получалась интерференционная картина распределения коэффициента преломления по высоте от облучаемой мишени.



Сканированная голограмма на сканере Epson perfection 3490 в режиме слайдов.
Видно формирование характерного шлирен-контраста ударных волн над мишенью

Для первоначальной настройки синхронизации и получения шлирен снимков, использовалась ПЗС-камера Видеоскан VS-285Ц с разрешением 1,3 Мп. Тень разряда проецировалась на матовый белый экран. В результате на цифровых снимках четко выделялись области потоков и ударных волн.

Несмотря на то, что шлирен снимок дает более детальную картину, основным недостатком данной схемы является то, что в условиях высоковольтного импульсного разряда шлирен снимок и интерферограмма получаются для разных разрядов. Учитывая джиттер синхронизации около 0,5 мкс и длительность всего разряда около 10 мкс использовать шлирен снимок другого разряда для уточнения параметров потоков [2] с интерферограммы невозможно.

Выход был найден случайно при сканировании пленки с голограммой на сканере Epson perfection 3490. При сканировании пленки в режиме слайдов на рисунке выделяется амплитудная составляющая тени разряда, что эквивалентно классической теневой фотографии. Одновременно реализовался слабый шлирен-эффект, что связано с использованием диафрагмы диаметром ~5 мм в экране затемнения.

Результаты и обсуждение

В результате синхронной обработки всех трех типов изображений получившихся в одном разряде и кросс-верификации полученных данных [1], выявляемые в теневом режиме четко и однозначно визуализируемые области с резкими градиентами плотности плазменного образования, а в шлирен режиме усиление визуализации областей с резкими градиентами плотности т. е. ударные волны и контактные границы ударно сжатого газа и плазмы паров образца позволяют более точно определить характер сжатия фонового газа и границу плазменного поршня светоэрозионных паров в дополнении к рассмотрению параметров плазмы и ударно сжатого фонового газа по ходу интерференционных полос.

Комбинация методов позволила уточнить положение фронта ударной волны, определить параметры плазменного слоя и верифицировать данные различными независимыми методами. С практической стороны это позволяет сэкономить время и ресурс оборудования за счет устранения необходимости проведения раздельных измерений, повысить точность за счет взаимной проверки результатов одного эксперимента разными методами и расширить диагностические возможности за счет комплексной характеристики плазменных потоков.

Заключение

В ходе работы доказана принципиальная возможность одновременного получения теневой, шлирен и интерферометрической визуализации из единой голографической записи. Разработанная методика позволяет существенно повысить информативность диагностики быстротекущих плазменных процессов. Комбинация методов обеспечивает взаимную верификацию результатов и повышение достоверности измерений. Что делает данную методику перспективной в исследовании процессов лазерной абляции, диагностики плазменных ускорителей и контроле параметров технологической плазмы.

Благодарность

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2024-0007.

Список источников

[1] *Павлов А.В., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д., Щепанюк Т.С.* Лазерная голографическая интерферометрия приповерхностных паро-плазменных потоков при испарении конденсированных веществ широкополосным, высокояркостным электромагнитным излучением УФ-ВУФ диапазона спектра // Оптические методы исследования потоков. XV Междунар. научю-техн. конф.: тр. М.: Перо, 2019. С. 222–232.

[2] *Pavlov A., Shchepanyuk T., Skriabin A., Telekh V.* Gas dynamics processes above the polymers surface under irradiation with broadband high-brightness radiation in the vacuum ultraviolet spectrum region // Polymers. 2022. Vol. 14. № 19. Art. no. 3940.

The effect of simultaneous acquisition of shadowgraph, schlieren, and interferometric images when using conventional photographic materials for holographic interferometry of plasma.

A.V. Pavlov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

For diagnosing phase inhomogeneities arising above the surface of samples evaporating under high-brightness radiation, a dual-exposure laser holographic interferometry scheme has been implemented. A focused-image hologram is recorded on VRP-M holographic film. It is shown that when scanning the film in slide-scanning mode, only the intensity amplitude distribution pattern is obtained, which is essentially a shadowgraph. A ~5 mm aperture in the darkening screen acts as a diaphragm, creating a schlieren effect. Thus, both shadowgraph and schlieren images can be extracted from the interferogram, allowing refinement of the boundaries of layers in the studied gas-plasma flows-including shock waves, where interference fringes exhibit discontinuities.

Keywords: *dual-exposure laser holographic interferometry, shadow photography, schlieren photography*

Особенности и преимущества интерферометрического контроля асферических поверхностей с применением компьютерно-синтезированных голограмм

Р.И. Куц, В.П. Корольков, Д.А. Белоусов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Производство асферических оптических поверхностей требует точного метрологического обеспечения. Интерферометрия с применением компьютерно-синтезированных голограмм выглядит весьма конкурентоспособным методом. В работе дан обзор наиболее значимых проблем, возникающих при производстве и использовании компьютерно-синтезированных голограмм в интерферометрическом контроле, а также приведены существующие пути их решения.

Ключевые слова: *контроль асферических поверхностей, компьютерно-синтезированные голограммы, интерферометрия*

Введение

Элементы с асферической поверхностью широко используются в различных видах оптических систем, позволяя облегчить устройства, удешевить производство и обеспечить более свободное преобразование волнового фронта [1]. При производстве оптических систем с асферическими поверхностями существует потребность точного воспроизведения формы поверхности оптических элементов. Таким образом, одной из главных задач при производстве таких поверхностей является метрологическое обеспечение на всех этапах их обработки.

В связи с этим на первый план выходит быстрый интерферометрический метод с применением компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) в качестве дифракционного компенсатора [2]. Точность метода может достигать единиц нанометров, и зависит она, в основном, от качества используемых компенсаторов. В данной работе дан обзор наиболее значимых проблем, возникающих при производстве и использовании КСГ для задач интерферометрического контроля.

Построение схем контроля поверхностей

Задача построения схем контроля асферических поверхностей имеет множество различных решений в зависимости от параметров поверхности. На выбор схемы контроля влияет контролируемый диаметр, числовая апертура поверхности, степень асферичности, оптические характеристики материала, из которого изготовлена поверхность и т. д. Также играют роль такие технологические параметры, как пространственное разрешение технологии и глубина формируемого рельефа КСГ. Однако, несмотря на эти ограничения, существуют ситуации, где можно отойти от привычной стратегии расчета голограмм при этом, не потеряв в качестве и/или функциональности [3].

Контроль выпуклых зеркал большого диаметра

Отдельной задачей представляется интерферометрический контроль выпуклых асферических поверхностей. Традиционные решения этой задачи включают следующие методы: прямое измерение поверхности с помощью компенсатора и измерение с помощью компенсатора отдельных частей апертуры исследуемой поверхности с последующей сшивкой результатов [4]. При прямом тестировании выпуклых асферических поверхностей КСГ по определению должно быть большего размера, чем само контролируемое зеркало. Чтобы избежать изготовления больших КСГ используют зеркало сферы Хиндла, что, однако, влечет затенение центральной области во время процесса измерения. Нельзя не упомянуть про метод интерферометрии наклонного волнового фронта, основанный на ненулевом интерферометрическом принципе [5]. По сравнению с полностью компенсационными методами измерения этот способ не требует индивидуальных и дорогих компенсаторов КСГ, что делает его более универсальным.

Выставление элементов схемы контроля

При крупносерийном производстве асферических поверхностей требуется минимизация времени настройки схемы контроля. Здесь особой задачей представляется ускорение выставления контролируемой поверхности. Для этого регистрируют интерференцию на дополнительные структурах КСГ, которые можно разделить на два типа — работающие за счет отражения от самой поверхности и работающие в совокупности с внешними отражателями, совмещенными с контролируемой поверхностью. Существуют решения (например, от Arisona Optical Metrology LLC), предлагающие готовые системы специальных внешних отражателей, обеспечивающих привязку контролируемой поверх-

ности свободной формы по всем шести степеням свободы. Реализовав систему обратной связи, можно автоматизировать и ускорить процесс выставления контролируемой поверхности [6].

Сертификация и регистрация ошибок

Точность формируемого КСГ волнового фронта ключевым образом зависит от оптического качества подложки и точности формирования дифракционной структуры. Классическим методом доказательства правильности работы КСГ является применение ответных зеркальных имитаторов поверхности и КСГ-имитаторов [7]. Данный подход учитывает влияние как подложки, так и отклонений рабочей структуры КСГ от расчетных значений. Косвенная сертификация структуры КСГ обеспечивается дополнительными марками, которые позволяют оценить отклонение позиционирования дифракционных структур от расчетного положения [8]. В осесимметричных схемах измерения асферических поверхностей влияние погрешностей КСГ эффективно устраняется за счет взаимного вращения КСГ и контролируемой поверхности.

Заключение

Совершенствование способов создания, сертификации и использования компьютерно-синтезированных голограмм сохраняют интерферометрические методы контроля асферических поверхностей востребованными с точки зрения точности и скорости исполнения. Однако, несмотря на кажущуюся простоту реализации, данный метод контроля имеет множество нюансов, требующих корректировки привычной стратегии реализации метода, и которые следует учитывать уже на этапе расчета структуры КСГ. Существуют различные способы для решения ряда задач, возникающих в нестандартных ситуациях при проектировании и использовании КСГ. Описанные в данном обзоре методики делают КСГ весьма конкурентными для задач контроля асферических поверхностей на крупносерийных и широкомасштабных производствах оптических элементов.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии на финансовую поддержку государственного задания ИАиЭ СО РАН (гос. регистрационный № 124041700107-9).

Список источников

[1] *Braunecker B., Tiziani H.J.* Advanced optics using aspherical elements // SPIE. 2008. Vol. 173. https://doi.org/10.1117/3.741689

[2] *Полещук А.Г., Насыров Р.К., Маточкин А.Е.* Методы контроля асферических поверхностей // Интерэкспо ГеоСибирь. 2010. Т. 5. № 2. С. 200–205.

[3] *Kuts R.I., Korolkov V.P., Belousov D.A., Sametov A.R., Malyshev A.I.* Combination of phase and amplitude diffractive structures in computer-generated holograms for aspheric optical testing // Proc. SPIE. 2024. Vol. 13237. Art. no. 132370U.

[4] *Wang X., Liu Z., Su H., Cheng Q., Li L. et al.* Mixed compensation for the testing of large convex aspheres // Results in Physics. 2023. Vol. 55. Art. no. 107189.

[5] *Baer G., Garbusi E., Lyda W., Pruss C., Osten W.* Automated alignment of aspheric and freeform surfaces in a non-null test interferometer // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8082. Art. no. 80821L.

[6] *Pultar R., Dresel T., Kingsley C., Massey M., McDonnell E.* Aspheric and freeform metrology solutions for production control of virtual reality head-mounted displays // Proc. SPIE. 2025. Vol. 13414. Art. no. 134141N.

[7] *Burge J.H.* Certification of null correctors for primary mirrors // Advanced Optical Manufacturing and Testing IV. SPIE. 1994. Vol. 1994.

[8] *Shimansky R.V., Belousov D.A., Korolkov V.P., Kuts R.I.* Diffractive Sensor Elements for Registration of Long-Term Instability at Writing of Computer-Generated Holograms // Sensors. 2021. Vol. 21. № 19. Art. no. 6635.

Features and advantages of interferometric testing of aspherical surfaces using computer-generated holograms

R.I. Kuts, V.P. Korolkov, D.A. Belousov

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

The production of aspherical optical surfaces requires precise metrological support. Interferometry using computer-generated holograms appears to be a very competitive method. The paper provides an overview of the most significant problems arising in the production and use of computer-generated holograms in interferometric testing, and also presents existing ways of solving them.

Keywords: *testing of aspherical surfaces, computer-generated holograms, interferometry*

Интерферометрия приповерхностных слоев, возникающих при светоэрозии материалов

А.В. Павлов, Ю.Ю. Протасов, В.Д. Телех

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Методом двухэкспозиционной лазерной голографической интерферометрии получены данные о распределении параметров в газоплазменном слое, образующемся над поверхностью материалов при их облучении интенсивным коротковолновым излучением. Основные характеристики воздействия: излучение УФ-ВУФ диапазона спектра, энергия излучения 1–2 кДж, длина образцов около 50 мм, размер области визуализации d = 150 мм. Особенности диагностической схемы, в частности использование плоских протяженных образцов, позволило обрабатывать интерферограммы в одномерном приближении, а также найти не только пространственное распределение температуры и концентрации плазмы, образующейся над поверхностью, но и их зависимость от интенсивности облучения.

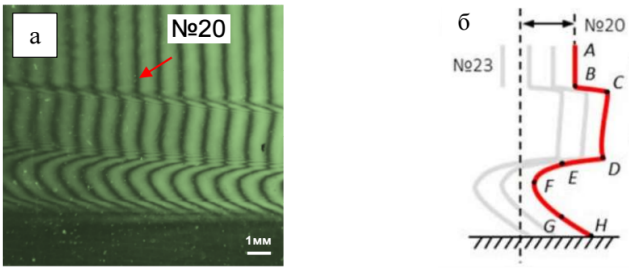
Ключевые слова: *двухэкспозиционная лазерная голографическая интерферометрия, излучение УФ-ВУФ диапазона спектра, приповерхностные газоплазменные потоки*

В докладе описана оптическая диагностика газодинамических процессов, происходящих над поверхностью образцов, находящихся в инертных газах с давлением 50–400 Торр, при их облучении широкополосным высокояркостным излучением УФ-ВУФ диапазона спектра. Подобные процессы имеют место при обработке поверхности плазменными и радиационными потоками, формировании и модификации нано-структурированного рельефа на поверхностях конструкционных материалов, а также в различных исследовательских высокоэнергетических установках.

Источником излучения являлся сильноточный плазмодинамический разряд — разряд магнитоплазменного компрессора (МПК) эрозионного типа [1–3]. Такие разряды характеризуются высокими спектрально-яркостными характеристиками излучения в УФ и ВУФ областях спектра [4]. В ближней зоне источника излучения помещались прямоугольные массивные образцы 50×30 мм, толщиной 10 мм. Воздействие излучения разряда приводило к абляции образцов с образованием над их поверхностью плазменного слоя из испаренного материала (в результате фотоионизации паров). Нагрев плазменного слоя и его расширение приводили к сжатию фонового газа над поверхностью образца. При этом, движение контактной границы плазма — газ происходило со скоростями, сравнимыми с локальной скоростью звука в плазменном слое, которая превышала скорость звука в невозмущенном фоновом газе. Это приводило к образованию фазовых неоднородностей над поверхностью образца, которые регистрировались оптическими методами.

Оптическая диагностика осуществлялась по шлирен-схеме Теплера в режиме светового поля и методом двухэкспозиционной лазерной голографической интерферометрии, которые были реализованы на базе твердотельного Nd:YAG лазера (Solar LQ-115, 532 нм). Используемая схема диагностики описана нами в [5]. Пространственное разрешение диагностической установки определялось разрешением оптической системы и системой регистрации (от 100 мкм для цифровой камеры и менее 50 мкм для фотопленки), а временное (10 нс) — длительностью лазерного импульса.

Пример получаемых интерферограмм показан на рисунке (а), на рисунке (б) показаны характерные области для приповерхностных слоев: AB — невозмущенный газ, BC — ударная волна, CD — ударно-сжатый фоновый газ, DE — контактная граница «плазма – газ», EFGH — паро-плазменный слой испаренного материала.



Фрагмент интерферограммы (а) и схема хода полос на примере полосы № 20 (б)

По полученным интерферограммам было определено распределение параметров (температуры, степени ионизации) в плазменном слое и распределение параметров в сжатом слое фонового газа. Особенности диагностической схемы, в частности использование плоских протяженных образцов,

позволили обрабатывать интерферограммы в одномерном приближении, а также найти зависимость этих параметров от интенсивности облучения.

Благодарность

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2024-0007.

Список источников

[1] *Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu.* Numerical modeling of individual plasma dynamic characteristics of a light-erosion MPC discharge in gases // Applied Sciences. 2022. № 12. Art. no. 3610.

[2] *Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Protasov Yu.S., Shashkovskii S.G.* Bright thermal VUV sources based on plasmodynamic discharges in gases // High Temp. 1989. Vol. 27. Art. no. 141.

[3] *Skriabin A.S., Telekh V.D., Pavlov A.V. et al.* Surface Degradation of Thin-Layer Al/MgF_2 Mirrors under Exposure to Powerful VUV Radiation // Nanomaterials. 2023. Vol. 13 (21). Art. no. 2819.

[4] *Протасов Ю.С.* Плазменные источники излучения высокой спектральной яркости // В кн. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 4. М.: Наука, 2000. 232 с.

[5] *Pavlov A.V., Protasov Yu.Yu., Telekh V.D., Shchepanyuk T.S.* Laser holographic interferometry of short ultraviolet radiation with high power density interaction with condensed matters // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11 (3). P. 111–125.

Interferometry of near-surface layers resulting from light erosion of materials

A.V. Pavlov, Yu.Yu. Protasov, V.D. Telekh

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Double-exposure laser holographic interferometry were used to obtain parameters distribution in a gas-plasma layer formed above the surface of materials when they are irradiated with intense short-wave radiation. The irradiated characteristics are: UV-VUV spectral range, radiation energy 1–2 kJ, sample length about 50 mm, size of the visualization area is about d = 150 mm. The features of the diagnostic scheme, in particular the use of flat extended samples, made it possible to analyzing the interferograms in a one-dimensional approximation, as well as to find not only the spatial distribution of temperature and plasma concentration formed above the surface, but also their dependence on the intensity of irradiation.

Keywords: *double-exposure laser holographic interferometry, UV-VUV radiation, near-surface gas-plasma flows*

Метрологическое обеспечение средств измерений коэффициента передачи модуляции объективов

Г.Н. Вишняков[1, 2]

[1] *ФГБУ «ВНИИОФИ», Москва, Россия*
[2] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

Качество изображения, формируемого объективом, определяется его частотно-контрастной характеристикой или коэффициентами передачи модуляции (КПМ) на различных пространственных частотах. Для обеспечения единства измерений КПМ и создания эталонной базы по воспроизведению, хранению и передаче единицы КПМ усовершенствован Государственный первичный эталон единиц оптической силы очковой оптики ГЭТ 205–2013 в части воспроизведения единицы КПМ в диапазоне длин волн 450–1550 нм. Представлены состав, принцип работы и основные метрологические характеристики эталона. В состав ГЭТ 205–2025 входит установка для измерения КПМ оптических систем и набор эталонных объективов.

Ключевые слова: *коэффициент передачи модуляции, оптическая передаточная функция, функция рассеяния точки, объектив, эталон*

Качество объектива на сегодняшний день важно как никогда ранее, в связи с повысившимся числом мегапикселей в современных цифровых камерах. Разрешающая способность цифровых снимков в действительности ограничена объективом, а не разрешением самой камеры. Однако параметр разрешение описывает только то, как много деталей способен передать объектив — и необязательно качество, с которым деталь передана.

Универсальной характеристикой отображающей оптической системы, которая говорит одновременно о разрешении и контрасте формируемых данной системой изображений, является ее частотно-контрастная характеристика, которая в оптике называется функцией передачи модуляции и отражает зависимость коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты.

Согласно ГОСТ Р 58566–2019 «Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний» коэффициент передачи модуляции (КПМ) — это отношение модуляции (контраста) в изображении миры заданной пространственной частоты с синусоидальным распределением яркости, построенным испытуемым объективом, к модуляции в объекте, безразмерная единица. Функция передачи модуляции (ФПМ) или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) — это зависимость коэффициентов передачи модуляции от пространственной частоты, мм$^{-1}$.

Для измерения КПМ существуют большой парк отечественных и зарубежных приборов, например, установка ImageMaster фирмы TriOptics, Германия, станция OptiShop фирмы CI Systems, США, оптическая скамья ОС-2000ВД фирмы ОптоТЛ, Россия.

Для метрологического обеспечения таких средств измерений КПМ создан Государственный первичный эталон единиц оптической силы и коэффициента передачи модуляции очковой оптики и объективов ГЭТ 205–2025 [1].

Одно из направлений применения ГЭТ 205–2025 состоит в передаче единицы КПМ рабочим эталонам методом сличения с помощью компаратора. В качестве рабочих эталонов используют эталонные меры КПМ двух типов: в виде одиночной плоско-выпуклой линзы и в виде склейки из двух линз [2].

В состав ГЭТ 205–2025 введен комплекс следующих средств измерений:

– установка для измерения КПМ оптических систем (УКПМ);

– набор эталонных объективов.

Рабочие эталоны применяют для передачи единицы КПМ средствам измерений КПМ методом прямых измерений.

В результате создания ГЭТ 205–2025 решена задача метрологического обеспечения установок, предназначенных для измерений КПМ.

Список источников

[1] *Вишняков Г.Н., Левина Э.Ю., Минаев В.Л.* Государственный первичный эталон единиц оптической силы и коэффициента передачи модуляции очковой оптики и объективов ГЭТ 205–2025 // Измерительная техника. 2025. Т. 74. № 2. С. 20–27. https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2025-2-20-27

[2] ОСТ 3-2635–82. Устройства для измерения функции передачи модуляции съемочных объективов. Метод поверки. 1984.

Metrological support of modulation transfer function of objectives measuring instruments

G.N. Vishnyakov[1, 2]

[1] *VNIIOFI, Moscow, Russia*
[2] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

The quality of the image formed by the objective is determined by its modulation transfer function (MTF) at various spatial frequencies. To ensure the uniformity of measurements of the MTF and create a reference base for the reproduction, storage and transmission of MTF, the State primary standard of optical power units for eyeglass optics GET 205–2013 was improved in terms of reproducing the MTF in the wavelength range 450–1550 nm. The composition, principle of operation and main metrological parameters of the State primary standard GET 205–2025 are presented. The GET 205–2025 includes an installation for measuring the MTF of optical systems and a set of reference objectives.

Keywords: *modulation transfer function, optical transfer function, point spread function, objective, standard*

Возможности применения спекл-интерферометрии при доводке конструкций турбомашин

А.И. Жужукин, О.Г. Шарафутдинова, И.Е. Репкин

ПАО «ОДК-Кузнецов», Самара, Россия

На основе оптической схемы интерферометра с разделенными пучками и гладкой опорной волной разработана система регистрации в автоматическом режиме колебаний конструкций турбомашин. Рассмотрена возможность расшифровки спекл-интерферограмм для получения полей вибросмещений и вибронапряжений. Проведены исследования связанных колебаний рабочего колеса компрессора газотурбинного двигателя.

***Ключевые слова**: спекл-интерферометрия, формы колебаний, поузловая доводка турбомашин*

В связи с появлением когерентного лазерного излучения в настоящее время оптические методы, в частности методы голографической и спекл-интерферометрии, стали широко использоваться для анализа напряженно-деформированного состояния реальных объектов, как при статических испытаниях, так и при исследованиях их вибрационного состояния. Наиболее эффективно эти методы применяются при исследовании вибрационных характеристик лопаток и рабочих колес турбомашин [1, 2]. Появление их цифровых вариантов позволило значительно сократить время исследований и снизить трудоемкость при продолжительных испытаниях [3].

На ПАО «ОДК-Кузнецов» с использованием метода цифровой корреляционной спекл-интерферометрии на основе оптической схемы интерферометра с разделенными пучками и гладкой опорной волной для проведения длительных рутинных испытаний разработана установка, позволяющая регистрировать в автоматическом режиме формы и частоты конструкций ГТД (рис. 1). Такая необходимость часто возникает в тех случаях, когда проводятся исследования всего комплекта лопаток колеса в широком диапазоне частот.

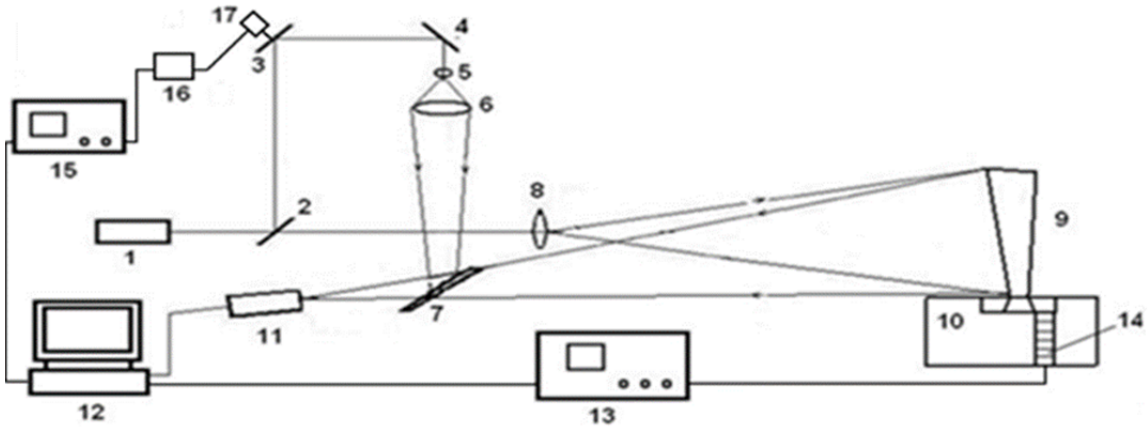


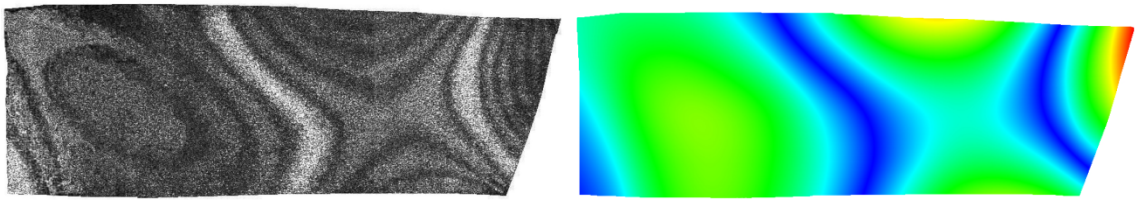
Рис. 1. Схема установки для исследования в автоматическом режиме спектра частот и форм колебаний лопаток турбомашин в заданном диапазоне: 1 — источник когерентного излучения; 2 — делитель пучка; 3, 4 — зеркала; 5, 6, 8 — линзы; 7 — оптический клин; 9 — колеблющийся объект; 10 — зажимное устройство; 11 — телекамера; 12 — ПЭВМ; 13 — усилитель возбуждающего сигнала; 14 — пьезоэлектрический возбудитель колебаний; 15 — усилитель управляющего сигнала; 16 — выпрямитель; 17 — электромагнитное устройство

Возбуждение колебаний объекта 9 в исследуемом диапазоне частот осуществляется сканирующим гармоническим сигналом, который подается с компьютера 12 через усилитель 13 на возбудитель колебаний 14, с одновременной непрерывной регистрацией камерой 11, изменяющейся в результате сканирования интерференционной картины спекл-полей, для того, чтобы каждый кадр соответствовал определенной частоте возбуждающего сигнала. В результате в компьютере 12 формируются интерференционные картины, несущие информацию о вибрационном состоянии объекта на всех частотах в виде кадров. По полученным спекл-интерферограммам, используя статистический критерий, определяются резонансные частоты, а также может быть сформирован интерферометрический фильм для наблюдения поведения колеблющегося объекта при изменении частоты возбуждения.

В качестве статистической характеристики спекл-интерферограмм может быть использована величина среднеквадратического отклонения между спекл-полями, образованными поверхностью

неподвижной и колеблющейся на разных частотах лопатки. С помощью сформированного интерферометрического фильма показан процесс перестройки колебаний лопатки с одной формы на другую. Приведены экспериментальные результаты исследования форм и частот колебаний лопатки компрессора в заданном диапазоне.

Дальнейшая обработка полученных таким образом спекл-интерферограмм позволяет определять количественные значения амплитуд вибросмещений (рис. 2).



а) б)

Рис. 2. Форма колебаний лопатки вентилятора, колеблющейся на частоте 257 Гц:
а) спекл-интерферограмма; б) поле виброперемещений

Используя эти данные, а также геометрические характеристики лопатки возможно с помощью расчетных методов вычислить относительные динамические напряжения при резонансных колебаниях на всей поверхности пера лопатки.

При поузловой доводке ГТД возникает необходимость в исследованиях вибрационных характеристик крупногабаритных объектов, особенно касается рабочих колес компрессоров и турбин. Метод цифровой спекл-интерферометрии позволяет исследовать вибрации не только изолированных лопаток, но и рабочих колес с возможностью регистрации форм колебаний каждой лопатки в составе колеса, что облегчает трактовку результатов тензометрирования. Рассмотрена задача расшифровки спекл-интерферограмм для получения полей вибросмещений и вибронапряжений колеблющихся лопаток в составе колеса.

Список источников

[1] *Селезнев В.Г., Головченко И.Ю.* Голографическая интерферометрия и ротор-статорное взаимодействие при анализе колебаний рабочих колес турбомашин // Динамика и виброакустика. 2018. Т. 4. № 3. С. 26–30.

[2] *Царева А.М., Макаева Р.Х., Сафина Д.М., Галимова Р.К.* Диагностика разрушения крыльчатки обдува генератора газотурбинного двигателя методом голографической интерферометрии // Известия вузов. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 172–174.

[3] *Федорченко Д.Г., Кочеров Е.П.* Прочностная доводка и устранение основных дефектов ГТД. Самара: Издатель Исакова Т.С. (БИЮР). 2022. 431 с.

Possibilities of speckle interferometry use in fine-tuning the design of turbomachines

A.I. Zhuzhukin, O.G. Sharafutdinova, I.E. Repkin

PJSC "UEC-Kuznetsov", Samara, Russia

Based on the optical scheme of the speckle-interferometer with split beams and a smooth reference wave, a system for recording the oscillation of turbomachine structures in automatic mode has been developed. The possibility of the speckle interferograms decoding to obtain vibration displacement and vibration stress fields was considered. The studies of the coupled oscillations for the bladed wheel of a gas turbine engine compressor were carried out.

Keywords: *speckle interferometry, vibration modes, unit-by-unit refinement of turbomachinery*

Исследование поля поверхностных волн на металлических и углеродсодержащих пленках в терагерцевом диапазоне

В.Д. Кукотенко[1], В.В. Герасимов[1, 2], В.С. Ванда[1, 2], А.Г. Лемзяков[1, 3], А.И. Иванов[4], Д.И. Красников[5], Н.И. Рагинов[5], А.К. Никитин[6]

[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] *Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*
[6] *Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия*

В работе исследуются поверхностные волны, распространяющиеся по металлическим и углеродосодержащим пленкам в терагерцовом (ТГц) диапазоне, с целью разработки плазмонных компонентов систем ТГц-связи. Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) позволяют усилить и локализовать электромагнитное поле вблизи поверхности. Для моделирования ТГц-плазмонных устройств требуется знание эффективной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя, отличающейся от модели Друде. В работе будет представлен метод экранирования для измерения глубины проникновения поля ППП в воздух. Знание глубины проникновения наряду с коэффициентом затухания ППП вдоль направления их распространения позволяет определить требуемые константы. Экспериментальные результаты получены с использованием ТГц-излучения Новосибирского лазера на свободных электронах для золотых, графеновых и углеродных нанотрубочных пленок.

Ключевые слова: *терагерцовый поверхностный плазмон-поляритон, золотые пленки, графеновые наночастицы, углеродные нанотрубки, лазер на свободных электронах, глубина проникновения*

Введение

Активное развитие ТГц-плазмоники открывает возможности не только для увеличения скорости передачи и обработки данных по сравнению с микроволновым диапазоном [1, 2], но и для создания новых методов исследования физических и химических процессов на поверхности материалов. Особенно перспективным направлением является использование ТГц ППП в спектроскопии и рефрактометрии поверхностей металлов и полупроводников [3, 4]. Для создания элементной базы терагерцовой плазмоники необходимо знать оптические свойства поверхности, по которой распространяются ППП. К ключевым измеряемым характеристикам ППП относятся глубина проникновения их поля (по интенсивности) D в окружающую среду и коэффициент затухания ППП вдоль направления распространения. Эти параметры определяют размеры, чувствительность и энергопотребление плазмонных устройств.

Образцы

В эксперименте в качестве тестовых образцов использовались стеклянные пластины 100×150×11 мм^3, на рабочую полированную грань которых методом магнетронного распыления сначала наносился адгезионный подслой хрома толщиной 10 нм, а затем слой золота пробы 99,999 % толщиной 1 мкм. Слой золота был значительно толще скин-слоя (~80 нм) и поэтому его можно было рассматривать как полубесконечную среду, а подложка хрома служила для улучшения адгезии золота, не влияя на параметры ППП. На золото (Au) толщиной 300 нм методом электронно-лучевого испарения из молибденового тигля наносился равномерный по толщине (до 3 мкм) слой сульфида цинка (ZnS). Слой ZnS необходим для увеличения эффективности преобразования излучения НЛСЭ в ППП [5], а также для уменьшения радиационных потерь ППП на шероховатостях и оптических неоднородностях поверхности образца [6].

Для изготовления образцов с композитным графеном использовали чернила, содержащие наночастицы графена и проводящий полимер PEDOT:PSS [7]. Содержание PEDOT:PSS в композите составляло 1×10^{-3} мас. %, что позволило повысить проводимость композита до $0{,}2\times10^{-3}$ С/кв [8]. На плоскую стеклянную пластинку размером 100×100×11 мм наносилась графеновая пленка толщиной 400–1000 нм методом заливки в форму, а потом высушивалась на атмосфере.

Для изготовления образцов из однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) использовались аналогичные плоские стеклянные пластины, на которые на носились пленки из ОУНТ толщиной 50–420 нм методом аэрозольного химического осаждения из газовой фазы, обладающие высокой проводимостью [9].

Метод экранирования, дополненный схемой отражения

Была реализована усовершенствованная схема, в сравнения со схемой, представленной в [10]. Данная установка позволяет измерять интенсивность не только прошедших под экраном ППП, но и отраженных от него. Полная схема установки показана на рис. 1.

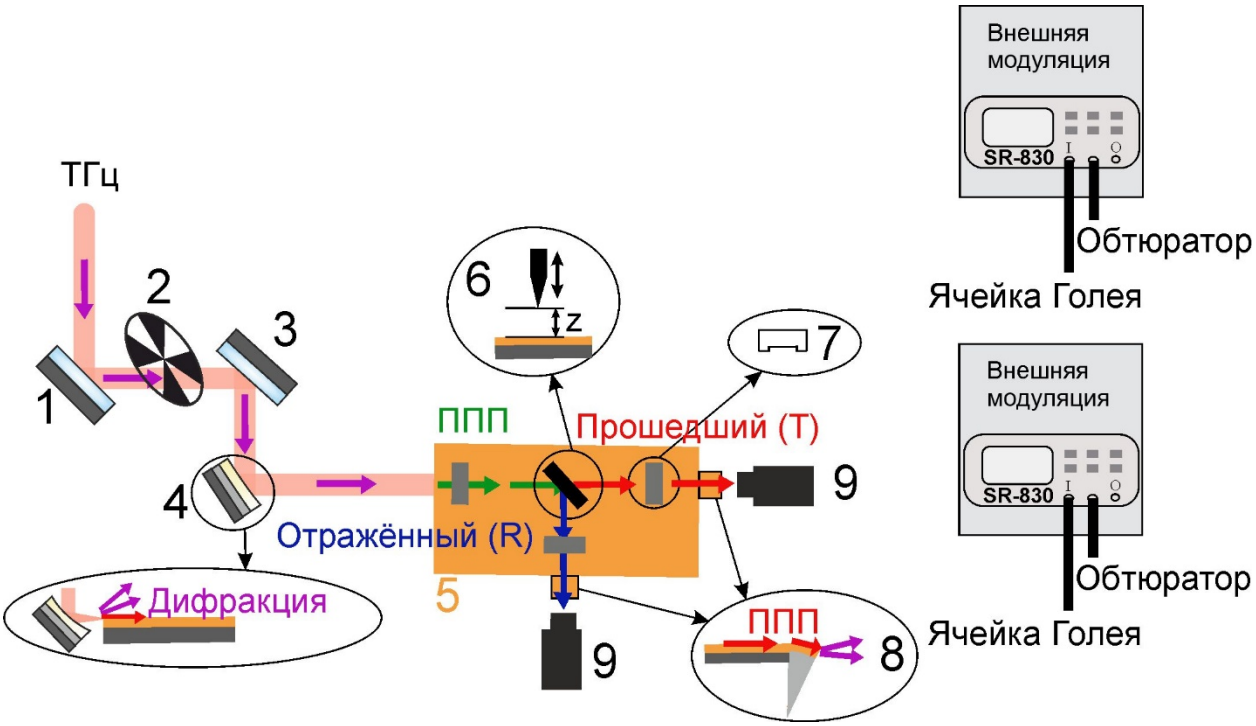


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения глубины проникновения поля ППП в воздух методом «экранирования», дополненная возможностью измерения интенсивности отраженных экраном 6 ППП

Пучок ТГц-излучения с помощью юстировочных зеркал 1 и 3 направлялся на металлизированное золотом цилиндрическое зеркало 4 (f = 75 мм), фокусировавшее его на прямоугольное ребро торца образца 5. Вследствие дифракции на этом ребре часть энергии падающего пучка преобразовывалась в ППП [5], распространявшиеся в плоскости падения по поверхности образца.

При взаимодействии с экраном 6 часть пучка ППП отражалась под углом 45°, а часть проходила под экраном, не изменяя направления своего распространения. Дойдя до края верхней грани образца 5, оба пучка ППП переходили на элементы с цилиндрической поверхностью 8, представляющие собой сегмент стеклянного цилиндра (1/8 часть). Для отсечки шума и повышения чувствительности детектирующей системы сигналы с ячеек Голея передавались на синхронные детекторы SR-830 (Stanford Research, USA), с выходов которых отфильтрованные постоянные сигналы регистрировались двухканальным цифровым осциллографом HandyScope-3 (TiePie Engineering, Netherlands). Для ускорения процесса измерений вместо транслятора с микровинтом использовался моторизованный позиционер Standa (Литва) с точностью смещения 0,083 мкм. Это позволило повысить точность выставления зазора, а также уменьшить время одного сканирования с часа до примерно одной минуты. По мере изменения позиционером ширины зазора z между экраном 6 и образцом 5 со скорость 41,5 мкм/с, сигналы от отраженных и прошедших под экраном 6 ППП записывались с помощью цифровых осциллографов в режиме самописца и затем анализировались.

Результаты

Для измерения глубины проникновения ППП использовалась установка, изображенная на рис. 1. Была получена зависимость полезного сигнала с синхронного детектора от расстояния z между экраном и образцом. Из полученных экспериментальных зависимостей сигналов пропускания/отражения вычитался постоянный шум, затем выполнялась нормировка каждой зависимости на максимальное значение своего сигнала. Далее, полученные графики дифференцировались и усреднялись, затем аппроксимировались функцией вида:

$$y = y_0 + A_1 \exp\left(-\frac{z - z_0}{D}\right),$$

где y_0 — сигнал шума, A_1 — амплитуда, z — расстояния между экраном и образцом, z_0 — начальный уровень аппроксимации, $D = \delta_d / 2$ — глубина проникновения поля ППП (по интенсивности).

Отсюда была получена зависимость глубины проникновения D поля (по интенсивности) ППП в воздух. Полученные зависимости от толщины d представлены на рис. 2 и 3.

Зависимость глубины проникновения поля ППП от толщины диэлектрического покрытия ZnS

На рис. 2 черными квадратными точками представлен график значений величины D для серии образцов с разной толщиной слоя ZnS $0 \le d \le 3$ мкм, измеренных на длине волны λ=197 мкм.

Видно, что при $d > 1$ мкм значение D постепенно уменьшается с ростом d, что соответствует теоретическим предсказаниям, согласно которым при нанесении на поверхность металла диэлектрического покрытия глубина проникновения поля ППП уменьшается [11].

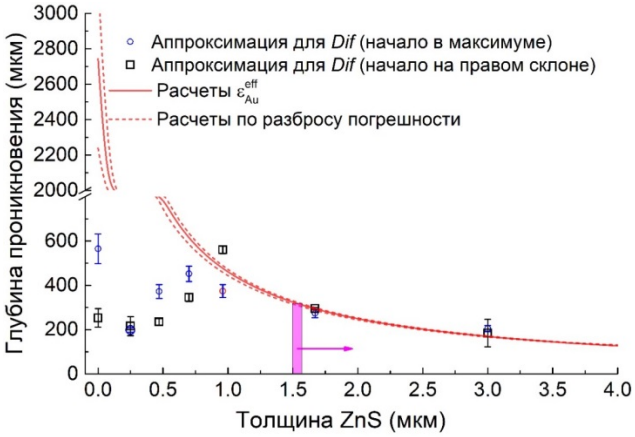


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения D поля (по интенсивности) ППП в воздух от толщины d ZnS-покрытия напыленного золота: зависимость $Dif(z)$ с началом в ее максимуме (синие кружки); зависимость $Dif(z)$ с началом на ее правом склоне (черные квадраты). Красной сплошной линией показаны расчеты $D(d)$ при эффективной диэлектрической проницаемости ε_1 поверхности золота, найденной методом плазмонной интерферометрии. Пунктирными красными линиями показаны расчетные кривые $D(d)$, найденные с учетом погрешности определения ε_1

Глубина проникновения ППП в зависимости от толщины графеновых пленок и ОУНТ

По результатам аппроксимации для разных толщин ОУНТ и графеновых пленок была построена зависимость глубины проникновения D от толщины напыляемого слоя углеродных нанотрубок (d) на длине волны λ=141 мкм, показанная на рис. 3.

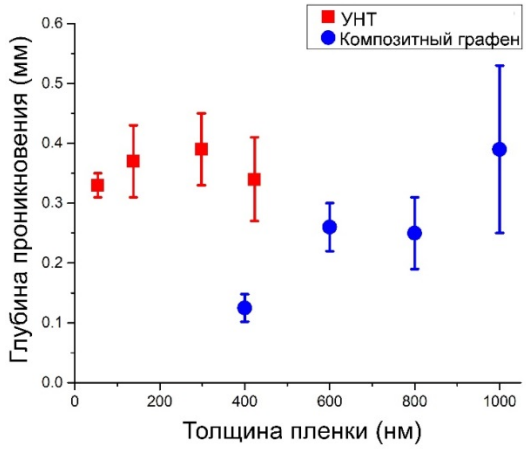


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения D поля (по интенсивности) ППП в воздух от толщины d: зависимость $D(z)$ для пленок из композитного графена (кружки); зависимость $D(z)$ для пленок из УНТ (квадраты)

Несмотря на то, что оба материала — УНТ и композитный графен — обладают металлическими свойствами, характер зависимости глубины проникновения поля D от d для них различен. Для УНТ D почти не зависит от толщины напыляемого слоя d, что говорит о том, что толщина скин-слоя данного материала не более 100 нм вследствие высокой проводимости ОУНТ. Для композитного графена увеличение d приводит к росту D, а при $d \approx 1$ мкм достигает насыщение, что демонстрирует гораздо большую толщину скин-слоя для данного материала (≈ 1 мкм) вследствие его меньшей проводимости.

Заключение

Предложен и апробирован метод «экранирования» для детектирования затухания поля поверхностных плазмон-поляритонов. Измерены глубины проникновения поля поверхностных плазмонов на структуре «Au-ZnS-воздух», графеновых пленках и ОУНТ на длинах волн λ=141 и 197 мкм.

Благодарность

В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ» в ИЯФ СО РАН. Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ за проведение измерений на научном оборудовании.

Список источников

[1] *Sengupta K., Nagatsuma T., Mittleman D.M.* Terahertz integrated electronic and hybrid electronic–photonic systems // Nature Electronics. 2018. Vol. 1. № 12. P. 622–635.

[2] *Sorger V.J., Oulton R.F., Ma R.-M., Zhang X.* Toward integrated plasmonic circuits // MRS Bulletin. 2012. Vol. 37. № 8. P. 728–738.

[3] *Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Lemzyakov A.G. et al.* Obtaining the Effective Dielectric Permittivity of a Conducting Surface in the Terahertz Range via the Characteristics of Surface Plasmon Polaritons // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 13. Art. no. 7898.

[4] *Zhang X., Xu Q., Xia L. et al.* Terahertz surface plasmonic waves: a review // Advanced Photonics. 2020. Vol. 2. Terahertz surface plasmonic waves. № 01. Art. no. 1.

[5] *Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Lemzyakov A.G., Azarov I.A.* Evaluation of the Efficiency of Generation of Terahertz Surface Plasmon Polaritons by the End-Fire Coupling Technique // Photonics. 2023. Vol. 10. № 8. Art. no. 917.

[6] *Gerasimov V.V., Nikitin A.K., Lemzyakov A.G. et al.* Obtaining the Effective Dielectric Permittivity of a Conducting Surface in the Terahertz Range via the Characteristics of Surface Plasmon Polaritons // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 13. Art. no. 7898.

[7] *Antonova I.V., Shavelkina M.B., Ivanov A.I. et al.* Graphene Flakes for Electronic Applications: DC Plasma Jet-Assisted Synthesis // Nanomaterials. 2020. Vol. 10. Graphene Flakes for Electronic Applications. № 10. Art. no. 2050.

[8] *Antonova I.V., Shavelkina M.B., Ivanov A.I. et al.* Graphene: Hexagonal Boron Nitride Composite Films with Low-Resistance for Flexible Electronics // Nanomaterials. 2022. Vol. 12. Graphene. № 10. Art. no. 1703.

[9] *Nasibulin A.G. et al.* Multifunctional freestanding single walled carbon nanotube films // ACS Nano. 2011. Vol. 5. P. 3214–21.

[10] *Kukotenko V.D., Gerasimov V.V., Lemzyakov A.G., Nikitin A.K.* Methods of Measuring the Depth of Penetration of the Field of Terahertz Surface Plasmon-Polaritons into Air // Instruments and Experimental Techniques. 2025. Vol. 68. № 1. P. 86–95.

[11] *Bell R.J., Alexander Jr.R. W., Ward C.A., Tyler I.L.* Introductory theory for surface electromagnetic wave spectroscopy // Surface Science. 1975. Vol. 48 (1). P. 253–287.

Study of the field of surface waves on metal and carbon-containing films in the terahertz range

V.D. Kukotenko1, V.V. Gerasimov1,2, V.S. Vanda[1,2], A.G. Lemzyakov[1,3], A.I. Ivanov[4], D.I. Krasnikov[5], N.I. Raginov[5], A.K. Nikitin[6]

1 Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, Novosibirsk, Russia
2 Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
3 Synchrotron Radiation Facility SKIF, p.r. Nikolsky, Kol'tsovo, Russia
4 Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia
5 Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia
6 Scientific and Technological Centre of Unique Instrum of RAS, Moscow, Russia

This study examines surface waves propagating along metallic and carbon-based films in the terahertz (THz) range, with the aim of developing plasmonic components for THz communication systems. Surface plasmon polaritons (SPPs) enable the enhancement and confinement of electromagnetic fields near material interfaces. Accurate model-

ling of THz plasmonic devices requires knowledge of the effective dielectric permittivity of the near-surface layer, which may differ significantly from the classical Drude model. The paper presents a shielding-based method for measuring the penetration depth of the SPP field into air. Together with the attenuation coefficient along the propagation direction, this enables the extraction of relevant material parameters. Experimental results were obtained using THz radiation from the Novosibirsk free-electron laser for gold films, graphene-based composites, and single-walled carbon nanotube layers.

Keywords: *terahertz surface plasmon polariton, gold films, graphene nanoparticles, carbon nanotubes, free electron laser, penetration depth*

Экспериментальные исследования двухволнового лазерного интерферометра

Е.А. Лавров

ФГУП «ВНИИФТРИ», Московская обл., р. п. Менделеево, Россия

В работе приведены результаты экспериментальных исследований разработанного двухволнового лазерного интерферометра, предназначенного для измерений линейных перемещений при неизвестном профиле температуры на трассе измерения. При измерениях перемещений предложенным лазерным интерферометром снижаются требования к поддержанию метеопараметров на трассе по сравнению с одноволновым интерферометром. В работе описана оптическая схема прибора. Приведена методика исследования метрологических характеристик интерферометра на базисе Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199. Разработанный интерферометр позволяет проводить измерения перемещений на трассе до 60 м с погрешностью менее 10 мкм при амплитуде профиля температуры до 1 °С.

Ключевые слова: *двухволновый лазерный интерферометр, прецизионные измерения длины, метрология*

Введение

Основным источником погрешности в лазерных интерферометрах, используемых в области прецизионных измерений длины, является неоднородность параметров атмосферы воздуха (метеоусловий) на пути распространения, приводящая к изменениям показателя преломления. Из-за этого измерительные базисы имеют недостаток, связанный с необходимостью использования вдоль всей измерительной трассы датчиков температуры, давления и относительной влажности. На используемом в настоящее время Государственном первичном специальном эталоне единицы длины ГЭТ 199 вдоль трассы длиной 60 м используются 40 прецизионных датчиков температуры, 5 датчиков относительной влажности и 2 барометра.

Наиболее рациональным способом исключения влияния неоднородности метеоусловий на трассе измерения является использование двухволнового дисперсионного метода [1]. Использование двухволнового дисперсионного метода позволит уменьшить количество используемых датчиков температуры и влажности до двух на концах трассы, упрощая при этом систему и скорость расчетов для показателя преломления среды.

Разработка оптической схемы и конструкции двухволнового лазерного интерферометра

Для решения поставленной задачи измерений перемещений при неизвестном профиле температуры на трассе измерения был разработан двухволновый лазерный измеритель перемещений на основе интерферометра Майкельсона. Оптическая схема двухволнового интерферометра представлена на рис. 1.

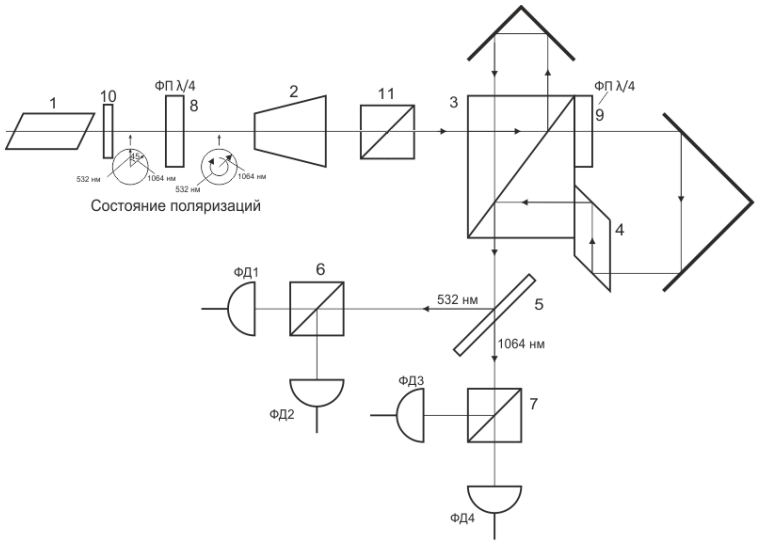


Рис. 1. Оптическая схема двухволнового интерферометра: 1 — высокостабильный лазерный излучатель (532 нм и 1064 нм), 2 — расширитель пучка, 3 — неполяризационный светоделительный кубик, 4 — перископ, 5 — спектральный делитель пучков, 6,7,11 — поляризационные светоделительные кубики, 8,9 — четвертьволновые фазовые пластинки, 10 — корректирующая призма, ФД1-ФД4 — фотодетекторы

На рис. 2 изображен разработанный двухволновый лазерный интерферометр.

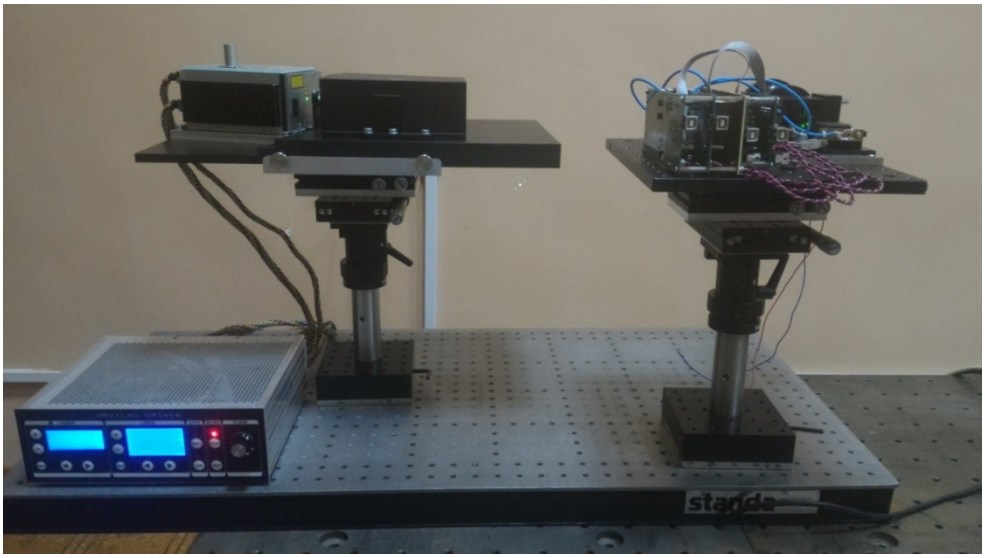


Рис. 2. Двухволновый лазерный интерферометр

Экспериментальные результаты исследований двухволнового лазерного интерферометра

В ходе проведения исследований двухволнового лазерного интерферометра на базисе Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199 были получены следующие результаты, представленные в таблице.

Результаты экспериментальных исследований двухволнового лазерного интерферометра

№	Наименование метрологической характеристики	Измеренное значение
1	Среднее квадратическое отклонение результата серии из N измерений начального положения каретки	0,04 мкм
2	Среднее квадратическое отклонение результата серии из N измерений конечного положения каретки	0,08 мкм
3	Среднее квадратическое отклонение результатов измерения длины отрезка	2,5 мкм
4	Разность оптических путей для двух длин волн 532 нм и 1064 нм	Максимальное значение 4 мкм
5	Пределы абсолютной погрешности измерений перемещений	7 мкм

Отмечается, что при законченном перемещении обеспечивается разрешение положения отражателя до 0,01 мкм (рис. 3), а в процессе перемещения — до 0,05 мкм [2].

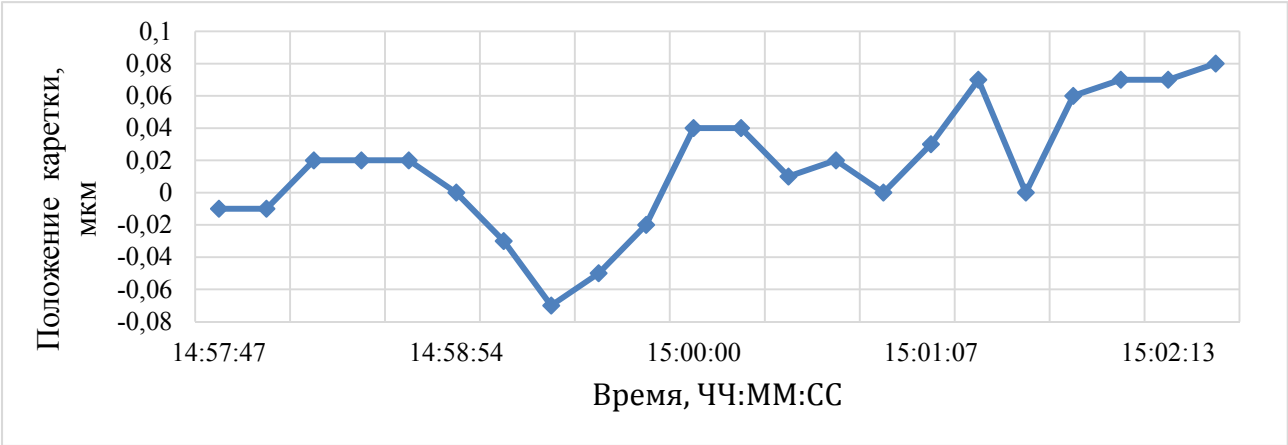


Рис. 3. Регистрация положения каретки в состоянии покоя

Заключение

Разработан двухволновый прецизионный лазерный интерферометра, позволяющий снизить зависимость погрешности измерений перемещений от распределения метеопараметров вдоль трассы. Проведенные исследования прибора показали, что интерферометр обеспечивает разрешение положения отражателя при законченном перемещении до 0,01 мкм, а в процессе перемещения — до 0,05 мкм. Такое разрешение позволяет проводить измерение перемещения на трассе до 60 м с погрешностью менее 10 мкм при амплитуде профиля температуры до 1 °С вместо 0,1 °С.

Список источников

[1] *Прилепин М.Т.* Труды ЦНИИГАиК. 1957. Вып. 114. 127 с.

[2] *Лавров Е.А., Кожеманов А.В.* Узел привода отражателя короткого плеча двухволнового интерферометра для регистрации дробных частей интерференционных полос // Альманах современной метрологии. 2021. Т. 4 (28). С. 194–199.

Experimental studies of the two-wave laser interferometer

E.A. Lavrov

FSUE "VNIIFTRI", Moscow Region, Mendeleevo, Russia

The paper presents the results of experimental researches of the developed two-wave laser interferometer for measurements linear displacements at an unknown temperature profile at the measurement trace. The requirements for meteorological parameters support during displacement measurements using the offered laser interferometer are less strict compared to using an one-wave interferometer. The article describes the optical schematic of the device. A methodology for studying the metrological characteristics of the interferometer based on the State primary special standard of the unit of length GET 199 is presented. The developed interferometer allows to measure displacements at trace up to 60 m with inaccuracies less than 10 μm at the temperature profile amplitude up to 1 °C.

Keywords: *two-wave laser interferometer, precision length measurements, metrology*

Секция 7
Квантовые оптические технологии

Квантовая коррекция ошибок в непрерывных переменных

Т.Ю. Голубева, Е.Н. Башмакова, С.Б. Королев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В докладе проведено сравнение подходов к коррекции ошибок в дискретных и непрерывных переменных. Обсуждено как строится протокол коррекции ошибок в непрерывных переменных и какие квантовые состояния для этого подходят. Рассмотрены меры оценки качества работы протокола коррекции ошибок и их практическое использование.

Ключевые слова: *квантовые вычисления, коррекция ошибок, негауссовы состояния, верность протокола коррекции ошибок*

Построение полномасштабных квантовых вычислений [1] требует включения в вычисление процедуры коррекции ошибок [2, 3]. Любой физический процесс сопровождается ошибками. При рассмотрении квантовых вычислений тип ошибок, возникающий в схеме, зависит от носителя информации и от используемых квантовых состояний. Обсуждая оптическую платформу квантовых вычислений, коррекцию ошибок обычно проводят на языке непрерывных переменных [4–8], даже если само вычисление проводится в дискретном базисе. При этом тип корректируемых ошибок зависит от квантового канала. К наиболее распространенным ошибкам относят ошибки потери фотонов и дефазировки.

В докладе мы обсудим, какие квантовые состояния можно использовать для коррекции разных типов ошибок и как их выбирать. Для количественного сравнения различных протоколов коррекции, основанных на использовании квантовых состояний разного типа, мы рассмотрим несколько мер, различных по сложности их расчета. Нашей задачей будет выделение физически значимых ситуаций, позволяющих использовать упрощенную процедуру коррекции на основе квантовых сжатых состояний Фока, генерируемых в схемах с измерениями [9].

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранты № 24-22-00004 и № 24-22-00318) и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (гранты № 24-1-3-14-1 и № 24-1-5-162-1). Т.Ю. Голубева благодарит за поддержку Санкт-Петербургский государственный университет (ID 135190645).

Список источников

[1] *Preskill J.* Quantum computing in the NISQ era and beyond // Quantum. 2018. Vol. 2. Art. no. 79. https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79

[2] *Livingston W.P., Blok M.S., Flurin E., Dressel J., Jordan A.N., Siddiqi I.* Experimental demonstration of continuous quantum error correction // Nature Communications. 2022. Vol. 13. Art. no. 2307. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29906-0

[3] *Ekert A., Macchiavello C.* Quantum error correction for communication // Physical Review Letters. 1996. Vol. 77. Art. no. 2585. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.2585

[4] *Braunstein S.L., van Loock P.* Quantum information with continuous variables // Reviews of Modern Physics. 2005. Vol. 77. Art. no. 513. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.77.513.5

[5] *Leviant P., Xu Q., Jiang L., Rosenblum S.* Quantum capacity and codes for the bosonic loss-dephasing channel // Quantum. 2022. Vol. 6. Art. no. 821. https://doi.org/10.22331/q-2022-09-29-821

[6] *Hastrup J., Andersen U.L.* All-optical cat-code quantum error correction // Physical Review Research. 2022. Vol. 4. Art. no. 043065. https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.043065

[7] *Schlegel D.S., Minganti F., Savona V.* Quantum error correction using squeezed Schrödinger cat states // Physical Review A. 2022. Vol. 106. Art. no. 022431. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.022431

[8] *Xu Q., Zheng G., Wang Y.-X., Zoller P., Clerk A.A., Jiang L.* Autonomous quantum error correction and fault-tolerant quantum computation with squeezed cat qubits // NPJ Quantum Information. 2023. Vol. 9. Art. no. 78. https://doi.org/10.1038/s41534-023-00746-0

[9] *Korolev S.B., Bashmakova E.N., Tagantsev A.K., Golubeva T.Yu.* Generation of squeezed Fock states by measurement // Physical Review A. 2024. Vol. 109. Art. no. 052428. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.109.052428

Quantum error correction in continuous variables

T.Yu. Golubeva, E.N. Bashmakova, S.B. Korolev

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

In this report, we will compare approaches to error correction in discrete and continuous variables. We will discuss how the error correction protocol in continuous variables is constructed and which quantum states are suitable for this. We will consider measures for assessing the quality of the error correction protocol and discuss the practical use of various measures.

Keywords: *quantum computing, error correction, non-gaussian states, fidelity of the error correction protocol*

Применение сжатых состояний Фока в квантовых кодах коррекции ошибок

Е.Н. Башмакова, Т.Ю. Голубева, С.Б. Королев

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В докладе продемонстрирован квантовый протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки, где в качестве кодовых слов используются сжатые состояния Фока. Проведено сравнение предлагаемый протокол с протоколом коррекции ошибок, построенным с помощью сжатых состояний котов Шредингера. Показана конкурентоспособность сжатых состояний Фока в защите квантовой информации в канале с потерей частиц и ошибкой фазы.

Ключевые слова: *квантовые вычисления, коррекция ошибок, сжатые состояния Фока, Petz верность канала*

Достижение универсальных квантовых вычислений невозможно без процедуры коррекции ошибок [1]. Для выявления и коррекции ошибок, возникающих в процессе квантовых вычислений, используются квантовые коды коррекции ошибок [2, 3]. Принцип построения бозонных кодов коррекции ошибок заключается в кодировании информации с помощью специфических квантовых состояний, имеющих некоторые характерные свойства, которые известным образом изменяются корректируемым типом ошибок [4]. Используя эти свойства квантовых состояний, мы можем получить информацию о том, как скомпенсировать ту или иную ошибку.

В настоящее время предложены протоколы коррекции ошибок, построенные с использованием различных квантовых негауссовых состояний [5–7]. Однако сжатые состояния Фока [7] имеют преимущество перед другими негауссовыми состояниями с точки зрения их экспериментальной реализации [8]. В данном докладе мы представим приближенный протокол коррекции ошибок потери фотонов и дефазировки, где в качестве кодовых слов будут использоваться сжатые состояния Фока [9]. Мы проведем сравнительный анализ сжатых состояний Фока и сжатых состояний котов Шредингера как кодовых слов с точки зрения модифицированной КЛ (Книлла — Лафламе) ценовой функции, построенной в терминах операторов Крауса ошибок [7]. Такая модификация КЛ ценовой функции позволит аналитически оценить применимость кодовых слов для коррекции рассматриваемых типов ошибок с учетом частоты их возникновения в квантовом канале. Далее мы сравним данные протоколы, используя Petz верность [10] в качестве меры. Petz верность оценивается при фиксированной процедуре восстановления для шумовых каналов с малыми ошибками. Используя эти меры, мы продемонстрируем конкурентоспособность сжатых состояний Фока для защиты квантовой информации от ошибок в канале с потерей фотонов и дефазировкой.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранты № 24-22-00004 и № 24-22-00318) и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (гранты № 24-1-3-14-1 и № 24-1-5-162-1).

Список источников

[1] *Preskill J.* Quantum computing in the NISQ era and beyond // Quantum. 2018. Vol. 2. Art. no. 79. https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79

[2] *Livingston W.P., Blok M.S., Flurin E., Dressel J., Jordan A.N., Siddiqi I.* Experimental demonstration of continuous quantum error correction // Nature Communications. 2022. Vol. 13. Art. no. 2307. https://doi.org/10.1038/s41467-022-29906-0

[3] *Leviant P., Xu Q., Jiang L., Rosenblum S.* Quantum capacity and codes for the bosonic loss-dephasing channel // Quantum. 2022. Vol. 6. Art. no. 821. https://doi.org/10.22331/q-2022-09-29-821

[4] *Hastrup J., Andersen U.L.* All-optical cat-code quantum error correction // Physical Review Research. 2022. Vol. 4. Art. no. 043065. https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.4.043065

[6] *Schlegel D.S., Minganti F., Savona V.* Quantum error correction using squeezed Schrödinger cat states // Physical Review A. 2022. Vol. 106. Art. no. 022431. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.106.022431

[7] *Korolev S.B., Bashmakova E.N., Golubeva T.Yu.* Error Correction Using Squeezed Fock States // Quantum Information Processing. 2024. Vol. 23. Art. no. 354. https://doi.org/10.1007/s11128-024-04549-w

[8] *Korolev S.B., Bashmakova E.N., Tagantsev A.K., Golubeva T.Yu.* Generation of squeezed Fock states by measurement // Physical Review A. 2024. Vol. 109. Art. no. 052428. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.109.052428

[9] *Bashmakova E.N., Korolev S.B., Golubeva T.Yu.* Bosonic quantum error correction using squeezed Fock states // arXiv:2506.00300. 2025. https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.00300

[10] *Kong L., Liu Z.-W.* Near-optimal covariant quantum error-correcting codes from random unitaries with symmetries // Physical Review X Quantum. 2022. Vol. 3. Art. no. 020314. https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.020314

Application of squeezed Fock states in quantum error correction codes

E.N. Bashmakova, T.Yu. Golubeva, S.B. Korolev

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

In this report, we will develop a bosonic quantum error correction code for both photon loss and dephasing errors based on squeezed Fock states. We will compare the proposed protocol with one based on the squeezed Schrödinger's cat states, carried out based on the KL (Knill — Laflamme) cost function and the Petz map channel fidelity. We will show that squeezed Fock states effectively protect information in a channel with particle loss and dephasing.

Keywords: *quantum computing, error correction, squeezed Fock state, Petz map channel fidelity*

Экспоненциальное сужение линий Рэмси-резонанса в оптически плотной резонансной среде

С.А. Моисеев[1], К.И. Герасимов[1], М.М. Миннегалиев[1], И.В. Брекоткин[1], Е.С. Моисеев[2]

[1] *Казанский квантовый центр, КНИТУ-КАИ, Казань, Россия*
[2] *Department of Physics, McGill University, Montreal, Canada*

Теоретически обнаружено экспоненциальное сужение линий резонансов Рэмси в оптически плотной двухуровневой атомной среде. Показано, что сужение линий обусловлено спектральным проявлением эффекта самоиндуцированной прозрачности при возбуждении атомной среды двумя световыми импульсами, имеющими каждый импульсную площадь близкую $\pi/2$. Механизмом возбуждения сверхузких линий выступает формирование сигналов многократного фотонного эха в глубине среды, что подтверждается в эксперименте с кристаллом 167Er3+:Y2SiO5 по наблюдению этих сигналов на выходе кристалла. Эксперимент, проведенный нами также по тестированию предсказываемого экспоненциального сужения линий Рэмси резонанса в этом кристалле 167Er3+:Y2SiO5 на различной оптической глубине резонансного перехода, подтвердил предсказания теории в сужении линии примерно в 2,4 раза, в соответствии с величиной оптической плотности атомного перехода. Анализ полученных результатов показывает, что использование обнаруженного эффекта открывает возможность создавать предельно узкие линии Рэмси-резонанса, используя существующие оптически толстые резонансные среды, а также ставит новые вопросы о спектральных свойствах когерентного нелинейного взаимодействия световых импульсов с такими средами и его теоретическом описании методом обратной задачи рассеяния.

Exponential narrowing of Ramsey resonance lines in an optically dense resonant medium

S.A. Moiseev[1], K.I. Gerasimov[1], M.M. Minnegaliev[1], I.V. Brekotkin[1], E.S. Moiseev[2]

[1] *Kazan Quantum Center, KNRTU-KAI, Kazan, Russia*
[2] *Department of Physics, McGill University, Montreal, Canada*

Exponential narrowing of Ramsey resonance lines in an optically dense two-level atomic medium has been theoretically detected. It is shown that the line narrowing is due to the spectral manifestation of the self-induced transparency effect upon excitation of the atomic medium by two light pulses, each with a pulse area close to $\pi/2$. The mechanism for excitation of the ultra-narrow lines is the formation of multiple photon echo signals deep within the medium, which is confirmed in an experiment with a $^{167}Er^{3+}:Y_2SiO_5$ crystal by observing these signals at the crystal output. An experiment we also conducted to test the predicted exponential narrowing of the Ramsey resonance lines in this $^{167}Er^{3+}:Y_2SiO_5$ crystal at various optical depths of the resonant transition confirmed the theoretical prediction of a line narrowing by approximately 2.4 times, consistent with the optical density of the atomic transition. An analysis of the obtained results shows that the use of the discovered effect opens up the possibility of creating extremely narrow Ramsey resonance lines using existing optically thick resonant media, and also raises new questions about the spectral properties of the coherent nonlinear interaction of light pulses with such media and its theoretical description by the inverse scattering method.

Исследование криптографической стойкости протокола квантовой криптографии на основе пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой

Д.Д. Решетников, Е.А. Вашукевич

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Исследуется криптографическая стойкость протокола квантового распределения ключей на основе вихревых оптических пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой против атак злоумышленника с последовательными и коллективными измерениями. Вычисляется взаимная информация квантовых систем отправитель-злоумышленник и получатель-злоумышленник, исследуется зависимость взаимной информации от уровня ошибок получателя. Предлагается оптимальная стратегия атаки злоумышленника, а также приводятся оценки критического уровня ошибок в канале распределения ключа в случае различных атак.

Ключевые слова: *квантовое распределение ключей, аксиально-симметричные поляризационные пучки, оптические вихри*

Введение

Пучки с аксиально-симметричной поляризационной структурой представляют интерес в задачах квантовых коммуникаций с использованием поляризационного кодирования, поскольку не требуют синхронизации плоскостей поляризации приемо-передающей аппаратуры в атмосферных оптических каналах связи [1]. Это свойство особенно актуально в системах связи между мобильными (например, связь между низко- и высокоорбитальными спутниками) или мобильными и стационарными объектами (канал связи спутник-земля). Кроме того, пучки с аксиально-симметричной поляризационной структурой возможно использовать в качестве базисных состояний в протоколах квантовой криптографии, что было продемонстрировано в работах [2, 3]. Однако такие пучки могут обладать двумя независимыми степенями свободы — орбитальным угловым моментом (ОУМ) и векторной поляризацией, то есть описываются векторами состояния в гильбертовом пространстве H, $dim(H)>2$. Эту особенность требуется учитывать при исследовании криптографической стойкости протоколов на основе рассматриваемых пучков. В данной работе обсуждается построение гильбертова пространства для аксиально-симметричных пучков, оценивается взаимная информация квантовых систем отправителя (Алиса), получателя (Боб) и злоумышленника (Ева), а также приводится оценка критического уровня ошибок для протокола, предложенного в работе [3].

Описание метода

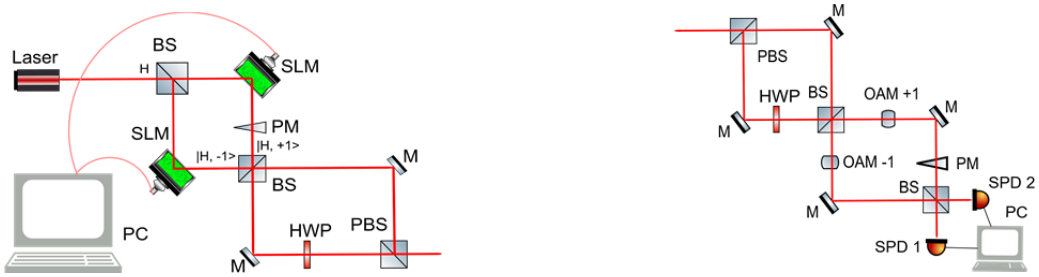
Для генерации и детектирования аксиально-симметричных состояний в криптографическом протоколе используются схемы, представленные на рисунке. В зависимости от значения фазы на модуляторе РМ формируются 4 базисных состояния в 2 сопряженных базисах:

$$\left\{\frac{1}{\sqrt{2}}(|D>|+1>+|A>|-1>),\quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|D>|+1>-|A>|-1>)\right\} \text{ и}$$

$$\left\{\frac{1}{\sqrt{2}}(|D>|+1>+i|A>|-1>),\quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|D>|+1>-i|A>|-1>)\right\},$$

где состояния $|A>, |D>$ — соответствуют состояниям с антидиагональной и диагональной поляризацией, а $|+1>, |-1>$ — состояниям с ОУМ равным ±1 соответственно. Данные состояния могут быть описаны в гильбертовом пространстве состояний куквартов ($dim(H)=4$) с базисными состояниями вида

$$|H>|+1>,\quad |H>|-1>,$$
$$|V>|+1>,\quad |V>|-1>.$$



а) Схема передатчика б) Схема приемника

Оптическая схема для протокола квантовой криптографии на основе пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой: а) схема передатчика; б) схема приемника. BS, PBS — обыкновенный и поляризационный светоделители, SLM — пространственный модулятор света, M — зеркало, HWP — полуволновая пластинка, PM — фазовый модулятор, SPD — детектор одиночных фотонов

Результаты

Поскольку выбранные для кодирования состояния не образуют MU-базис в пространстве куквартов, оптимальная стратегия для атаки Евы будет заключаться в выборе POVM-операторов, максимизирующих информацию Евы при минимальном уровне ошибок в канале связи. Оценка взаимной информации систем Алиса-Ева I_{AE}, Ева-Боб I_{EB} и Алиса-Боб I_{AB} строится аналогично работам [4, 5]. При этом в оптимальной схеме атаки Евы $I_{AE} = I_{EB}$, а значит канал связи Алиса-Боб имеет вид двоичного симметричного канала с вероятностью ошибки D, а значит $I_{AB} = \ln 2 + D \ln D + (1 - D) \ln(1 - D)$.

Заключение

Критический уровень ошибок предложенного протокола не лучше, чем в стандартном BB84. Несмотря на то, что в протоколе используются состояния из пространства куквартов, предложенный протокол не является протоколом многомерной квантовой криптографии, наличие расширенного куквартного пространства не дает Еве возможностей для проведения новых типов атак и наиболее оптимальной будет являться стратегия атаки с коллективными измерениями.

Благодарность

Авторы выражают благодарность АО «РЖД» (договор от 17.12.2024 № 5950981).

Список источников

[1] *Соколов А.Л.* Осесимметричные пучки света и их применение для космической техники // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 4. С. 64–72.

[2] *Sokolov A., Petrov V., Venediktov V., Reshetnikov D.* Axially Symmetric Hermite — Gaussian Beams and the BB84 Protocol for the Space-Earth Quantum Cryptography Channel // Photonics Russia. 2023. Vol. 17. № 7. P. 542–555.

[3] *Reshetnikov D., Sokolov A., Vashukevich E. et al.* Quantum Key Distribution Protocol Using Axially Symmetric Polarization Beams in an Atmospheric Channel // Radiophys Quantum El. 2024. Vol 67. P. 51–63.

[4] *Fuchs C., Gisin N., Griffiths R. et al.* Optimal eavesdropping in quantum cryptography. I. Information bound and optimal strategy // Phys. Rev. A. 1997. Vol. 56. Art. no. 1163.

[5] *Kulik S., Shurupov A.* On quantum key distribution using ququarts // J. Exp. Theor. Phys. 2007. Vol. 104. P. 763–742.

Investigation of cryptographic strength of a quantum cryptography protocol based on beams with an axially symmetric polarization structure

D.D. Reshetnikov, E.A. Vashukevich

Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

The cryptographic strength of a quantum key distribution protocol based on vortex optical beams with an axially symmetric polarization structure against eavesdropping with sequential and collective measurements is being investigated. The mutual information of the sender-eavesdropper and recipient-eavesdropper quantum systems is calculated, and the dependence of mutual information on the recipient's error level is investigated. The optimal strategy for eavesdropping is proposed, and estimates of the critical error level in the key distribution channel in the case of various attacks are given.

Keywords: *quantum key distribution, axially symmetric polarization beams, optical vortices*

Реалистичная атака с безошибочными измерениями на системы КРК

И.С. Сущев[1, 2], К.Е. Бугай[1, 3], Д.С. Булавкин[1], А.С. Сидельникова[1], К.Д. Бондарь[1, 2], В.М. Вахрушева[1, 2], Д.М. Мелконян[1], Д.А. Дворецкий[1, 3]

[1] *ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия*
[2] *Центр Квантовых Технологий и физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

В работе рассмотрена новая атака с безошибочными измерениями (USD) на системы квантового распределения ключей (КРК). В комбинации с лазерным повреждением оптических аттенюаторов в передатчике системы КРК, использующей метод состояний-ловушек, данная атака позволяет нарушителю выявить весь секретный ключ, оставаясь незамеченным. Оптическая схема, необходимая для построения атаки представляет собой лишь модификацию приемную часть системы КРК, что делает атаку реалистичной с учетом сегодняшних технологических возможностей.

Ключевые слова: *квантовая криптография, квантовое распределение ключей, атаки на системы крк, квантовые протоколы, лазерное повреждение*

Принято считать, что квантовое распределение ключей (КРК) обеспечивает безопасную связь, гарантированную законами квантовой физики. Для большинства протоколов КРК существует доказательство секретности для реализации с использованием одиночных фотонов. Однако реальные системы КРК обычно работают с ослабленными лазерными импульсами. Это несоответствие часто разрешается использованием метода состояний-ловушек (Decoy state) [1], который позволяет легитимным сторонам (Алисе и Бобу) генерировать секретный ключ, несмотря на наличие нежелательной многофотонной компоненты. Благодаря данному методу КРК становится устойчивым к атакам на многофотонную компоненту, таким как атака с разделением по числу фотонов (PNS) [2], атака со светоделителем (BS) [3] и атака с безошибочными измерениями (USD) [4]. Однако это справедливо только при условии правильной работы метода состояний-ловушек, то есть при фиксированных средних числах фотонов в импульсах Алисы. В свою очередь, злоумышленник (Ева) может провести атаку с лазерным повреждением (LDA) [5–8], чтобы изменить коэффициент аттенюации аппаратуры на стороне Алисы. В данной работе мы показываем, что начиная с некоторого критического значения в несколько дБ, изменение аттенюации, вызванное LDA, позволяет Еве выявить весь секретный ключ, используя лишь копию установки Боба. В отличие от атаки PNS [9, 10], данная атака на основе USD-измерений может быть проведена с использованием современных технологий.

LDA является известной стратегией, направленной на изменение средних чисел фотонов в импульсах Алисы путем изменения степени пропускания фиксированных или переменных аттенюаторов с помощью высокомощного излучения [5–8]. Были опубликованы работы, показавшие, что такое изменение аттенюации компрометирует безопасность КРК с состояниями-ловушками [11], делая его уязвимым для атаки PNS. Однако для проведения PNS Еве необходимо осуществить квантовое неразрушающее (QND) измерение числа фотонов, сохранить квантовое состояние в квантовой памяти и заменить квантовый канал на канал без потерь. Считается, что это выходит за пределы современных технологий [9, 10]. В этой работе мы показываем, что именно атака на основе безошибочных измерений представляет реальную угрозу безопасности современных систем КРК.

Рассмотрим стратегию атаки USD без QND-измерений и квантовой памяти, которую можно осуществить с использованием современных технологий. После проведения LDA среднее число фотонов в импульсах Алисы возрастает в к раз. Далее, Ева проводит измерения над перехваченными импульсами. Как оказывается, Еве нужна лишь копия установки Боба для полного выявления ключей (рис. 1). Получив конклюзивный результат, когда срабатывают ровно 3 детектора, она отправляет соответствующий классический импульс Бобу, который будет детектироваться с почти единичной вероятностью. Таким образом, темпы отсчетов на стороне Боба определяются вероятностью конклюзивных результатов измерений Евы.

В представленной работе мы смоделировали оценку темпа отсчета однофотонной компоненты методом Decoy state при различных изменениях коэффициента аттенюации к (рис. 2). Как видно, оценка темпа отсчета однофотонной компоненты начинает резко возрастать после превышения некоторого порога, лежащего в диапазоне 10–20 дБ. Просветление фиксированных и переменных аттенюаторов на такие величины ранее демонстрировалось в экспериментальных работах [5–8]. Таким образом, при проведении данной атаки Ева добьется ненулевой длины ключа, выработанной между легитимными пользователями, в то время как ей будет доступна вся информация о нем.

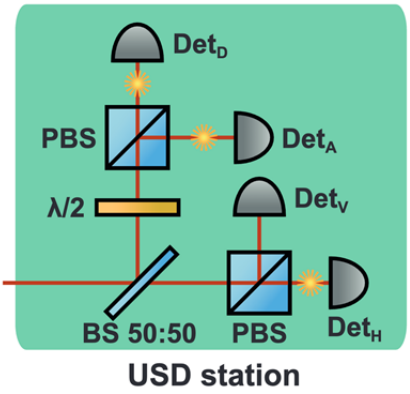


Рис. 1. Установка Евы при поляризационном кодировании для атаки USD с конклюзивным результатом для горизонтально поляризованного состояния: $\mathrm{Det}_{H,V,D,A}$ — детекторы для горизонтальной, вертикальной, диагональной и антидиагональной поляризации; PBS — поляризационный светоделитель; BS 50:50 — симметричный светоделитель; λ/2 — полуволновая пластинка для выбора диагонального базиса

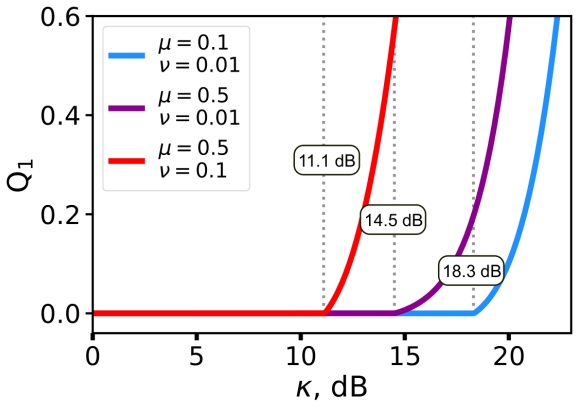


Рис. 2. Зависимость оценки прироста одиночных фотонов от изменения ослабления для различных параметров состояний-ловушек при атаке USD. Критические значения выделены серыми линиями

Мы описали реалистичную атаку на системы КРК, которая сочетает в себе лазерное повреждение и безошибочные измерения. Мы представили установку Евы для USD-измерений, которая по сути является копией приемной станции Боба. В отличие от PNS, представленная атака USD может быть реализована с использованием современных технологий. Мы обнаружили, что данная атака позволяет Еве получить весь ключ при превышении порогового значения изменения коэффициента аттенюации. Этот результат подчеркивает, что при разработке системы КРК важно убедиться, что используемые аттенюаторы устойчивы к LDA, путем тщательного выбора и тестирования конкретных моделей аттенюаторов, контроля их функционирования во время сеанса КРК или мониторинга введения внешнего излучения [12]. В таком случае безопасность КРК будет сохранена.

Список источников

[1] *Lo H., Lo H., Ma X., Chen K.* Decoy state quantum key distribution // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 94. Art. no. 230504.

[2] *Brassard G., Lütkenhaus N., Mor T., Sanders B.C.* Limitations on practical quantum cryptography // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 85. Art. no. 1330.

[3] *Bennett C.H., Bessette F., Brassard G., Salvail L., Smolin J.* Experimental quantum cryptography // J. Cryptol. 1992. Vol. 5. Art. no. 3.

[4] *Yuen H.P.* Quantum amplifiers, quantum duplicators, and quantum cryptography // Quantum Semiclass. Opt. 1996. Vol. 8. Art. no. 939.

[5] *Huang A., Li R., Egorov V., Tchouragoulov S., Kumar K., Makarov V.* Laser-damage attack against optical attenuators in quantum key distribution // Phys. Rev. Appl. 2020. Vol. 13. Art. no. 034017.

[6] *Ruzhitskaya D.D., Zhluktova I.V., Petrov M.A., Zaitsev K.A., Acheva P.P., Zunikov N.A. et al.* Vulnerabilities in the quantum key distribution system induced under a pulsed laser attack // J. Sci. Tech. Inf. Tech. Mech. Opt. 2021. Vol. 136. Art. no. 837.

[7] *Alferov S.V., Bugai K.E., Pargachev I.A.* Study of the vulnerability of neutral optical filters used in quantum key distribution systems against laser damage attack // JETP Lett. 2022. Vol. 116. Art. no. 123.

[8] *Bugai K.E., Zyzykin A.P., Bulavkin D.S., Bogdanov S.A., Sushchev I.S., Dvoretskiy D.A.* Laser damage attack on a simple optical attenuator widely used in fiber-based QKD systems // Proc. 2022 Int. Conf. Laser Optics (ICLO). 2022. Art. no. 1.

[9] *Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.* Quantum cryptography // Rev. Mod. Phys. 2002. Vol. 74. Art. no. 145.

[10] *Kulik S.P., Kravtsov K.S., Molotkov S.N.* Experimental resources needed to implement photon number splitting attack in quantum cryptography // Laser Phys. Lett. 2022. Vol. 19. Art. no. 025203.

[11] *Huang A., Navarrete Á., Sun S.H., Chaiwongkhot P., Curty M., Makarov V.* Laser-seeding attack in quantum key distribution // Phys. Rev. Appl. 2019. Vol. 12. Art. no. 064043.

[12] *Bugai K.E., Sushchev I.S., Bulavkin D.S., Lokhmatov R.Y., Dvoretskiy D.A.* Protection method against powerful emission attacks based on optical-fiber fuse element // Proc. 2024 Int. Conf. Laser Optics (ICLO). IEEE, 2024. Art. no. 446.

Realistic unambiguous state discrimination attack against QKD systems

I.S. Sushchev[1, 2], K.E. Bugai[1, 3], D.S. Bulavkin[1], A.S. Sidelnikova[1], K.D. Bondar[1, 2], V.M. Vakhrusheva[1, 2], D.M. Melkonian[1], D.A. Dvoretskiy[1, 3]

[1] *SFB Lab LLC, Moscow, Russia*
[2] *Quantum Technology Centre and Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[3] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

This work presents a novel unambiguous state discrimination (USD) attack on quantum key distribution (QKD) systems. When combined with laser-induced damage to optical attenuators in the transmitter of a decoy-state QKD system, the attack enables an adversary to fully recover the secret key while remaining undetected. The optical setup required to implement the attack is merely a modification of the receiver side of a typical QKD system, making the attack feasible under current technological capabilities.

Keywords: *quantum cryptography, quantum key distribution, QKD system attacks, quantum protocols, laser-induced damage*

Параметрическая генерация многомодового сжатого излучения при наличии дисперсии внутри резонатора

К.С. Тихонов, Д.М. Малышев, В.А. Аверченко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В нашей работе мы рассмотрели процесс генерации многомодового квадратурно-сжатого излучения в процессе параметрического рассеяния внутри кристалла, помещенного в оптический резонатор с нескомпенсированной дисперсией групповых скоростей (ДГС). Считая дисперсию малой, нам удалось решить квантовые уравнения Гейзенберга для внутрирезонаторного поля с помощью теории возмущений. Мы показали, какие качественные эффекты, кроме расплывания формы светового импульса, оказывает ДГС на свойства сгенерированного квантового многомодового излучения, а также оценили количественные характеристики этого влияния. Кроме того, мы предложили подход, как влияние ДГС внутри резонатора может быть скомпенсировано в эксперименте с помощью специальной процедуры измерения сигнала без включения в схему дополнительных оптических элементов.

Ключевые слова: *квантовая оптика, квадратурно-сжатый свет, дисперсия групповых скоростей, оптический параметрический генератор*

Многомодовый квадратурно-сжатый свет является ключевым ресурсом для квантовых сетей, бозонного сэмплинга и оптических квантовых вычислений в непрерывных переменных. Кроме того, он широко используется в квантовой метрологии, измерении времени, квантовой магнитометрии и, в особенности, в детектировании гравитационных волн [1].

Использование процесса спонтанного параметрического рассеяния (СПР) света в нелинейных оптических средах является одним из наиболее универсальных методов генерации сжатого света. В частности, этот подход может быть реализован как в непрерывном, так и импульсном режимах, а также в различных конфигурациях оптических схем, включающие оптические параметрические генераторы, нелинейные волноводы, интегральную оптику и другие. Все это позволяет управлять пространственно-временными характеристиками и модовой структурой генерируемого сжатого света, что обеспечивает гибкость его использования в конкретных приложениях.

Теоретически и экспериментально было показано, что синхронно накачиваемый оптический параметрический генератор (SPOPO) эффективно генерирует многомодовый квадратурно-сжатый свет [2]. Излучение SPOPO во временной области представляет собой регулярную последовательность фемтосекундных коррелированных импульсов. Каждый импульс состоит из набора широкополосных супермод, причем каждая супермода находится в независимом квадратурно-сжатом состоянии (рис. 1). В частотной области генерируемое излучение проявляется как набор частотных гребенок, где каждая гребенка также пребывает в независимом квадратурно-сжатом состоянии. Данный тип излучения обладает уникальными свойствами, что делает его чрезвычайно перспективным для широкого круга применений. Так, например, он может быть использован в навигации для синхронизации удаленных друг от друга часов. Другое применение — это создание кластерных состояний, которые играют ключевую роль в оптических однонаправленных квантовых вычислениях на основе измерений, а также в квантовых сетях.

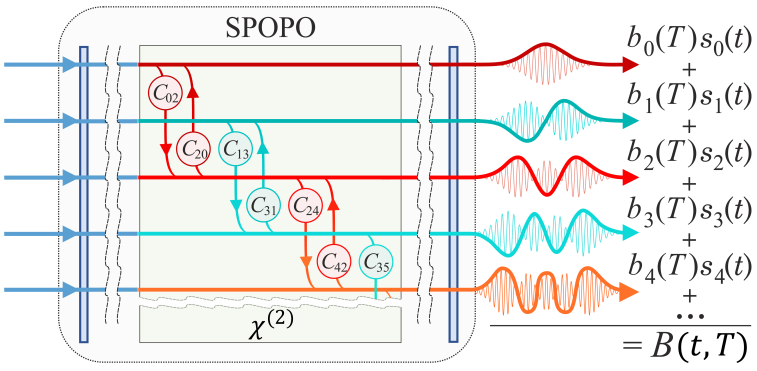


Рис. 1. Схематическое изображение многомодовой структуры излучения SPOPO с указанием линейной связи между квадратурно-сжатыми супермодами, вызванной наличием дисперсии

Изучение свойств генерации света с помощью SPOPO имеет принципиальное значение для управления его характеристиками, повышения степени сжатия и возбуждения квадратурно-сжатых супермод. В нашей работе [3] мы исследовали влияние дисперсии групповой скорости в нелинейном кристалле и на элементах резонатора на излучение SPOPO ниже порога генерации. Мы предложили подход, основанный на теории возмущений, с помощью которого нам удалось решить квантовые уравнения Гейзенберга для внутрирезонаторного поля в присутствии дисперсии. Мы показали, что наличие дисперсии групповых скоростей приводит не только к расплыванию временного профиля каждой супермоды излучения, но и к образованию линейной связи между ними. Это, с одной стороны, приводит к уменьшению степени сжатия отдельных супермод, но, с другой стороны, приводит к их запутыванию, что может быть использовано в квантово-информационных приложениях. Мы также оценили границы применимости теории возмущений, использовав квазиклассический подход для описания рассматриваемой нами физической системы. Кроме того, мы показали, как влияние дисперсии может быть скомпенсировано в процессе измерения (рис. 2).

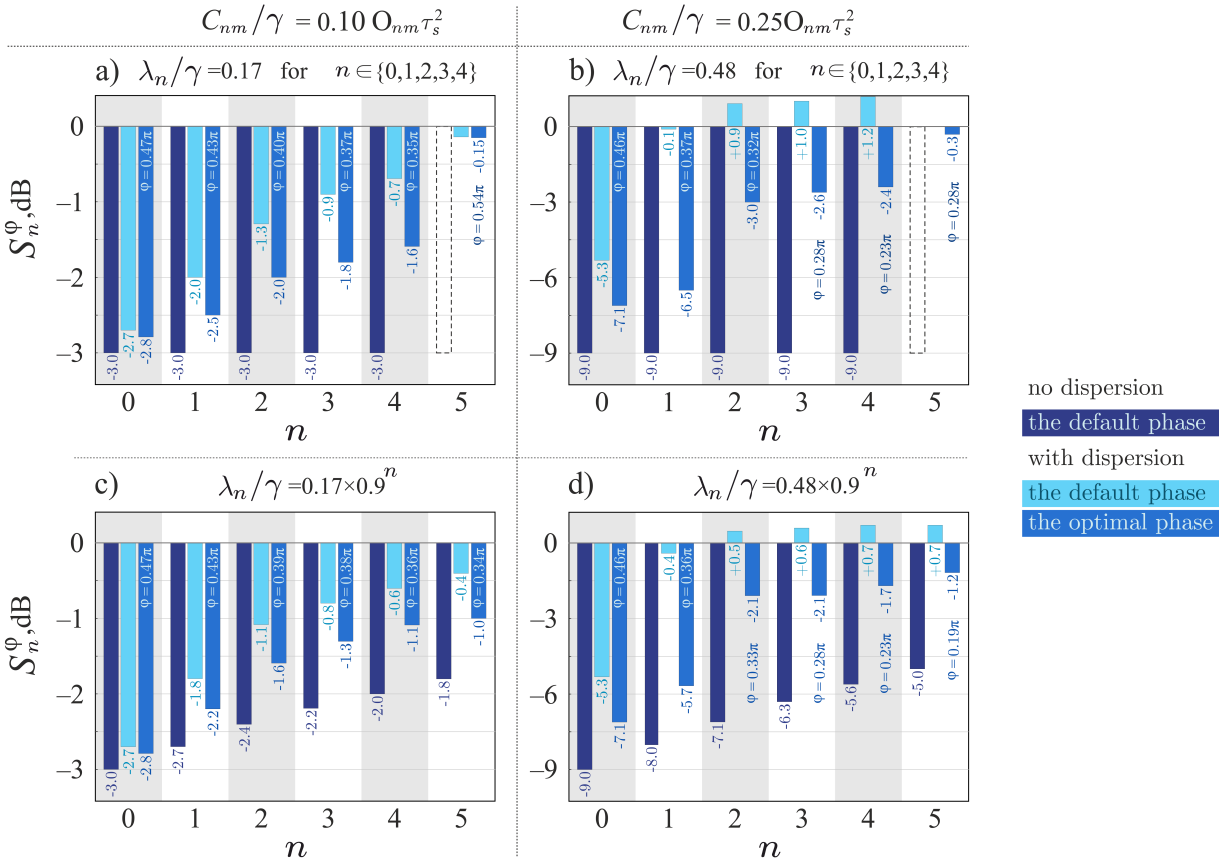


Рис. 2. Степень сжатия первых шести супермод SPOPO в отсутствие дисперсии и при наличии дисперсии. Параметры задачи были выбраны аналогично эксперименту [2]

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-22-00318).

Список источников

[1] *Fabre C., Treps N.* Modes and states in quantum optics // Review of Modern Physics. 2020. Vol. 92. Art. no. 035005.

[2] *Roslund J., de Araujo R.M., Jiang S., Fabre C., Treps N.* Wavelength-multiplexed quantum networks with ultrafast frequency combs // Nature Photonics. 2014. Vol. 8. P. 109–112.

[3] *Averchenko V.A., Malyshev D.M., Tikhonov K.S.* Effect of group-velocity dispersion on the generation of multimode pulsed squeezed light in a synchronously pumped optical parametric oscillator // New Journal of Physics. 2025. Vol. 26. № 12. Art. no. 123017.

Parametric generation of multimode squeezed light in the presence of group velocity dispersion inside the cavity

K.S. Tikhonov, D.M. Malyshev, V.A. Averchenko

Saint-Petersburg State University, St.-Petersburg, Russia

In this study, we examined the process of parametric generation of multimode squeezed light inside a nonlinear crystal placed in an optical cavity with uncompensated group-velocity dispersion (GVD). Considering the dispersion to be small, we solved the Heisenberg equations for the intracavity light field using perturbation theory. We demonstrated the qualitative effects of GVD on the properties of the generated quantum multimode radiation, beyond the blurring of the light pulse shape. Furthermore, an evaluation of the quantitative characteristics of these effects was conducted. Finally, we proposed an approach for the compensation of the GVD effects inside the cavity by means of a special signal measurement procedure, without the necessity for the inclusion of additional optical elements in the experiment's scheme.

Keywords: *quantum optics, squeezed light, group-velocity dispersion, optical parametric oscillator*

Нелинейные сегнетоэлектрические кристаллы титанил-фосфата калия

С.М. Шандаров[1], К.П. Мельник[1], А.А. Тик[1], Ю.В. Кулешов[1], В.Г. Дю[1], Е.Н. Савченков[1], Н.И. Буримов[1], А.Р. Ахматханов[2], М.А. Чувакова[2], В.Я. Шур[2]

[1] *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*
[2] *Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*

Представлены результаты синтеза раствор-расплавным методом высокоомных кристаллов титанил-фосфата калия (KTP). Подтверждена возможность создания на их основе периодически поляризованных доменных структур, предназначенных для квазисинхронных нелинейных преобразований спектральных характеристик лазерного излучения.

Ключевые слова: *кристаллы KTP, оптическое качество, периодически поляризованные доменные структуры, генерация второй гармоники, параметрическая генерация света*

Сегнетоэлектрические кристаллы титанил-фосфата калия $KTiOPO_4$ (KTP), имеют хорошие нелинейно-оптические и электрооптические свойства, характеризуются высокой стойкостью к оптическому повреждению и позволяют создавать на их основе оптические элементы и периодически поляризованные доменные структуры, используемые для электрооптических и нелинейно-оптических преобразований временных, пространственных и спектральных характеристик лазерного излучения [1–7]. В настоящем сообщении представлены результаты экспериментов по выращиванию высокоомных кристаллов KTP раствор-расплавным методом и по оценке возможности реализации методами доменной инженерии в пластинах Z-среза, вырезанных из синтезированных монокристаллических буль, периодически поляризованных структур для квазисинхронных процессов генерации второй оптической гармоники и параметрической генерации фотонов в перепутанных состояниях.

Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на 2023–2025 годы (задание FEWM-2023-0012).

Список источников

[1] *Bierlen J.D., Vanherzeele H.* Potassium titanyl phosphate: properties and new applications // Journal of the Optical Society of America B. 1989. Vol. 6. № 4. P. 622–633.

[2] *Ebbers C.A., Velsko S.P.* High average power $KTiOPO_4$ electro-optic Q-switch // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. № 5. P. 593–595.

[3] *Roth M., Tseitlin M., Angert N.* Oxide crystals for electro-optic Q-switching of lasers // Glass physics and chemistry. 2005. Vol. 31. № 1. P. 86–95.

[4] *Краковский В.А., Серебренников Л.Я., Паргачев И.А. и др.* Рост и физические свойства высокоомных кристаллов KTP // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 8–3. С. 52–53.

[5] *Русов В.А., Серебряков В.А., Каплун А.Б.* Электрооптические модуляторы на кристаллах KTP для мощных лазеров среднего ИК диапазона спектра // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 12. С. 10–16.

[6] *Boutou V., Vernay A., Félix C. et al.* Phase-matched second-harmonic generation in a flux grown KTP crystal ridge optical waveguide // Optics Letters. 2018. Vol. 43. № 15. P. 3770–3773.

[7] *Shur V.Ya., Pelegova E.V., Akhmatkhanov A.R. et al.* Periodically poled crystals of KTP family: a review // Ferroelectrics. 2016. Vol. 496. № 1. P. 49–69.

Nonlinear ferroelectrics crystals potassium titanyl phosphate

S.M. Shandarov[1], K.P. Melnik[2], A.A. Tik[1], Yu.V. Kuleshov[1], V.G. Dyu[1], E.N. Savchenkov[1], N.I. Burimov[1], A.R. Akhmatkhanov[2], M.A. Chuvakova[2], V.Ya. Shur[2]

[1] *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia*
[2] *Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

The results of a synthesis for high-conductivity potassium titanyl phosphate (KTP) crystals by solution-melt growth are presented. A possibility for creation on theirs base of the periodically poled domain structures intendent to the quasi-phase-matched nonlinear transformations of laser radiation is confirmed.

Keywords: *KTP crystals, optical quality, periodically poled domain structures, second harmonic generations, parametric light generation*

Квантовое моделирование химической связи с помощью атомов-бозонов в оптических решетках

Н.А. Мороз[1,4], К.С. Тихонов[2,3], Л.В. Герасимов[1,4], А.Д. Манухова[2,5], И.Б. Бобров[1,3], С.С. Страупе[1,3], Д.В. Куприянов[1,4]

[1] *Центр квантовых технологий, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Российский квантовый центр, Москва, Россия*
[4] *Центр междисциплинарных фундаментальных исследований ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия*
[5] *Department of Optics, Palacky' University, Olomouc, Czech Republic*

Квантовая химия предоставляет наиболее строгий теоретический инструмент для исследования молекулярных систем, однако расчет органических макромолекул представляет собой весьма сложную вычислительно задачу. В докладе представлен новый подход к моделированию химических процессов с помощью атомов-бозонов, помещенных в оптическую решетку. Нами показывается, что в случае трех или четырех неразличимых частиц, для квантовых состояний с минимальным полным спиновым моментом, специфическое сопряжение их спиновых и пространственных подсистем позволяет моделировать атомами-бозонами химическую связь, сформированную электронами.

Ключевые слова: *квантовое моделирование, оптические решетки, квантовая химия*

Перестановочная симметрия является фундаментальным свойством коллективной волновой функции неразличимых частиц. Она влияет на поведение коллективных систем с различными квантовыми статистиками, находящихся в одинаковых внешних условиях. Тем не менее, для определенных случаев знание волновой функции системы с одной статистикой позволяет однозначно восстановить волновую функцию системы с другой статистикой. Например, в случае щелочных атомов, являющихся бозонами, такое соответствие возможно, поскольку элементарное состояние спина ½ выполняет энергетический псевдо-спин сформированный состояниями его «часового перехода». Так происходит благодаря уникальному свойству диаграмм Юнга, описывающих коллективные состояния с минимальным полным спиновым моментом: в случае трех и четырех неразличимых частиц симметричные и антисимметричные квантовые состояния, построенные с помощью этих диаграммам, имеют эквивалентные регулярные и транспонированные представления для обеих квантовых статистик. В традиционной химии, поддерживающей концепцию ковалентной связи, именно такие спиновые состояния, играют доминирующую роль в формировании устойчивого соединения, построенного из положительных и отрицательных зарядов.

Существующая экспериментальная техника пространственного управления ультрахолодными атомами с помощью оптических микроловушек, может, таким образом, использоваться для аналогового квантового моделирования ковалентной связи в химии. А именно, атомы, каждый из которых помещен в индивидуальную ловушку, имитируют электроны, а потенциалы оптических ловушек имитируют взаимодействие электронов с ядрами. Строго говоря, предлагается не идеальное квантовое моделирование, а определенный протокол действий с возможностью качественного воспроизведения важных физических деталей, обусловленных внутренним и внешним взаимодействиями. Основная концепция протокола заключается в подготовке начального запутанного состояния разделенных атомных псевдо-спинов, а затем отслеживании эволюции состояния путем пространственного перемещения микроловушек, транспортирующих атомы. После реализации внутренних взаимодействий ловушки могут быть разделены для удаленных и независимых измерений. Измеренное конечное состояние предоставит информацию о процессах, произошедших во время взаимодействия.

В качестве примера, на рис. 1 показано положение ядер, моделируемое треугольной и прямоугольной конфигурациями ловушек соответственно для трех и четырех атомов.

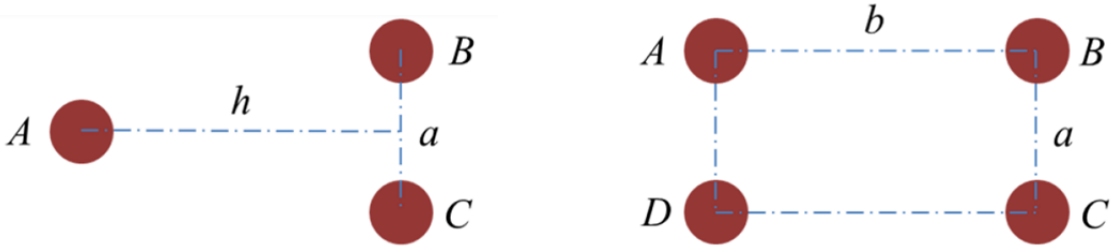


Рис. 1. Рассматриваемые конфигурации для систем из трех и четырех частиц

Нами показано, что для основного энергетического состояния совместное распределение двухчастичных вероятностей оказывается независящим от типа статистики и электронная подсистема достоверно моделируется атомами-бозонами, см. [1]. При этом для условных вероятностей в парных распределениях частиц наблюдается четкий признак антигруппировки. Этот результат показывает несостоятельность наивной интерпретации положения частиц как независимых случайных величин. Подавление вероятности совместного расположения атомов в одной ловушке уменьшает перекрестное взаимодействие для любой пары частиц и физически обеспечивается квантовой запутанностью их пространственных переменных. В случае электронов, участвующих в ковалентной связи, антигруппировка их отрицательных зарядов уменьшает энергию отталкивания и делает молекулярную систему более стабильной.

Данный результат проиллюстрирован на рис. 2, где представлены одночастичная и условная плотности вероятности, рассчитанные для атомов в микроловушках. Атомы расположены в поперечной плоскости (x, y) с осью z, направленной вдоль удерживающих лучей. Плоская сетка масштабируется квантовой неопределенностью положения атома в потенциале ловушки $\delta x = \delta y = \sqrt{\hbar/m_a\omega_\perp}$, где m_a и $\omega_\perp$ соответственно масса атома, и частота его поперечных колебаний.

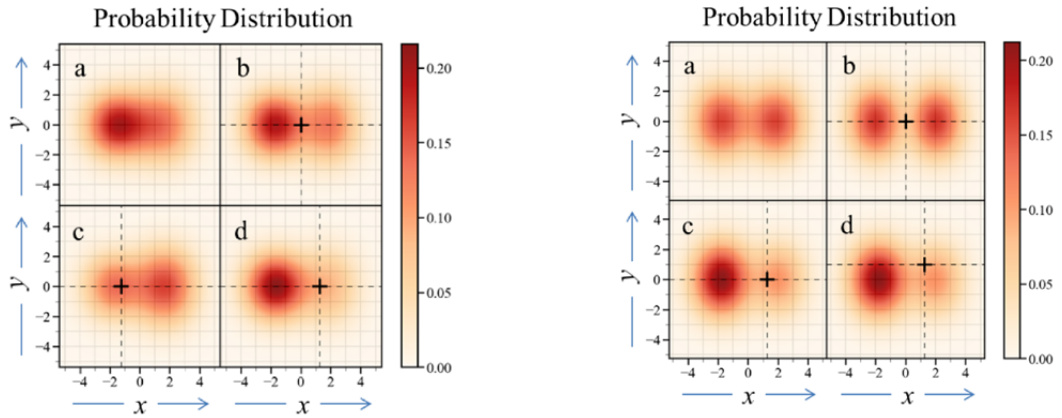


Рис. 2. Плотности одночастичной вероятности $\rho(\boldsymbol{r}) \equiv \rho(x, y)$ (a) и условной вероятности $\rho(\boldsymbol{r}|\boldsymbol{r}_0) = \rho(x, y|x_0, y_0)$ (b–d), рассчитанные для треугольной (левый график) и прямоугольной (правый график) конфигураций атомов. Условные положения одного из атомов (x_0, y_0) отмечены маркером

В докладе также обсуждаются другие родственные эффекты, проявляющиеся в статическом и динамическом поведении рассматриваемых систем.

Благодарность

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 23-72-10012).

[1] *Moroz N.A., Tikhonov K.S., Gerasimov L.V. et al.* Spin versus position conjugation in quantum simulations with atoms: Application to quantum chemistry // Phys. Rev. A. 2025. Vol. 111. Art. no. 062823.

Quantum simulation of chemical bonds with bosonic atoms in optical lattices

N.A. Moroz[1, 4], K.S. Tikhonov[2, 3], L.V. Gerasimov[1, 4], A.D. Manikhova[2, 5], I.B. Bobrov[1, 3], S.S. Straupe[1, 3], D.V. Kupriyanov[1, 4]

[1] *Quantum Technology Centre and Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[2] *St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*
[3] *Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow, Russia*
[4] *Centre for Interdisciplinary Basic Research, HSE University, Saint-Petersburg, Russia*
[5] *Department of Optics, Palacky' University, Olomouc, Czech Republic*

Quantum chemistry provides a powerful tool for understanding molecular systems and their behavior, but simulating organic macromolecules remains a challenging task due to the complexity of the calculations involved. We propose a novel approach for an analogue quantum simulation using bosonic atoms trapped in an optical lattice. We show that for the quantum states with minimal total spin the internal conjugation between the spin variables and spatial degrees of freedom allow bosonic atoms to mimic a chemical bonding provided by the fermionic electrons.

Keywords: *quantum chemistry, quantum simulations, cold atoms, optical lattices*

Оптимизация импульсов управляющего излучения для выполнения перепутывающих квантовых логических операций в системах нейтральных атомов

А.С. Усольцев[1, 2], Л.В. Герасимов[1, 2], Д.В. Куприянов[1, 2], К.С. Тихонов[1, 2, 3, 4], С.С. Страупе[1, 4]

[1] *Центр Квантовых технологий, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *Центр междисциплинарных фундаментальных исследований ВШЭ, Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[4] *Российский квантовый центр, Москва, Россия*

Проведенные исследования были направлены на оптимизацию управляющего излучения в перепутывающих логических вентилях на основе систем нейтральных атомов, удерживаемых оптическими дипольными ловушками. Ключевой интерес для нас представляла разработка подходов оптимизации временного профиля управляющего излучения, основанных на теории оптимального управления, и, в частности, различных модификаций метода последовательных улучающих итераций В.Ф. Кротова. Нами получен ряд интересных результатов, демонстрирующих, что существенное улучшение эффективности перепутывания можно достичь путем сочетания различных оптимизационных стратегий.

Ключевые слова: *оптимальное управление, управляющее излучение, квантовый вычислитель, нейтральные атомы*

Общая идея используемых нами подходов для оптимизации параметров квантовых логических вентилей состоит в нахождении управляющих электромагнитных полей или импульсов, под действием которых квантовая система переходит из одного состояния в другое с максимальной эффективностью, с учетом имеющихся ограничений, таких как шумы, потери и т. д. Подобные задачи, в целом, могут быть интересны для исследования динамики квантовых систем и, в частности, возникают в сфере квантовых вычислений, квантовых коммуникаций и квантовой метрологии [1].

Коротко опишем принцип действия рассматриваемого нами перепутывающего протокола на основе эффекта ридберговской блокады. Кубиты приготовляются в двух магнитно-нейтральных состояниях $|a\rangle = |F = I - 1/2, M = 0\rangle$ и $|b\rangle = |F = I + 1/2, M = 0\rangle$ сверхтонких подуровней щелочных атомов A и B, обладающих спиновым моментом атомного ядра I. Управляющее излучение одновременно действует на оба атома и представляет собой пару электромагнитных лазерных мод, инициирующих двухфотонное возбуждение атомов, в результате которого спиновые состояния $|b\rangle$ переводятся в высоковозбужденные ридберговские состояния $|r\rangle$. Этот процесс может быть сведен к двухуровневому переходу и описан с помощью эффективной частоты Раби $\Omega = \Omega(t) = |\Omega|e^{i\phi(t)}$. В результате действия управляющего излучения в двухатомной системе развивается суперпозиционное состояние $[|br\rangle + |rb\rangle]/2$, являющееся перепутанным (см. рис. 1). При этом процесс заселения состояния $|rr\rangle$ является нерезонансным, и в условиях идеальной ридберговской блокады им можно пренебречь, поскольку за счет взаимодействия ридберговских атомов энергия состояния $|rr\rangle$ смещается на величину $\delta_R \gg \Omega$.

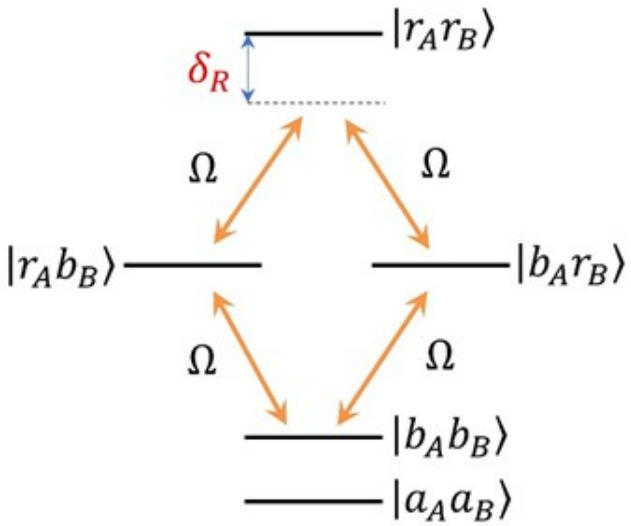


Рис. 1. Схема энергетических подуровней, задействованных в ходе работы квантового перепутывающего логического вентиля на основе эффекта Ридберговской блокады

Подбор надлежащей длительности воздействия T управляющего излучения, а также временного профиля фазы $\phi(t)$, в идеальных условиях позволяет добиться того, чтобы в конечный момент времени вектор состояния двухкубитной системы принял вид:

$$\left|\Psi_{CZ}^{(\varphi)}\right\rangle = \frac{1}{2}\left[|a_A a_B\rangle + e^{i\varphi+i\pi}|a_A b_B\rangle + e^{i\varphi+i\pi}|b_A a_B\rangle + e^{i2\varphi+i\pi}|b_A b_B\rangle\right].$$

Тогда глобальный поворот фазы кубитов на величину φ приводит вектор состояния к желаемому виду:

$$\left|\Psi_f\right\rangle = |\Psi_{\mathrm{CZ}}\rangle = \frac{1}{2}[|a_A a_B\rangle - |a_A b_B\rangle - |b_A a_B\rangle - |b_A b_B\rangle].$$

Нашим ключевым интересом при оптимизации работы описанного вентиля является учет неидеальности, связанной с эффектом утечки ридберговской блокады, обусловленной конечностью величины δ_R. Для моделирования описанной неидеальности в системе нами используется следующий двухкубитный гамильтониан:

$$\widehat{\mathcal{H}} = \widehat{\mathcal{H}}^{(A)} \otimes I^{(B)} + I^{(A)} \otimes \widehat{\mathcal{H}}^{(B)} + \hbar\delta_R |rr\rangle\langle rr|_{AB},$$

где последнее слагаемое выражает сдвиг энергии состояния $|rr\rangle$ в результате взаимодействия Ван-дер-Ваальса между ридберговскими атомами, $I^{(N)}$ — единичный оператор в подпространстве одного из атомов $N=A, B$ и однокубитные гамильтонианы

$$\widehat{\mathcal{H}}^{(N)} = -\frac{\hbar}{2}\Omega^*(t)|b\rangle\langle r|_N - \frac{\hbar}{2}\Omega(t)|r\rangle\langle b|_N.$$

Задавая параметр δ_R мы можем моделировать систему с более или менее близкими к идеальным условиями блокады.

В предлагаемом нами методе задача оптимизации решается в два этапа. Сначала нами используется метод Кротова [2], реализующий итерационную процедуру, обеспечивающую минимизацию функционала достоверности логической операции:

$$J^{(0)} = 1 - \left|\langle\Psi_f|\Psi(T)\rangle\right|^2. \quad (1)$$

При этом итерационное обновление поля вычисляется на основе перекрытия между вектором состояния системы $|\Psi(t)\rangle$, а также вспомогательным состоянием, полученным из уравнения сопряженной эволюции $|\mathrm{X}(t)\rangle$, которое фактически совпадает с уравнением Эйлера-Лагранжа в классическом вариационном исчислении. Такой подход гарантирует монотонное уменьшение минимизируемого функционала при корректной формулировке задачи. Характерной для метода Кротова является его быстрая сходимость на первых итерациях, сильно замедляющаяся в высоких порядках. Другой его особенностью является устойчивость результата к выбору начальной догадки для функции $\phi(t)$ в качестве которой нами берется константа.

Ко второму этапу мы переходим, когда повышение числа итераций метода Кротова не приводит к заметному уменьшению функционала (1). Полученные результаты используются в качестве начальной догадки для метода, и сочетающего известный из теории управления Принцип максимума Понтрягина [3] с градиентным алгоритмом Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS). Суть этого метода состоит в том, чтобы обойти необходимость решать краевую задачу с двумя условиями при $|\Psi_i\rangle = |\Psi(t=0)\rangle$ и $|\mathrm{X}_f\rangle = |\mathrm{X}(t=T)\rangle$, возникающую в теории оптимального управления и являющуюся весьма неудобной для численного решения [4]. При этом условия, поставленные в момент $t = T$, подменяются условиями при $t = 0$. Тем самым задача формально сводится к задаче Коши, тогда как величины $|\mathrm{X}(t=0)\rangle$ рассматриваются в качестве параметров оптимизации для алгоритма BFGS [5]. Таковыми же являются длительность вентиля T, а также фаза φ глобального поворота кубитов. Чтобы обеспечить выполнение необходимого признака оптимальности, мы дополняем функционал (1) слагаемым: $\sim\left\| |\mathrm{X}_f\rangle - |\mathrm{X}(t=T)\rangle \right\|$.

Результаты проведенной оптимизации представлены на рис. 2. Показана зависимость профиля фазы $\phi(t)$ эффективной частоты Раби от времени для различных значений величины блокадного сдвига $\delta_R = 5|\Omega|, 10|\Omega|, 20|\Omega|, 30|\Omega|, 40|\Omega|$ при $|\Omega|/2\pi = 1$ МГц. Во всех случаях оптимальные импульсы обеспечивают выполнение логического вентиля с ошибкой на уровне $1 - F \approx 10^{-5}$. Фаза $\phi(t)$ демонстрирует высокую стабильность по отношению к вариациям параметра δ_R в широком диапазоне, что свидетельствует об устойчивости вентиля к флуктуациям пространственных координат атомов в той мере, в какой величина δ_R чувствительна к межатомному расстоянию ($\sim R^{-6}$).

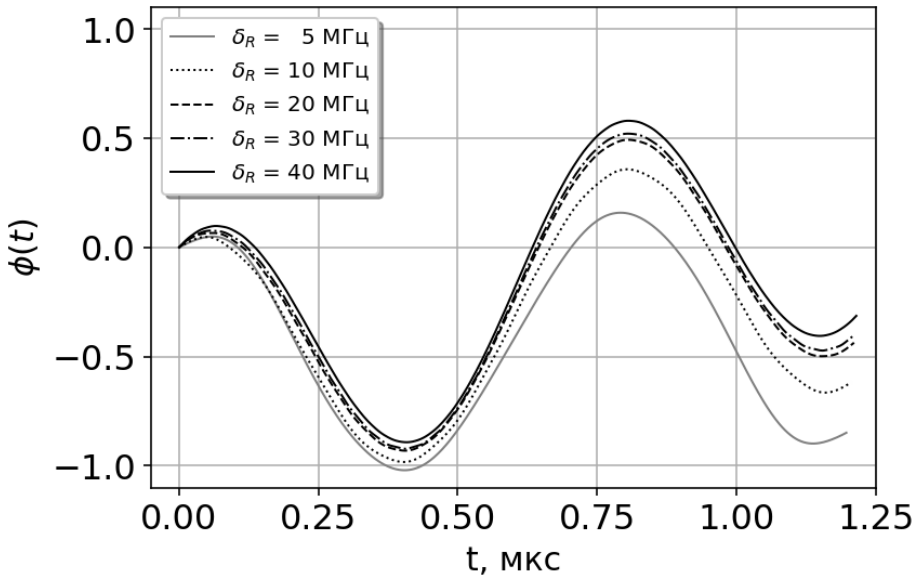


Рис. 2. Профили оптимизированной фазы управляющих импульсов двухкубитного перепутывающего вентиля CZ

Проведенное нами исследование направлено на разработку методов оптимального квантового управления процессами перепутывания нейтральных атомов с использованием глобальных методов, опирающихся на вариационный принцип Лагранжа, в сочетании с методом, основанном на BFGS-алгоритме. Такой смешанный метод показал высокую эффективность при оптимизации формы управляющих импульсов и параметров протокола CZ.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-72-10012.

Список источников

[1] *Koch C.P., Boscain U., Calarco T.* et al. Quantum optimal control in quantum technologies. Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe // EPJ Quantum Technology. 2022. Vol. 9. № 19. https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-022-00138-x

[2] *Krotov V.F.* Global Methods in Optimal Control Theory. Marcel Dekker Inc., 1995.

[3] *Понтрягин Л.С.* Математическая теория оптимальных процессов и дифференциальные игры // Труды МИАН СССР. 1985. Т. 169. С. 119–158.

[4] *Моисеев Н.Н.* Численные методы в теории оптимальных систем. М.: Наука, 1971. 424 с.

[5] *Jandura S., Pupillo G.* Time-optimal two- and three-qubit gates for rydberg atoms // Quantum. 2022. Vol. 6. Art. no. 712. https://doi.org/10.22331/q-2022-05-13-712

Optimization of control pulses for implementing entangling quantum logic operations in neutral atom systems

A.S. Usoltsev[1, 2], L.V. Gerasimov[1, 2], D.V. Kupriyanov[1, 2], K.S. Tikhonov[1, 2, 3, 4], S.S. Straupe[1, 4]

[1] *Quantum Technology Centre of Moscow State University, Moscow, Russia*
[2] *Centre for Interdisciplinary Basic Research, HSE University, Saint-Petersburg, Russia*
[3] *St.-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*
[4] *Russian Quantum Center, Moscow, Russia*

The research conducted was aimed at improving the efficiency of entangling logic gates in systems of neutral atoms trapped in optical dipole traps. Our primary focus was on developing approaches for optimizing the temporal profile of the control radiation, based on optimal control theory, and in particular, on various modifications of V.F. Krotov's method of monotonic (successive) improvements. We obtained a number of interesting results demonstrating that a significant enhancement in entangling efficiency can be achieved by combining different optimization strategies.

Keywords: *optimal control, control pulses, quantum computing, neutral atoms*

Исследование свойств мультимодовых интерферометров из нитрида кремния при криогенных температурах

Е.С. Лебедева[1,2*], И.О. Венедиктов[1,2], В.А. Коровин[1,2], Д.М. Кобцев[1,2], А.Д. Голиков[2,3], П.П. Ан[2,3], В.В. Ковалюк[1,2], Г.Н. Гольцман[1,4]

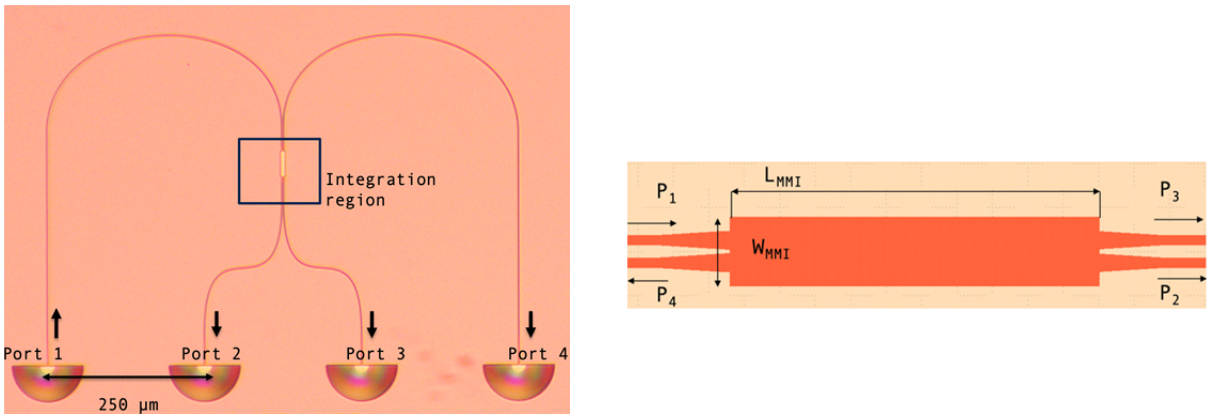
[1] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*
[2] *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*
[3] *Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*
[4] *Российский квантовый центр, Москва, Россия*
[*] *narniyall02@gmail.com*

Наряду с фазовращателями интегрально-оптические делители излучения являются одними из основных пассивных элементов для построения квантово-оптических интегральных схем (QPICs), работающих при гелиевых температурах. Однако, из-за термооптического эффекта, параметры делителей, рассчитанные при комнатной температуре, должны быть модифицированы. В данной работе исследуются зависимость коэффициент деления оптической мощности мультимодовых интерферометров из нитрида кремния с различными геометрическими параметрами при охлаждении до криогенных температур для повышения точности одно- и двухкубитных операций на чипе.

Ключевые слова: *оптика, интегрально-оптические делители, мультимодовые интерферометры, коэффициент деления*

Введение

Квантовые вычисления [1] — это технология, которая помогает преодолевать ограничения, накладываемые на классические компьютеры при решении задач определенного класса. В современной физике существует много способов реализации квантовых кубитов, и фотонная реализация наиболее перспективный способ из них за счет большого количества способов кодирования. Для управления кубитами в этом случае применяются устройства на чипе, в частности, светоделители в виде мультимодовых интерферометров [2]. В этой работе было экспериментально изучены такие структуры при комнатных и криогенных температурах для дальнейшего применения в квантовых вычислениях.



а) б)

Рис. 1. Мультимодовый интерферометр:
а) мультимодовый интерферометр; б) увеличенный снимокзоны взаимодействия

Мультимодовый интерферометр

Многомодовый интерферометр (MMI) — структура, которая служит для разделения или объединения световых волн и представляет собой широкий оптический волновод, внутри которого происходит многократное отражение от стенок. Излучение поступает в него через порт 1, проходя сквозь зону взаимодействия, разделяется и выходит через порты 2 и 3. MMI характеризуются коэффициентом деления, который рассчитывается по формуле:

$$k_{MMI} = P_2 / (P_2 + P_3),$$

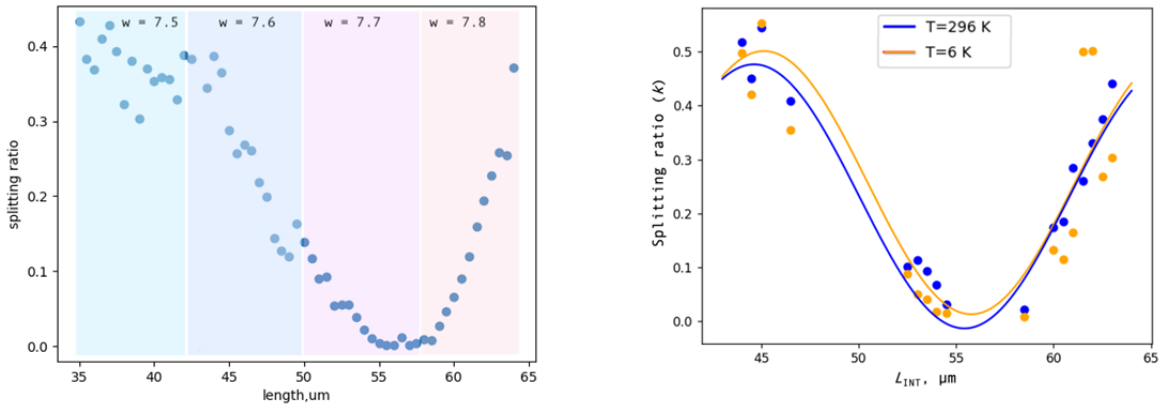
где P_2 *и* P_3 — мощности на портах 2 и 3 на длине волны 1550 нм.

На коэффициент деления влияют параметры зоны взаимодействия, материала структуры, а также температура, и для дальнейшего применения в квантовых вычислениях важно изучить эту зависимость экспериментально.

Эксперимент

Для эксперимента была изготовлена вариационная матрица структур с меняющимися геометрическими параметрами на подложке из нитрида кремния. Экспериментальная установка включала в себя криостат на основе машины замкнутого цикла. Свет узкополосного перестраиваемого лазера (спектр 1460–1640 нм) через массив волокон поступал на вход исследуемых интегрально-оптических структур, которые располагались на трехкоординатном столике в криостате. Выходные сигналы с портов 2, 3 и 4 записывались с помощью быстрого фотодетектора. Измерения проводились как при комнатной, так и при температуре 5 K.

Из полученных значений мощности на длине волны 1550 нм были получена зависимости коэффициента деления от геометрических параметров при комнатной и криогенных температурах (представлены на рис. 2). Полученная зависимость имеет форму синусоиды, а Изменения при охлаждении составили в среднем 20 процентов.



а) б)

Рис. 2. Сравнение зависимостей коэффициента деления от геометрических параметров при комнатных и криогенных температурах:
а) зависимость при комнатной температуре; б) изменения при охлаждении

Заключение

В данной работе были исследованы MMI, для дальнейшего применения в квантовых вычислениях. Полученные зависимости могут быть использованы в дальнейшем для создания высокоэффективных элементов квантовых компьютеров, а также проектировании схем радио- и нанофотоники на чипе, работающих в широком диапазоне температур.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования (FSME-2025-0004).

Список источников

[1] Ladd T.D., Jelezko F., Laflamme R., Nakamura Y., Monroe C., O'Brien J.L. Quantum computers // Nature. 2010. Vol. 464. P. 45–53.

[2] Cooney K., Peters F.H. Analysis of multimode interferometers // Opt Express. 2016. Vol. 20. № 24. P. 22481–22515.

Investigation of the properties of multimode silicon nitride interferometers at cryogenic temperatures

E.S. Lebedeva[1, 2*], I.O. Venediktov[1, 2], V.A. Korovin[1], D.M. Kobtsev[1, 2], Y.V. Konyshev[1], A.D. Golikov[2, 3], P.P. An[2, 3], V.V. Kovalyuk[1, 2], G.N. Goltsman[1, 4]

1 National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia
2 Universitet of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia
3 Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia
4 Russian Quantum Center, Moscow, Russia
**narniyall02@gmail.com*

Along with phase shifters, integrated optical radiation dividers are one of the main passive elements for the construction of quantum optical integrated circuits (QPICs) operating at helium temperatures. However, due to the thermo-optical effect, the parameters of the dividers calculated at room temperature must be modified. In this work, the optical power division coefficient of multimode silicon nitride interferometers with different geometric parameters when cooled to cryogenic temperatures is investigated to improve the accuracy of one- and two-qubit operations on the chip.

Keywords: *optics, integrated optical splitters, multimode interferometers, division ratio*

Характеристики сверхпроводникового однофотонного детектора под воздействием радиочастотного поля поверхностной ионной ловушки

К.О. Седых[1, 2*], Е. Сулеймен[3, 4], С.С. Святодух[1, 3], П.П. Ан[2, 3], А.Д. Голиков[2, 3], В.В. Ковалюк[1, 2], Г.Н. Гольцман[1, 4]

[1] *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия*
[2] *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*
[3] *Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*
[4] *Российский квантовый центр, Москва, Россия*
[*] *ksedykh@hse.ru*

В работе исследовано изменение характеристик сверхпроводникового однофотонного детектора (SSPD) из нитрида ниобия под воздействием радиочастотного поля захвата иона в макете поверхностной ионной ловушки при температуре 2 К. Представлены результаты зависимости темновых и световых отсчетов, эффективности детектирования от тока смещения, а также изменение критического тока в диапазоне полей 5–40 МГц и амплитуд (0,1–4) В. Результаты показывают, что благодаря высокой эффективности (> 90%), низким темновым отсчетам (< 10 $с^{-1}$) и малому мертвому времени (< 10 нс) SSPD в поверхностной ионной ловушке может позволить проводить измерение квантового состояния иона с высокой достоверностью и недоступным для других детекторов быстродействием, улучшая тем самым точность подготовки и измерения состояния (SPAM).

Ключевые слова: *поверхностная ионная ловушка, сверхпроводниковый однофотонный детектор, SNSPD, SMSPD, нитрид ниобия, масштабируемый квантовый компьютер на ионах*

На сегодняшний день, ионная платформа является одной из самых успешных технологий для реализации обработки квантовой информации и квантовых вычислений. Электронные состояния отдельных ионов, захваченных в специальные электромагнитные ловушки, являются носителями кодированной информации [1]. В настоящее время ведутся работы по развитию поверхностной архитектуры таких ловушек, которая способна обеспечить потенциал для масштабируемости подобных систем.

Одной из наиболее важных проблем реализации поверхностных ионных ловушек (ПЛ) является измерение квантового состояния отдельных ионов, точность считывания которого фактически определяется отношением зарегистрированных фотонов к ложным срабатываниям детектора. На данный момент используются несколько технологий для считывания, наиболее популярные из которых CCD камеры [2], фотоэлектронные умножители [3], лавинные фотодиоды [4]. Каждая из технологий обладает рядом преимуществ, но пока не продемонстрировала достаточно быстрое измерение квантового состояния на чипе.

В работе предлагается использовать сверхпроводниковый однофотонный детектор (SSPD, от англ. Superconducting Single-Photon Detector) [5], обладающий высокой эффективностью детектирования (> 90%), низким темновым отсчетам (< 10 $с^{-1}$) и малым мертвым временем (< 10 нс). Интегрированный в поверхностную ионную ловушку SSPD позволит проводить измерение квантового состояния иона с высокой достоверностью и недоступным для других детекторов быстродействием, улучшая тем самым точность подготовки и измерения состояния [6]. Однако, согласно литературным данным, радиочастотное поле ловушки, необходимое для захвата ионов в потенциальные ямы, влияет на характеристики SSPD [7]. Для корректной работы SSPD, и лучшего детектирования квантового состояния ионов необходимо уменьшить влияние RF-поля. Этого можно добиться несколькими способами: увеличением рабочего диапазона токов за счет изменения материала детектора [8, 9], увеличением ширины полоски детектора [10, 11], экранировкой детектора [12, 13].

В докладе представлены результаты исследования характеристик различных макетов поверхностной ионной ловушки со сверхпроводниковыми однофотонными детекторами, изготовленными из нитрида ниобия: с разной шириной полоски SSPD, а также с/без напыления защитного покрытия из ITO под воздействием радиочастотного поля ПЛ. Скорости световых и темновых отсчетов от тока смещения, частоты и амплитуды RF-поля измерялись на длине волны 397 и 729 нм и температуре 2,2 K. Из полученных данных была извлечена внутренняя эффективность детектирования и рабочий диапазон RF-полей, при которых SSPD все еще находится в сверхпроводящем состоянии.

Результаты работы показывают путь для дальнейшего уменьшения влияния RF-поля ловушки на характеристики SSPD и их последующего масштабирования.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования FSME-2025-0004 (исследование детекторов) и федеральной программы академического лидерства «Приоритет 2030» СТП «Квантовый интернет» НИТУ МИСИС (изготовление детекторов).

Список источников

[1] *Bruzewicz C.D., Chiaverini J., McConnell R., Sage J.M.* Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges //Applied Physics Reviews. 2019. Vol. 6. № 2. Art. no. 021314. https://doi.org/10.1063/1.5088164.

[2] *Hendricks R.J., Sørensen J.L., Champenois C., Knoop M., Drewsen M.* Doppler cooling of calcium ions using a dipole-forbidden transition // Physical Review A. 2008. Vol. 77. № 2. Art. no. 02140. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.021401

[3] *Myerson A.H., Szwer D.J., Webster S.C. et al.* High-fidelity readout of trapped-ion qubits // Physical Review Letters. 2008. Vol. 100. Art. no. 200502. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.200502

[4] *Setzer W.J., Ivory M., Slobodyan O. et al.* Fluorescence detection of a trapped ion with a monolithically integrated single-photon-counting avalanche diode // Applied Physics Letters. 2021. Vol. 119. Art. no. 154002. https://doi.org/10.1063/5.0055999

[5] *Gol'tsman G.N., Okunev O., Chulkova G. et al.* Picosecond superconducting single-photon optical detector // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79. № 6. P. 705–707. https://doi.org/10.1063/1.1388868

[6] *Todaro S.L., Verma V. B., McCormick K.C. et al.* State readout of a trapped ion qubit using a trap-integrated superconducting photon detector // Physical Review Letters. 2021. Vol. 126. № 1. Art. no. 010501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.010501.

[7] *Sedykh K.O., Suleimen Y., Svyatodukh M.I. et al.* Effect of an External Alternating Electric Field on the Efficiency of a Superconducting Single-Photon Detector // Technical Physics. 2023. Vol. 93. № 1. Art. no. 974. https://doi.org/10.61011/TP.2023.07.56637.88-23

[8] *Korneeva Yu., Florya I., Vdovichev S. et al.* Comparison of hot spot formation in NbN and MoN thin superconducting films after photon absorption // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2017. Vol. 27. № 4. Art. no. 2201504. https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2659661

[9] *Florya I.N., Korneeva Y.P., Sidorova M.V. et al.* Energy relaxtation and hot spot formation in superconducting single photon detectors SSPDs // EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 103. Art. no. 10004. https://doi.org/10.1051/epjconf/201510310004

[10] *Zolotov P., Svyatodukh S., Divochiy A., Seleznev V., Goltsman G.* High-resistivity niobium nitride films for saturated-efficiency SMSPDs at telecom wavelengths and beyond // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 122. № 15. Art. no. 152602. https://doi.org/10.1063/5.0144998

[11] *Korneev Yu.P., Vodolazov D.Yu., Semenov A.V. et al.* Optical Single-Photon Detection in Micrometer-Scale NbN Bridges // Physical Review Applied. 2018. Vol. 9. № 6. Art. no. 064037. https://doi.org/10.1103/physrevapplied.9.064037

[12] *Hampel B., Slichter D.H., Leibfried D., Mirin R.P., Nam Sae Woo, Verma V.B.* Trap-integrated superconducting nanowire single-photon detectors with improved rf tolerance for trapped-ion qubit state readout // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 122. № 17. Art. no. 174001. https://doi.org/10.1063/5.0145077.

[13] *Седых К.О., Сулеймен Е., Святодух С.С., Голиков А.Д., Флоря И.Н., Ковалюк В.В., Лахманский К.Е., Гольцман Г.Н.* Изменение характеристик SSPD с защитным покрытием из ITO под влиянием радиочастотного поля // ХОЛОЭКСПО 2024. XXI Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2024. С. 201–203.

Superconducting single-photon detector performance under the influence of RF-field of surface ion trap

K.O. Sedykh[1, 2*], Y. Suleimen[3, 4], S.S. Svyatodukh[1, 3], P.P. An[2, 3], A.D. Golikov[2, 3], V.V. Kovalyuk[1, 2], G.N. Goltsman[1, 4]

[1] *National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia*
[2] *University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*
[3] *Moscow Pedagogical State University, Moscow, Russia*
[4] *Russian Quantum Center, Moscow, Russia*
** ksedykh@hse.ru*

Article demonstrates the behavior of a niobium nitride superconducting single-photon detector (SSPD) exposed to a radio-frequency ion trapping field in a surface ion trap model at 2K. The results of the dependence of dark and bright counts, detection efficiency on the bias current, as well as the critical current changes are presented in the field of 5–40 MHz and amplitudes of (0.1–4) V ranges. Due to high efficiency (>90 %), low dark counts (<10 s^{-1}) and small dead time (<10 ns), SSPD in a surface ion trap can enable the measurement of the ion quantum state with high fidelity and quick-response unattainable by other detectors, thereby improving the accuracy of state preparation and measurement (SPAM).

Keywords: *surface ion trap, superconducting single-photon detector, snspd, smspd, niobium nitride, scalable ion quantum computer*

Создание оптических котов Шредингера с управляемым сжатием с помощью светоделителя и негауссовых ресурсных состояний: состояния кубической фазы и состояния Фока

А.В. Баева[1], А.С. Лосев[1, 2], И.В. Соколов[1]

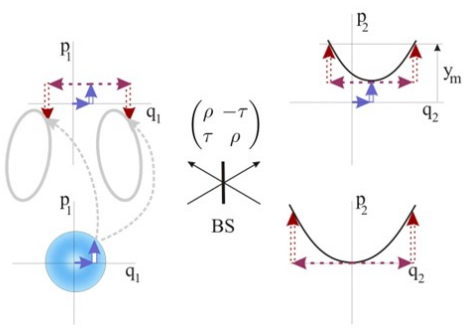
[1] *Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия*
[2] *Санкт Петербургский государственный морской технический университет, Санкт Петербург, Россия*

Мы исследуем затвор, способный генерировать сжатые состояния кота Шредингера с высокой верностью в оптическом диапазоне. Затвор основан на перепутывании на несимметричном светоделителе произвольного сигнального и негауссова ресурсного световых полей и последующем гомодинном измерении. Управление параметрами светоделителя позволяет наиболее простым образом получать состояния кота Шредингера с необходимой степенью сжатия. Наряду с точным описанием затвора применяется полуклассический анализ, наглядно демонстрирующий принцип работы затвора и позволяющий выявить существенные статистические свойства выходного состояния, такие как степень сжатия и характерные деформации компонент в состоянии кота Шредингера. Мы представляем сравнительный анализ эффективности затворов, использующих несимметричный светоделитель и различные ресурсные состояния: состояние кубичной фазы и состояние Фока.

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

Оптические состояния кота Шредингера, представляющие собой суперпозицию макроскопически различимых состояний электромагнитного поля [1], находят широкое применение как в фундаментальных, так и прикладных задачах квантовой метрологии и квантовых вычислений [2, 3]. На сегодняшний день разработан ряд методов генерации подобных состояний, причем большинство из них основаны на квантовом перепутывании входных полей с последующим измерением одной из выходных подсистем. В этом случае совместимые с полученным результатом измерения сведения о переменных целевой подсистемы могут содержать многозначную информацию о состоянии в сигнальном канале. Это может привести к появлению на фазовой плоскости выходного состояния двух (или более) «копий» целевого состояния. Многозначность может возникать из-за появления негауссовости в рассматриваемой системе как за счет физической природы измеряемой величины, так и при проведении негауссовых измерений.

В данной работе мы рассматриваем генерацию состояния кота Шредингера с помощью квантового затвора, основанного на смешении произвольного гауссова и ресурсного негауссова входных световых полей на несимметричном светоделителе с последующим гомодинным измерением. Известно [4], что в случае ресурсного состояния Фока на выходе схемы с делителем возникают сжатые состояния кота Шредингера. Мы показываем [5], что управляемые сжатые состояния такого типа возникают и при использовании ресурсного состояния кубической фазы. Проведенный нами полуклассический анализ работы затвора, как и в работах [6–9], позволяет наглядно (рисунок) продемонстрировать механизм генерации состояний кота Шредингера и количественно описать ключевые статистические характеристики выходного состояния, включая степень сжатия и характерные деформации компонент суперпозиции выходного состояния. Это подтверждает точный расчет функции Вигнера выходного состояния. Таким образом, используя результаты «полуклассического» анализа, можно заранее подбирать оптимальные параметры схемы для генерации сжатых состояний кота Шредингера с желаемыми свойствами с высокой верностью и вероятностью.



Полуклассическое отображение квадратурных амплитуд целевого и ресурсного осцилляторов в результате работы затвора в случае бесконечного начального сжатия ресурса

Смешение случайно выбранных начальных амплитуд входных полей происходит на светоделителе с произвольными коэффициентами отражения ρ и пропускания τ. После смешения следует измерение импульсной квадратуры поля во втором канале с результатом измерения y_m (горизонтальная линия во втором канале) в результате которого происходит редукция состояния в первом канале. Два пересечения между прямой измерения и кривой состояния показывают, что измеренному импульсу соответствуют два возможных совместных значения координаты, информация о которых передается состоянию в первом канале. Поскольку результат измерения импульса дает двузначную информацию о сопряженной квадратуре ресурсного осциллятора, целевое состояние редуцируется к состоянию, подобному состоянию кота Шредингера

Так как состояние кубической фазы не является единственным, допускающим успешную генерацию состояний кота Шредингера в нашей схеме, мы провели сравнительный анализ эффективности затвора с точки зрения верности в случае различных ресурсных состояний: состояния кубической фазы и состояния Фока. Исследования показали, что использование состояния кубической фазы в качестве ресурсного позволяет в ряде случаев получать целевые состояния с верностью выше, чем для аналогичного затвора, использующего состояние Фока. Однако генерация ресурсных состояний с высокой степенью нелинейности может быть сопряжена с определенными экспериментальными сложностями. Поэтому при выборе оптимального ресурсного состояния необходимо искать компромисс между теоретическими предсказаниями и экспериментальными возможностями.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 23-1-5-116-1).

Список источников

[1] *Yurke B., Stoler D.* Generating quantum mechanical superpositions of macroscopically distinguishable states via amplitude dispersion // Physical Review Letters. 1986. Vol. 57. № 1. Art. no. 13.

[2] *Gilchrist A., Nemoto K., Munro W.J. et al.* Schrödinger cats and their power for quantum information processing // Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics. 2004. Vol. 6. № 8. Art. no. S828.

[3] *Lund A.P., Ralph T.C., Haselgrove H.L.* Fault-tolerant linear optical quantum computing with small-amplitude coherent states // Physical Review Letters. 2008. Vol. 100. № 3. Art. no. 030503.

[4] *Ourjoumtsev A., Jeong H., Tualle-Brouri R., Grangier P.* Generation of optical 'Schrödinger cats' from photon number states // Nature. 2007. Vol. 448. № 7155. Art. no. 784–786.

[5] *Baeva A.V., Losev A.S., Sokolov I.V.* Optical Schrödinger cat states generation using cubic phase resource state and beamsplitter // arXiv preprint arXiv:2504.18372. 2025.

[6] *Sokolov I.V.* Schrödinger cat states in continuous variable non-Gaussian networks // Physics Letters A. 2020. Vol. 384. № 29. Art. no. 126762.

[7] *Masalaeva N.I., Sokolov I.V.* Quantum statistics of Schrödinger cat states prepared by logical gate with non-Gaussian resource state // Physics Letters A. 2022. Vol. 424. Art. no. 127846.

[8] *Baeva A.V., Losev A.S., Sokolov I.V.* Schrödinger cat states prepared by logical gate with non-Gaussian resource state: effect of finite squeezing and efficiency versus monotones // Physics Letters A. 2023. Vol. 466. Art. no. 128730.

[9] *Baeva A.V., Veselkova N.G., Masalaeva N.I., Sokolov I.V.* Measurement-assisted non-Gaussian gate for Schrödinger cat states preparation: Fock resource state versus cubic phase state // European Physical Journal D. 2024. Vol. 78. № 1. Art. no. 12.

Generation of optical Schrödinger cat with controlled squeezing using a beamsplitter and non-Gaussian resource states: cubic phase state and Fock state

A.V. Baeva[1], A.S. Losev[1,2], I.V. Sokolov[1, 2]

[1] *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia*

We investigate the quantum gate for generating high fidelity optical squeezed Schrödinger cat states. Our scheme relies on entangling an arbitrary signal field and a non-Gaussian resource light field at asymmetric beamsplitter, followed by homodyne measurement. The beamsplitter based scheme offers a straightforward possibility of obtaining squeezed Schrödinger cat states with the desired degree of squeezing. Along with the exact description, we perform the semiclassical analysis that allows one to demonstrate the principle of gate operation and to reveal the significant statistical properties of the output state, such as degree of squeezing and specific deformations of the cat state components. A comparative analysis of gate efficiency is presented for different resource states, namely, the cubic phase state and the Fock state.

Keywords: *non-gaussian states of light, Schrödinger cat state, cubic phase state, Fock state*

Метод временной синхронизации для сеансов спутниковой квантовой связи

А.Н. Чернов[1, 2, 3, 4], А.В. Хмелев[1, 2, 3, 4], В.Л. Курочкин[1, 2, 3, 4]

[1] *Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*
[2] *Российский квантовый центр, Москва, Россия*
[3] *КуСпэйс Технологии, Москва, Россия*
[4] *Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

Данная работа посвящена методу временной синхронизации в спутниковых квантовых коммуникациях. Разработанный подход в своей основе опирается на процедуры восстановления частоты следования и временной фильтрации квантовых сигналов. Временной сдвиг часов спутника и приемной станции определяется посредством корреляционного анализа отправленных и зарегистрированных сигналов. Такой метод упрощает бортовое оборудование спутника. Решение особенно перспективно для компактных квантовых спутников, где критически важны массогабаритные характеристики и энергоэффективность системы.

Ключевые слова: *синхронизация времени, квантовое распределение ключей, спутниковые квантовые коммуникации, корреляционный анализ*

Введение

Необходимость временной синхронизации в спутниковых системах квантового распределения ключей (КРК) возникает из-за комплекса факторов, включая доплеровский сдвиг, дрейф генераторов частоты, временной джиттер лазеров и детекторов, а также существенные потери сигнала в атмосфере [1–3]. Традиционные подходы к синхронизации, использующие только сигналы глобальных навигационных систем (GPS), выделенные радиоэлектронные каналы, обладают рядом ограничений. Мы предлагаем метод оптической синхронизации, основанный на корреляционный анализе отправленных и зарегистрированных сигналов. Преимущество данного метода в том, что он работает в рамках стандартной аппаратной конфигурации систем КРК.

Восстановление частоты следования

Доплеровский сдвиг и дрейф частоты искажают временные интервалы между импульсами, делая невозможным надежное отделение полезных сигналов от шумовых. Для устранения этих эффектов мы используем метод восстановления частоты [4]. На первом шаге мы компенсируем эффект Доплера, используя данные траектории спутника. Затем проводится сканирование частоты следования зарегистрированных сигналов для определения ее временной зависимости. На последнем этапе времена регистрации корректируются с учетом полученной зависимости, восстанавливая исходную периодичность.

Алгоритм временной синхронизации

Восстановление частоты следования позволяет произвести временную фильтрацию зарегистрированных сигналов. После чего выполняется грубая синхронизация времени по данным GPS с точностью около 1 мкс. Затем формируются битовые последовательности. Битовая маска на стороне Алисы генерируется на основе параметров лазерных источников, согласно протоколу обманных состояний [5–7]. Так в данном случае сигнальным состояниям ставится в соответствие бит 1, остальным 0. На стороне Боба каждому зарегистрированному сигналу ставится в соответствие бит 1, а временные интервалы, в которых детектирования сигнала не произошло, маркируются 0 битом.

Функция взаимной корреляции вычисляется для диапазона возможных временных сдвигов. При этом мы используем оптимизированный алгоритм, учитывающий разреженность единичных битов на стороне Боба. Искомый временной сдвиг дает статистически значимый максимум корреляционной функции.

Заключение

Экспериментальная проверка алгоритма продемонстрировала его эффективность. Важным преимуществом метода является его работоспособность в условиях существенных потерь сигнала, а также совместимость со стандартной аппаратной конфигурацией систем КРК. Полученные результаты говорят о практической ценности предложенного метода.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по гранту № 25-22-00342 «Эффективность и безопасность реалистичных систем спутникового квантового распределения ключей».

Список источников

[1] *Wang C.Z. et al.* Synchronization using quantum photons for satellite-to-ground quantum key distribution // Optics express. 2021. Vol. 29. № 19. P. 29595–29603.

[2] *Wang C. et al.* Robust aperiodic synchronous scheme for satellite-to-ground quantum key distribution // Applied Optics. 2021. Vol. 60. № 16. P. 4787–4792.

[3] *Miller A.V.* Time Synchronization in Satellite Quantum Key Distribution // Problems of Information Transmission. 2023. Vol. 59. № 4. P. 225–238.

[4] *Chernov A.N. et al.* Optimized Recovery of the Frequency of Repetition of a Satellite Quantum Signal // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Vol. 88.6. P. 955–959.

[5] *Khmelev A.V. et al.* Semi-empirical satellite-to-ground quantum key distribution model for realistic receivers // Entropy. 2023. Vol. 25. № 4. Art. no. 670.

[6] *Liao S.K. et al.* Satellite-to-ground quantum key distribution // Nature. 2017. Vol. 549. № 7670. P. 43–47.

[7] *Ma X. et al.* Practical decoy state for quantum key distribution // Physical Review A — Atomic, Molecular, and Optical Physics. 2005. Vol. 72. № 1. Art. no. 012326.

Time synchronization method for satellite quantum communications

A.N. Chernov [1, 2, 3, 4], A.V. Khmelev [1, 2, 3, 4], V.L. Kurochkin [1, 2, 3, 4]

1 Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia
2 Russian Quantum Center, Moscow, Russia
3 QSpace Technologies, Moscow, Russia
4 University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

This study focuses on a time synchronization method for satellite quantum communication systems. The developed approach fundamentally relies on procedures for reconstructing the pulse repetition rate and performing temporal filtering of quantum signals. The clock offset between the satellite and ground station is determined through correlation analysis of transmitted and received signals. This method simplifies the satellite's onboard equipment requirements. The solution is particularly promising for compact quantum satellites, where mass-dimensional characteristics and system energy efficiency are critically important.

Keywords: *time synchronization, quantum key distribution, satellite quantum communication, correlation analysis*

Использование машинного обучения для управления линейным оптическим интерферометром

С.С. Кузьмин[1, 2], И.В. Дьяконов[1, 2], С.С. Страупе[1, 2]

[1] *Центр Квантовых Технологий, Физический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий», Москва, Россия*

Разработан алгоритм, который создает модель реконфигурируемого оптического интерферометра, не зависящую от архитектурных ограничений. Программирование унитарных преобразований оптических мод основано либо на аналитическом методе получения унитарной матрицы через фазовые сдвиги, либо на оптимизации, если прямое разложение невозможно. Алгоритм применяет контролируемое обучение для согласования модели интерферометра с обучающими данными устройства. Оптимизация использует обученную модель для нахождения фазовых сдвигов в интерферометре, достигая необходимого унитарного преобразования. Этот подход позволяет настраивать интерферометры без точных аналитических решений, открывая возможности для изучения новых архитектур.

Ключевые слова: *линейная оптика, линейно-оптические квантовые вычисления, машинное обучение в линейной оптике*

Введение

Линейно-оптические интерферометры стремительно заняли ключевую позицию в области квантовой оптики [1] и оптической обработки информации [2]. Реконфигурируемые интерферометры стали основой современных экспериментов по линейным оптическим квантовым вычислениям [3] и рассматриваются как перспективные аппаратные ускорители для задач глубокого обучения нейронных сетей [4].

Настоящая работа посвящена разработке алгоритма обучения, позволяющего создавать архитектурно-независимую модель реконфигурируемого оптического интерферометра.

Мотивация

Актуальность работы связана с проблемой программирования интерферометров разных архитектур [5], которое требует ресурсоемкой процедуры оптимизации, включая томографию матрицы преобразования [6]. Такой подход может быть неприемлем из-за ограниченности ресурсов.

Наш подход

В данной работе разработан эффективный алгоритм программирования линейного оптического интерферометра на основе архитектуры [5] (рис. 1), которая охватывает любые интерферометры с независимыми фазовращателями и светоделителями. Алгоритм основан на обучении численной модели с учителем — методе машинного обучения, широко используемом для нейронных сетей [7]. Обучение модели проводится на наборе унитарных шаблонов, отражающих различные фазовые задержки в плечах интерферометра. Полученная модель позволяет быстро находить требуемые фазовые сдвиги для заданного унитарного преобразования, используя оптимизацию, применяемую к модели, а не к реальному устройству.

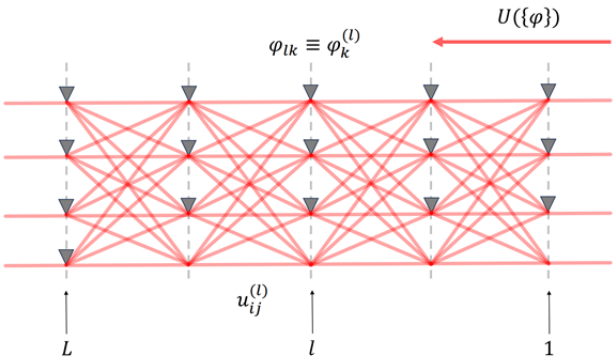


Рис. 1. Схема структуры многомодового интерферометра и его интегрированная фотонная схема реализации. Основные матрицы U_l описывают, как свет распределяется между каналами интерферометра. Соответствующие интегрированные элементы могут быть реализованы в виде решеток волноводов, где волноводы связаны друг с другом, что позволяет передавать энергию между различными волноводами

Наша модель основана на линеаризации зависимости преобразования U, которое совершает интерферометр от признаков, которые задают фазы, с помощью преобразования признаков фаз интерферометра. Затем линейная модель обучается на данных, полученных томографией преобразований интерферометра при различных фазах, с помощью псевдоинверсии Мура — Пенроуза.

Основные результаты

Результаты численного моделирования показали, что алгоритм успешно работает без априорных знаний даже при условии шума ε (рис. 2).

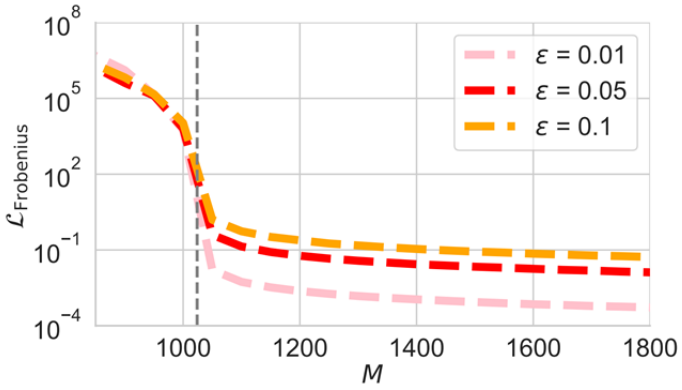


Рис. 2. Зависимость метрики Фробениуса от тестового набора данных в зависимости от размера обучающей выборки M. Усреднение выполнено по 1000 примерам линейно-оптических интерферометров с N = 4 модами и L = 5 слоями. Серая вертикальная пунктирная линия указывает минимальный размер обучающей выборки, необходимый для успешной проверки на тестовом наборе, $M_{min} = 1024$

Заключение

Предложенный подход к программированию интерферометров обладает рядом ключевых преимуществ. Во-первых, метод универсален и не зависит от архитектуры интерферометра, что делает его подходящим для любых схем при условии, что смесители мод и фазовращатели рассматриваются как связанные элементы. Во-вторых, алгоритм обучения формирует полную модель интерферометра с учетом особенностей изготовленных элементов. В-третьих, он позволяет реконструировать внутренние фиксированные оптические элементы сложных схем, что открывает возможности для анализа качества подсхем внутри более крупных оптических систем.

Основные ограничения связаны с экспериментальными трудностями. Метрика Фробениуса требует точного измерения модуля и фазы унитарных элементов, а также возникает проблема перекрестных помех между фазовращателями, что не полностью учитывается алгоритмом. Однако современные фотонные модуляторы обычно демонстрируют крайне низкий уровень таких помех.

Мы уверены, что предложенный подход расширит возможности использования новых архитектур программируемых интерферометров как в классических, так и в квантовых приложениях. Подробнее эти идеи изложены в работе [7].

Список источников

[1] *Carolan J., Harrold C., Sparrow C. et al.* Universal linear optics // Science. 2015. Vol. 349. № 6249. P. 711–716.

[2] *Harris N.C., Carolan J., Bunandar D. et al.* Linear programmable nanophotonic processors // Optica. 2018. Vol. 5. № 12. P. 1623–1631.

[3] *Wang J., Paesani S., Ding Y. et al.* Multidimensional quantum entanglement with large-scale integrated optics // Science. 2018. Vol. 360. № 6386. P. 285–291.

[4] *Hamerly R., Bernstein L., Sludds A. et al.* Large-scale optical neural networks based on photoelectric multiplication // Physical Review X. 2019. Vol 9. № 2. Art no. 021032.

[5] *Saygin M.Y., Kondratyev I.V., Dyakonov I.V. et al.* Robust architecture for programmable universal unitaries // Physical review letters. 2020. Vol. 124. № 1. Art no. 010501.

[6] *Tillman M., Schmidt C., Walther P.* On unitary reconstruction of linear optical networks // Journal of Optics. 2016. Vol. 18. № 11. Art no. 114002.

[7] *Kuzmin S., Dyakonov I., Straupe S.* Leveraging machine learning features for linear optical interferometer control // arXiv:2505.24032v1. 2025.

Using machine learning to control a linear optical interferometer

S.S. Kuzmin[1, 2], I.V. Dyakonov[1, 2], S.S. Straupe[1, 2]

[1] *Center for Quantum Technologies, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[2] *LLC International Center for Quantum Optics and Quantum Technologies, Moscow, Russia*

We developed an algorithm to create a model of a reconfigurable optical interferometer that is independent of architectural constraints. Programming unitary transformations of optical modes is based either on an analytical method to obtain a unitary matrix via phase shifts or on optimization when decomposition is unavailable. The algorithm uses supervised learning to align the interferometer model with the device's training data. Optimization employs the trained model to determine phase shifts in the interferometer, achieving the required unitary transformation. This approach allows tuning interferometers without exact analytical solutions, opening possibilities for exploring new architectures.

Keywords*: linear optics, linear optical quantum computing, machine learning in linear optics*

Построение собственных мод оптического параметрического генератора при наличии дисперсии групповых скоростей

Д.М. Малышев, К.С. Тихонов, В.А. Аверченко

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

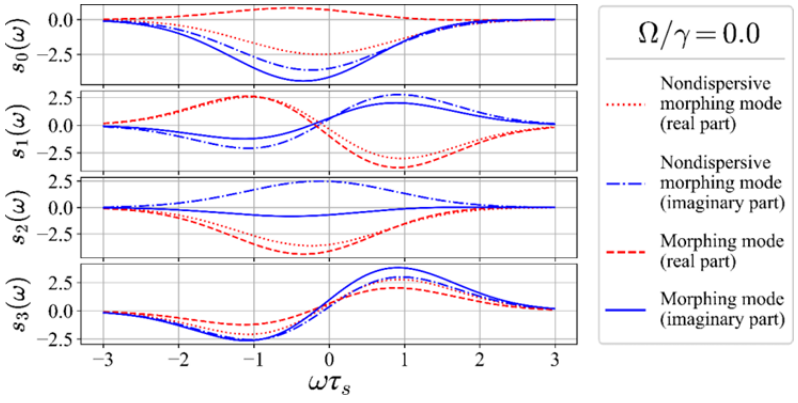
В работе рассматривается математическая процедура выделения набора динамических супермод квантового излучения, полученного при параметрической генерации на нелинейном кристалле в резонаторе с дисперсией групповых скоростей. Для построения частотного профиля таких супермод используется метод обобщенного разложения Блоха — Мессии. Полученные в результате спектры супермод дают возможность прогнозировать поведение системы при различных значениях управляющих параметров.

Ключевые слова: *квантовая оптика, сжатый свет, дисперсия групповых скоростей, супермоды излучения*

Исследование многомодовой структуры неклассического света, генерируемого в нелинейных оптических системах, является одним их ключевых направлений современных исследований в области квантовой оптики и квантовой теории информации. Одним из наиболее перспективных объектов этих исследований является оптический параметрический генератор (ОРО), в котором в результате взаимодействия света с нелинейной средой генерируется квантовое запутанное излучение: в процессе параметрической вниз-конверсии фотон накачки преобразуется в пару фотонов сигнальной и холостой мод, которые оказываются запутанными. При этом такое преобразование является вероятностным и протекает эффективнее в присутствии вынуждающего излучения. Эта схема реализована в ОРО с синхронной накачкой (SPOPO) на кристалле с квадратичной нелинейностью I типа, в котором время обхода резонатора совпадает с периодом импульсов накачки, а сигнальная и холостая моды являются вырожденными. Структура генерируемого излучения может быть эффективно описана при помощи так называемых супермод [1], которые являются ортонормированными собственными модами SPOPO, каждая из которых представляет собой линейную комбинацию сигнальных мод и отвечает независимому квантовому осциллятору.

В работе [1], подробно описывающей генерацию света в SPOPO, процедура выделения супермод основана на предположении об отсутствии или скомпенсированности дисперсии групповых скоростей во внутрирезонаторной среде. Однако на практике эффективное использование квантового излучения в качестве ресурса для протоколов квантовой информатики требует максимально точного учета и описания его свойств. Так, например, в [2] было показано, что различные нелинейные процессы, возникающие в квантово-оптических системах, приводят к появлению связи между супермодами параметрического процесса. Для их описания оказывается удобно ввести так называемые динамические супермоды.

Физический смысл динамических супермод заключается в том, что они полностью диагонализуют систему для каждого отдельного момента времени, т. е. они являются нелокальными. Математически это выражается в наличии дополнительного параметра, влияющего на форму спектрального профиля таких мод и отображающего их зависимость от момента наблюдения. На практике это приводит к формированию дополнительных корреляций между спектральными компонентами излучения, называемых скрытым сжатием [3] Гомодинное детектирование такого света не позволяет извлечь всю содержащуюся в нем информацию и требует дополнительного построения более сложных схем детектирования, например, с применением интерферометра с эффектом памяти [4, 5].



Спектральные профили динамических супермод SPOPO

В настоящей работе основное внимание было уделено получению спектрального профиля динамических мод SPOPO при наличии дисперсии групповых скоростей. Главным методом построения спектров является обобщенное разложение Блоха — Мессии (ABMD), предложенное в [2] и детально описанное в [6]. В частности, была рассмотрена резонаторная система, которая поддерживает существование двух мод. В этом случае из ABMD следует наличие четырех динамических супермод: двух сжатых и двух антисжатых. Были построены спектральные распределения четырех динамических супермод $s_n(\omega)$ по безразмерному времени $\omega\tau_s$ при нулевом значении безразмерной частоты Ω/γ, отвечающей во временном представлении грубой временной шкале [7]. Данные распределения представлены на рисунке. Ожидается, что квантовые свойства найденных динамических супермод превзойдут супермод, полученных без учета дисперсии.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00318).

Список источников

[1] *Patera G., Treps N., Fabre C., Valcarel G.J.* Quantum theory of synchronously pumped type I optical parametric oscillators: characterization of the squeezed supermodes // The European Physical Journal D. 2010. Vol. 56. № 1. P. 123–140.

[2] *Gouzien E., Tanzilli S., D'Auria V., Patera G.* Morphing supermodes: a full characterization for enabling multimode quantum optics // Physical Review Letters. 2020. Vol. 125. № 10. Art. no. 103601.

[3] *Gouzien E., Labonte L., Etesse J. et al.* Hidden and detectable squeezing from microresonators // Physical Review Research. 2023. Vol. 5. № 2. Art. no. 023178.

[4] *Barbosa F.A.S., Coelho A.S., Cassemiro K.N. et al.* Beyond Spectral Homodyne Detection: Complete Quantum Measurement of Spectral Modes of Light // Physical Review Letters. 2013. Vol. 111. № 20. Art. no. 200402.

[5] *Dioum B., D'Auria V., Zavatta A. et al.* Universal quantum frequency comb measurements by spectral mode-matching // Optica Quantum. 2024. Vol. 2. № 6. Art. no. 413.

[6] *Patera G., Pugliese A.* Avoided-crossings, degeneracies and Berry phases in the spectrum of quantum noise through analytic Bloch-Messiah decomposition // arXiv. 2025. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2504.20730

[7] *Averchenko V.A., Malyshev D.M., Tikhonov K.S.* Effect of group-velocity dispersion on the generation of multimode pulsed squeezed light in a synchronously pumped optical parametric oscillator // New Journal of Physics. 2025. Vol. 26. № 12. Art. no. 123017.

Derivation of the optical parametric oscillator supermodes in the presence of group velocity dispersion

D.M. Malyshev, K.S. Tikhonov, V.A. Averchenko

[1]*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

In this study we consider a mathematical procedure for determining a set of morphing supermodes of quantum radiation produced in a parametric oscillator with group velocity dispersion. The generalized Bloch — Messey decomposition method is used to construct the frequency profile of the supermodes. The resulting spectra of supermodes allow us to predict the behavior of the system at different values of the parameters.

Keywords: *quantum optics, squeezed light, group velocity dispersion, radiation supermodes*

Описание временной эволюции негауссовых квантовых состояний света с помощью кумулянтов

Х.К.Б. Луна Веронико, К.С. Тихонов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе исследуется использование разложения по кумулянтам для анализа эволюции негауссовых квантовых состояний световых полей. Изучается эволюция кумулянтов различных порядков и их связь с показателями негауссовости, в частности, с вигнеровской негативностью. Рассмотрены наиболее важные типы модельных гамильтонианов, включая взаимодействие Керра, трехмодовое сжатие и преобразование кубической фазы. Анализ проведен для нескольких начальных состояний, таких как вакуумное, фоковское, квадратурно-сжатое и когерентное состояния. Данное исследование позволит повысить эффективность генерации негауссовых состояний в эксперименте, а также подобрать процедуры коррекции ошибок для их применения в различных приложениях.

Ключевые слова: *квантовые поля, разложение по кумулянтам, эволюция кумулянтов, негауссовость, трехмодовое сжатие, кубическая фаза, взаимодействие керра, квантовая коррекция ошибок*

Квантовые гауссовы состояния широко используются в квантовой оптике и в квантовой информатике. В частности, к ним относятся когерентные и квадратурно-сжатые состояния, которые являются ключевым ресурсом для однонаправленных вычислений в непрерывных переменных, бозонного сэмплинга, квантовых метрологии и гравиметрии [1]. Особенностью гауссовых состояний является простота их теоретического описания: для полной характеристики их свойств оказывается достаточно моментов первого и второго порядков [2]. Кроме того, им соответствует неотрицательная функция Вигнера [3]. Вместе с тем гауссовы состояния имеют фундаментальные ограничения, что не позволяет, например, создать на их основе протоколы коррекции ошибок для квантовых вычислений [4]. Это, а также поиски новых методов и подходов для улучшения существующих квантово-оптических приложений, использующих неклассический свет, способствует исследованию негауссовых состояний.

Негауссовы состояния [3], например, состояния Фока или трехмодовое сжатое состояние, необходимы для современных квантовых технологий. Они требуются для универсальных квантовых вычислений [4, 3], дистилляции запутанности в квантовых коммуникациях [5]. Для генерации негауссовых состояний нужны физические процессы с большой степенью нелинейности: например, нелинейные преобразования в керровских стеклах, вычитание или добавление одиночного фотона и др. [3].

Для полного описания негауссовых состояний требуются моменты всех порядков, начиная с первого и до бесконечности. При этом моменты старших порядков не могут быть выражены через моменты первого и второго порядка, как в случае гауссовых состояний. Разумеется, на практике восстановить бесконечную иерархию моментов оказывается невозможным. В связи с этим для количественной оценки негауссовости состояний было предложено несколько мер, основанных на функции Вигнера, расстоянии между данным состоянием и ближайшим гауссовым, их относительной энтропии [6]. В частности, к таким мерам относится отрицательность (negativity) функции Вигнера, которая характеризует протяженность ее отрицательной области, расстояние Буреса, которое количественно определяет, насколько «далеко» данное состояние от гауссова. Также негауссовость состояний оценивают с помощью относительной энтропии Верля, которая может быть вычислена как разность энтропий данного негауссова состояния и ближайшего гауссова.

Главным недостатком всех существующих мер является отсутствие универсальности. Каждая из мер оказывается чувствительной лишь к определенному типу негауссовых состояний. В связи с этим в нашей работе мы обратились не к абсолютным значениям каждой из предложенных мер, а к их динамическому поведению по мере генерации тех или иных негауссовых состояний в нелинейном оптическом процессе. При этом мы провели описание эволюции каждой меры на языке кумулянтов.

Удобство кумулянтов состоит в том, что, в частности, для гауссовых состояний ненулевыми будут только кумулянты первого и второго порядков. Соответственно негауссовыми состояниями будут все состояния, для которых существуют ненулевые кумулянты старших порядков. Кроме того, кумулянты имеют более выраженный геометрический смысл. Так, например, первым четырем кумулянтам соответствуют среднее значение, дисперсия, асимметрия и эксцесс функции Вигнера. Отметим также, что динамика кумулянтов может быть алгебраически переведена в динамику мо-

ментов для этой системы, т. е., знание кумулянтов автоматически предоставляет информацию о моментах, и наоборот. Кроме того, кумулянты определенного порядка алгебраически определяются моментами всех порядков, предшествующих ему.

В нашей работе мы рассмотрели динамическое поведение для негауссовых состояний, полученных в различных нелинейных процессах при различных начальных условиях. При этом основное внимание было уделено тем процессам, которые чаще всего реализуются в реальных оптических экспериментах: взаимодействие Керра, трехмодовое сжатие и преобразование кубической фазы. Мы показали, что временная эволюция мер негауссовости для рассмотренных нами состояний полностью определяется кумулянтами третьего и четвертого порядков. В то же время кумулянты старших порядков играют лишь незначительную роль, особенно если в системе присутствуют некогерентные процессы, вызванные потерей фотонов или дефазировкой. В качестве примера можно привести объем отрицательной части функции Вигнера для трехмодового сжатия (см. рис. 1), который, согласно проведенному нами анализу, соответствует сумме кумулянтов третьего и четвертого порядков (см. рис. 2).

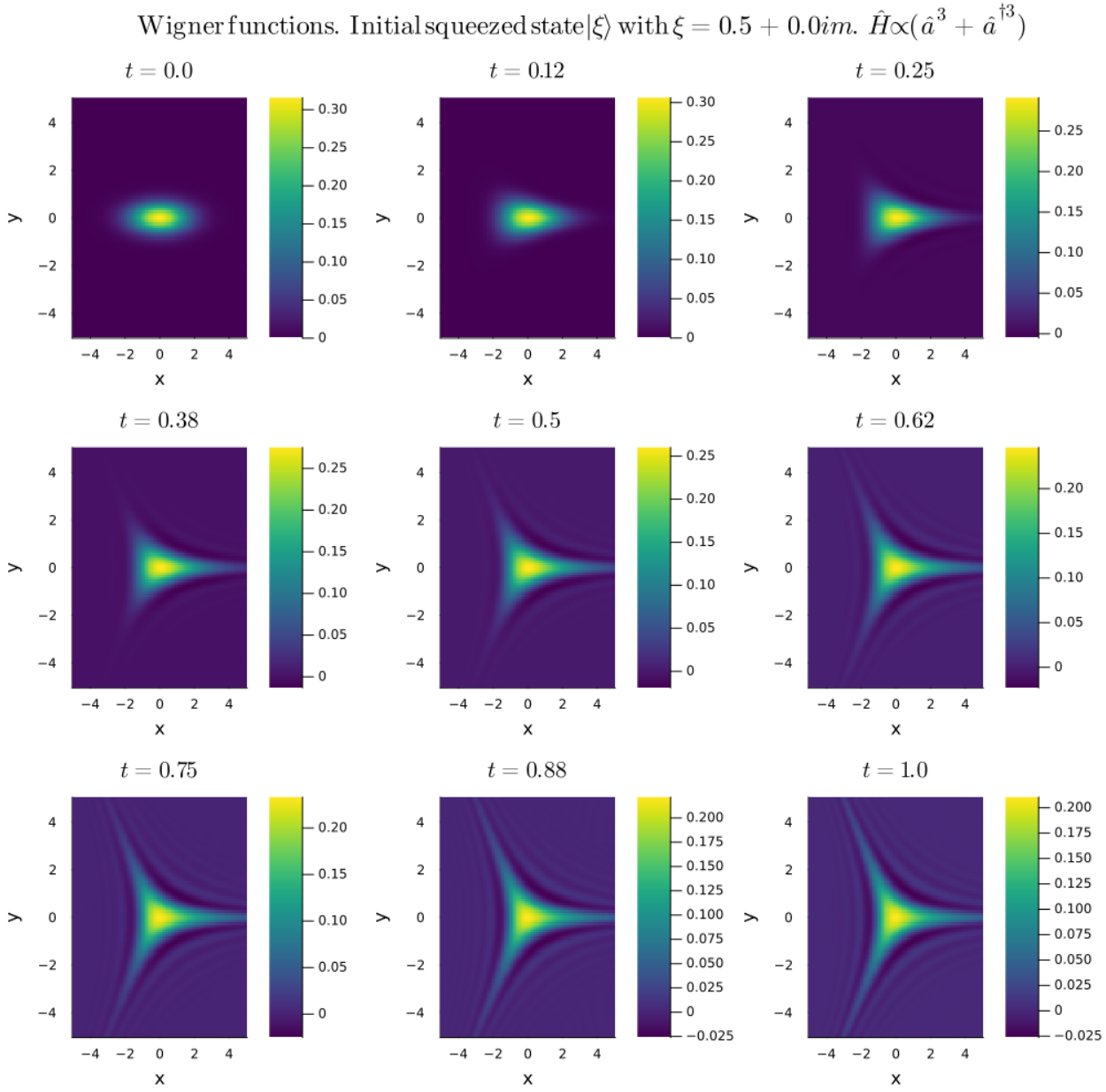


Рис. 1. Функция Вигнера для трехмодового сжатия с потерями $\gamma = 0{,}5$. Начальное сжатое состояние с $\xi = 0{,}5$

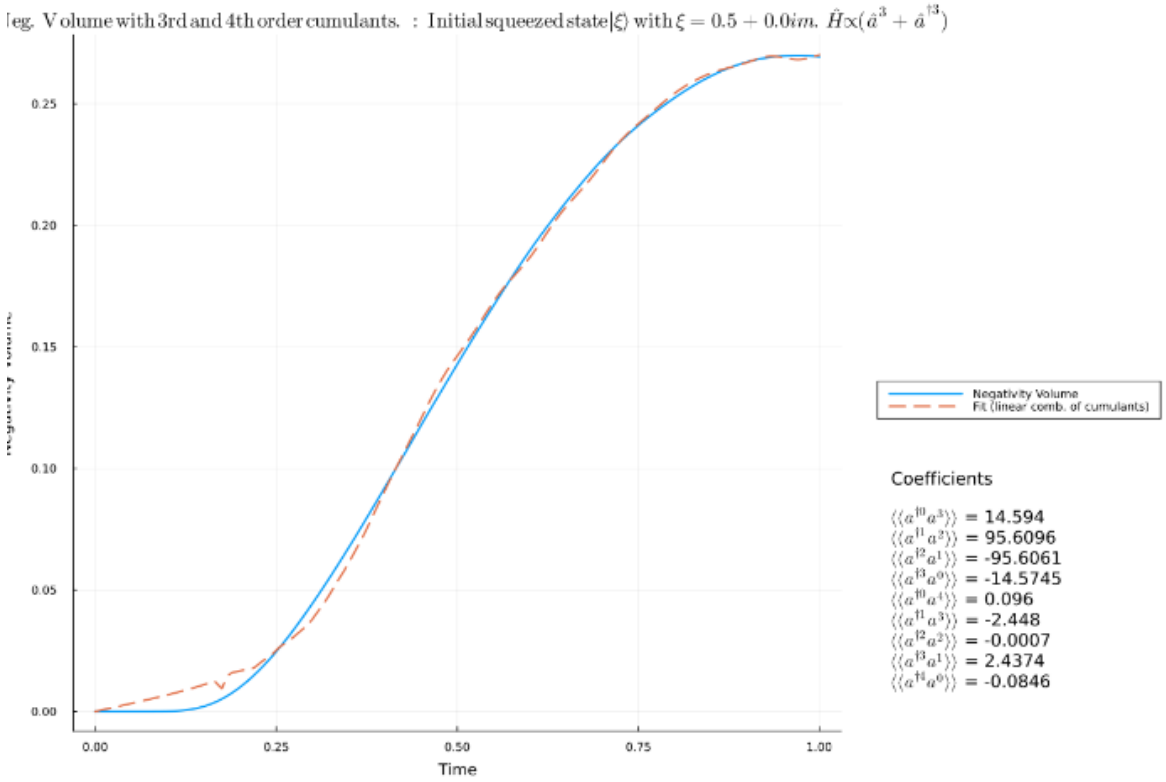


Рис. 2. Аппроксимация объема отрицательности кумулянтами третьего и четвертого порядков для трехмодового сжатия с потерями $\gamma = 0{,}5$. Начальное сжатое состояние с $\xi = 0{,}5$

Список источников

[1] *Fabre C., Treps N.* Modes and states in quantum optics // Review of Modern Physics. 2020. Vol. 92. № 2. Art. no. 035005. https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.035005

[2] *Crescimanna V., Goldberg A.Z., Heshami K.* Seeding Gaussian boson samplers with single photons for enhanced state generation // Physical Review A. 2024. Vol. 109. № 2. Art. no. 023717. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.109.023717

[3] *Chabaud U., Markham D., Grosshans F.* Stellar representation of non-Gaussian quantum states // Physical Review Letters. 2020. Vol. 124. № 6. Art. no. 063605. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.063605

[4] *Baragiola B.Q., Pantaleoni G., Alexander R.N., Karanjai A., Menicucci N.C.* All-Gaussian universality and fault tolerance with the Gottesman — Kitaev — Preskill code // Physical Review Letters. 2019. Vol. 123. № 20. Art. no. 200502. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.200502

[5] *Leverrier A., Grangier P., Filip R.* Quantum communications with Gaussian and non-Gaussian states of light // Proceedings of International Conference on Quantum Information. Ottawa, 2011. https://doi.org/10.1364/ICQI.2011.QMF1

[6] *Ghiu I., Marian P., Marian T.A.* Measures of non-Gaussianity for one-mode field states // Physica Scripta. 2013. Vol. 153. № 6. Art. no. 014028. https://doi.org/10.1088/0031-8949/2013/T153/014028

Description of the temporal evolution of non-gaussian states of light using cumulant expansion

J.C.B. Luna Veronico, K. Tikhonov

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

This work investigates the use of the cumulant expansion to analyze the evolution of non-Gaussian quantum states of light fields. We study the dynamics of cumulants of various orders and their connection to non-Gaussianity measures, particularly Wigner negativity. The most relevant model Hamiltonians are examined, including Kerr interaction, three-mode squeezing, and the cubic-phase transformation. The analysis is carried out for several initial states such as the vacuum, Fock, quadrature-squeezed, and coherent states. The results of this study will help improve the experimental generation of non-Gaussian states and inform suitable error-correction procedures for their use in diverse applications.

Keywords: *quantum fields, cumulant expansion, cumulant dynamics, non-Gaussianity, three-mode squeezing, cubic phase, Kerr interaction, quantum error correction*

Сравнение полуклассической и квантовой схем генерации случайных чисел для использования в фундаментальных тестах и приложениях

А.А. Кретова, Д.Д. Решетников, А.А. Фоминова, К.С. Тихонов

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен сравнительный анализ квазиклассического и квантового оптических генераторов последовательностей случайных чисел (ПСЧ) при наличии и в отсутствии дополнительной постобработки (экстракции). Было показано, что использование сильно ослабленного света от когерентного лазерного источника позволяет быстро генерировать ПСЧ, но с низкой степень случайности. Напротив, квантовый источник на основе спонтанного параметрического рассеяния позволяет получить ПСЧ с низкой скоростью генерации, но с высокой степенью случайности. Также было исследовано смешение света от указанных выше источников для увеличения общей эффективности генерации. Кроме того, для каждого источника было рассмотрено влияние экстракции случайности с помощью методов фон Неймана и Бабкина на качество генерируемых ПСЧ.

Ключевые слова: *квантовые коммуникации, квантовые генераторы случайных чисел, квантовая запутанность, экстракция случайности*

Длинные последовательности случайных чисел (ПСЧ) являются неотъемлемой частью многих фундаментальных экспериментов и инженерных приложений. От степени случайности ПСЧ зависят корректность моделирования физических процессов, надежность криптографических систем, достоверность статистической выборки и многое другое [1].

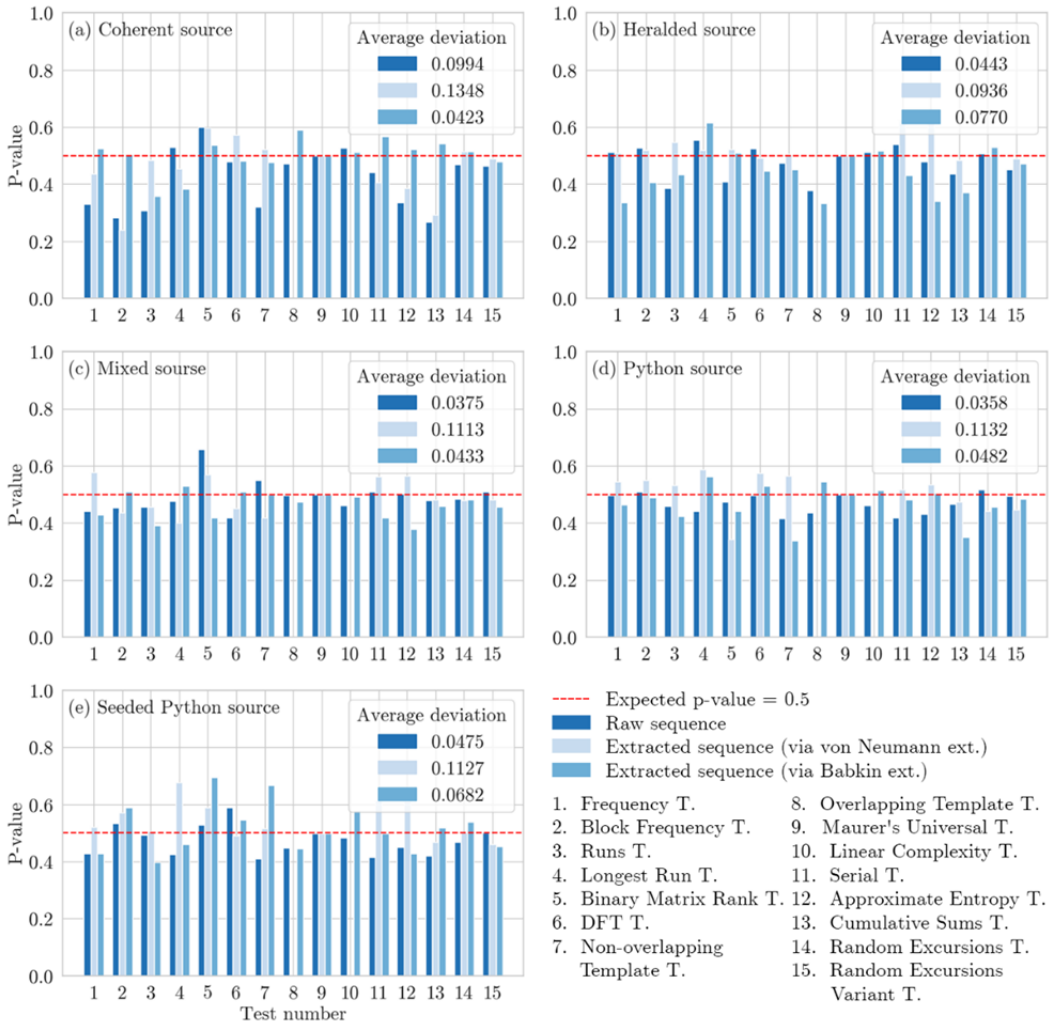
Целью данной работы являлся сравнительный анализ степени случайности необработанных ПСЧ, полученных с помощью полуклассической и квантовой оптических схем генерации ПСЧ, а также исследование дополнительных методов постобработки (экстракции) ПСЧ, позволяющих еще больше повысить их степень случайности. При этом основное внимание было уделено генератору на основе запутанных пар фотонов, а также генератору ПСЧ, использующему ослабленный вплоть до (в среднем) однофотонных состояний свет от когерентного лазерного источника. Кроме того, была рассмотрена схема генерации ПСЧ, в которой излучение от этих двух источников смешивалось, что позволило объединить их основные достоинства и нивелировать некоторые недостатки.

Оценка степени случайности полученных ПСЧ проводилась с помощью сюиты статистических тестов NIST. Кроме того, для каждой схемы было оценено распределение полученных p-значений (p-value). При этом с помощью каждого источника снижения влияния флуктуаций, обусловленных ограниченным объемом выборки, были сгенерированы ПСЧ длиной 50 млн. бит каждая. В дальнейшем при проведении тестов над подпоследовательностями исходные ПСЧ были разделены на 25 подпоследовательностей по 2 млн. каждая. Также для оценки и сравнения степени случайности полученных ПСЧ в анализ была включена программно сгенерированная с помощью библиотеки «Secrets» псевдослучайная последовательность.

В результате проведенных тестирований было показано, что полуклассическая схема генерации, основанная на ослабленном лазерном излучении, позволяет получать ПСЧ с высокой скоростью, но довольно низкой степенью случайности, которой не всегда хватает для прохождения сюиты тестов. Напротив, схема генерации, использующая чисто квантовый подход, позволяет получить ПСЧ с высокой степенью случайности, но с очень низкой скоростью генерации, связанной с низкой эффективностью параметрического процесса рождения фотонных пар внутри нелинейного кристалла. При этом смешанный источник, в котором к фотонам от ослабленного когерентного источника приблизительно на каждые двадцать срабатываний добавлялся фотон, полученный в параметрическом процессе, показал высокую степень генерации ПСЧ с высокой степенью случайности.

Было показано, что использование экстракторов случайности может улучшить степень случайности ПСЧ. При этом, как показано на рисунке, эффективность этого процесса зависит от источника и использованного метода экстракции. В частности, было показано, что метод Бабкина [1] позволяет сохранить значительно больше информации, чем метод фон Неймана, и существенно повысить степень случайности.

Рассмотренные в работе квантовые генераторы случайных чисел являются простыми по своему устройству и могут быть воспроизведены без больших затрат ресурсов, что делает их удобными для проверки фундаментальных тестов и практических приложений. В частности, такие схемы генерации ПСЧ могут быть успешно интегрированы в оптические схемы экспериментов, проверяющих фундаментальные законы квантовой ~~физики~~ механики, включая, например, проверку неравенств Белла [2].



Сравнение результатов тестирования NIST необработанных и обработанных ПСЧ для разных источников

Список источников

[1] *Арбеков И.М., Молотков С.Н.* Об экстракции квантовой случайности // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 6. С. 651–669. https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038890

[2] *Greenberger D.M., Horne M.A., Shimony A., Zeilinger A.* Bell's theorem without inequalities // American Journal of Physics. 1990. Vol. 58. № 12. P. 1131–1143.

Comparison of random number generators based on classical, semiclassical and quantum approaches

A.A. Kretova, D.D. Reshetnikov, A.A. Fominova, K.S. Tikhonov

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

The paper presents an analysis of quasiclassical and quantum optical random number generators, both with and without additional postprocessing (extraction). It was shown that use of strongly attenuated light from a coherent source enables high-speed generation with low randomness quality. In contrast, a quantum source based on spontaneous parametric down-conversion produces highly random sequences at the cost of low generation rate. A hybrid approach combining light from the two sources is also examined to improve overall generation efficiency. Additionally, the effect of randomness extractors using von Neumann and Babkin methods was analyzed for sequences for each source.

Keywords: *quantum communications, quantum entanglement, quantum random number generators, randomness extractors*

Влияние параметров лазерного излучения на вероятность переизлучения однофотонного лавинного фотодиода

А.С. Сидельникова[1], К.Д. Бондарь[1,2], К.Е. Бугай[1,3], Д.С. Булавкин[1], В.М. Вахрушева[1], Р.Ю. Лохматов[1], Д.М. Мелконян[1], И.С. Сущев[1,2],А.П. Зызыкин[1], Д.А. Дворецкий[1,3]

[1] *ООО «СФБ Лаб», Москва, Россия*
[2] *Центр квантовых технологий и Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

Работа посвящена исследованию влияния параметров стимулирующего лазерного излучения на вероятность переизлучения однофотонных лавинных фотодиодов (ОЛФД) в системах квантового распределения ключей (КРК) и связанной с этим эффектом атаки "backflash" на систему КРК. Было экспериментально подтверждено, что вероятность переизлучения в пределах погрешностей не зависит от длины волны стимулирующего лазерного излучения в спектральном диапазоне 1100–1800 нм. Также была получена нижняя оценка длины секретного ключа в случае проведения нарушителем коллективной атаки на информационные состояния и состояния в побочном канале переизлучения.

Ключевые слова: *квантовое распределение ключей, атака "backflash", однофотонный лавинный фотодиод*

Введение

Техническое несовершенство оборудования, используемого при производстве системы квантового распределения ключей (КРК), открывает злоумышленнику ряд лазеек, которыми он может воспользоваться и, не нарушая работы системы, узнать часть или даже весь секретный ключ. Уязвимостью такого рода является эффект переизлучения однофотонных лавинных фотодиодов (ОЛФД), который позволяет проводить злоумышленнику атаку backflash на систему КРК [1]. Для точной оценки защищенности системы КРК от атаки backflash необходимо знать параметры системы КРК, от которых может зависеть величина утечки информации по побочному каналу переизлучения [2–4].

В работе представлены экспериментальные исследования зависимости вероятности переизлучения от характеристик стимулирующего лазерного излучения (в случае систем КРК — излучение лазера передатчика): от длины волны излучения и ширины лазерного импульса.

Экспериментальная часть

В качестве исследуемого образца ОЛФД был взят лавинный фотодиод типа InGaAs в составе приемного блока системы КРК (DUT ОЛФД). Для измерения вероятности переизлучения ОЛФД был собран стенд для оптической рефлектометрии [4]. На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда.

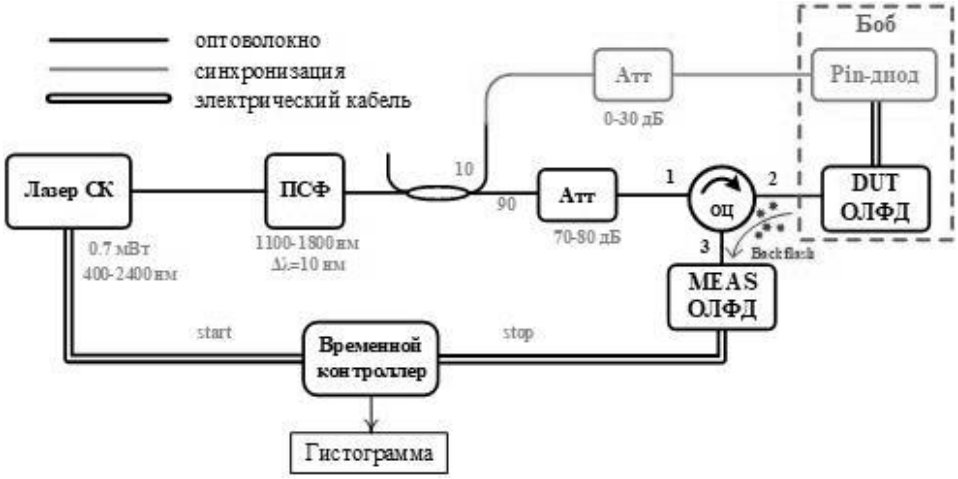


Рис. 1. Экспериментальный стенд для измерения зависимости вероятности переизлучения ОЛФД от длины волны стимулирующего лазера

В качестве источника стимулирующего излучения используется импульсный источник суперконтинуума, работающий в спектральном диапазоне 400–2400 нм, с подключенным к нему перестраиваемым спектральным фильтром. Временной коррелятор позволяет обеспечить синхрониза-

цию лазера и измеряющего ОЛФД (MEAS) и построить гистограмму числа отсчетов MEAS ОЛФД в зависимости от задержки относительно синхроимпульса. По данным гистограммы рассчитывается вероятность переизлучения фотонов внутри ОЛФД [4].

Эксперименты проводились для длин волн 1100–1800 нм. Данный экспериментальный стенд также позволяет провести исследования зависимости вероятности переизлучения от ширины лазерного импульса. Для этого источник суперконтинуума вместе со спектральным фильтром были заменены на импульсный лазер с перестраиваемой шириной оптического импульса (рабочая длина волны лазера — 1550 нм).

Результаты

В результате проведенных экспериментов было показано, что в спектральном диапазоне 1100–1800 нм разброс в величине вероятности переизлучения составляет всего 0,5%, поэтому в пределах погрешностей можно считать, что вероятность переизлучения остается постоянной и не зависит от длины волны стимулирующего лазера (см. рисунок 2).

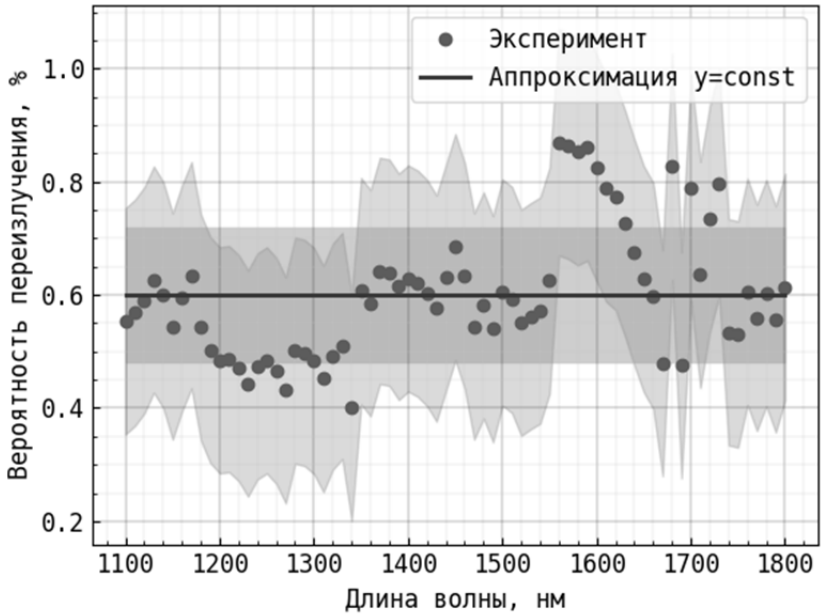


Рис. 2. Зависимость вероятности переизлучения ОЛФД от длины волны стимулирующего лазерного излучения

В процессе исследований была получена нижняя оценка длины секретного ключа в случае проведения злоумышленником коллективной атаки на информационные состояния и состояния в побочном канале переизлучения [5]:

$$l(Q, P_{BF}) = 1 - h\left(\frac{P_{BF} - 2Q}{2(1 + P_{BF})}\right) - h(Q),$$

где Q — величина квантовой ошибки QBER, P_{BF} — вероятность переизлучения ОЛФД, h — бинарная энтропийная функция Шеннона.

Заключение

В работе экспериментально подтверждена независимость вероятности переизлучения ОЛФД от длины волны стимулирующего лазерного излучения, что позволяет не учитывать возможные атаки злоумышленника с изменением длины волны информационного состояния в квантовом канале при разработке защиты от атаки backflash в системах КРК. Полученная в работе теоретическая нижняя граница длины секретного ключа может быть использована для оценки защищенности систем КРК от атаки backflash.

Список источников

[1] *Kurtsiefer C., Müller M., Zarda P., De Riedmatten H., Baldi P.* The breakdown flash of silicon avalanche photodiodes-back door for eavesdropper attacks? // Journal of Modern Optics. 2001. Vol. 48. № 13. P. 2039–2047. https://doi.org/10.1080/09500340108235023

[2] *Bogdanov S.A., Kiselev S.V., Makarov V.I., Shakhov A.N.* Influence of QKD apparatus parameters on the backflash attack // Quantum Technologies. 2022. Vol. 12133. P. 90–95.

[3] *Pinheiro P.V.P., Lima A.A., Costa J.L., Santos L.A.* Eavesdropping and countermeasures for backflash side channel in quantum cryptography // Optics Express. 2018. Vol. 26. № 16. P. 21020–21032. https://doi.org/10.1364/OE.26.021020

[4] *Meda A., Bustos S., Torres M., Schmitt M.* Quantifying backflash radiation to prevent zero-error attacks in quantum key distribution // Light: Science & Applications. 2017. Vol. 6. № 6. P. e16261–e16261. https://doi.org/10.1038/lsa.2017.118

[5] *Молотков С.Н.* Побочные каналы утечки информации в квантовой криптографии: не строго однофотонные состояния, разные квантовые эффективности детекторов, конечные передаваемые последовательности // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2021. Т. 160. № 3. С. 327–365.

The influence of laser radiation parameters on the probability of backflash from single-photon avalanche photodiode

A.S. Sidelnikova, K.D. Bondar[1,2], K.E. Bugai[1,3], D.S. Bulavkin[1], V.M. Vakhrusheva[1], R.Yu. Lokhamatov[1], D.M. Melkonyan[1], I.S. Sushchev[1,2], A.P. Zyzykin[1], D.A. Dvoretskiy[1,3]

[1] *SFB Laboratory, Moscow, Russia*
[2] *Quantum Technology Centre and Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[3] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

This paper is dedicated to the investigation of the influence of the stimulating laser radiation parameters on the probability of backflash light in single-photon avalanche photodiodes (SPADs) and the associated Backflash attack on QKD systems. It was experimentally confirmed that, within the measurement accuracy, the probability of backflash does not depend on the wavelength of the stimulating laser radiation within the spectral range of 1100–1800 nm. Additionally, a lower bound for the length of the secret key was determined in the case of a collective attack by an eavesdropper on the information states and the states in the backflash side channel.

Keywords: *quantum key distribution, backflash attack, single-photon avalanche diode*

Перепутывающие двухкудитные операции в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия многомодового света и атомного ансамбля

Р. Сурмай, В.А. Леонов, Е. А. Вашукевич

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

Целью работы является описание возможности генерации перепутывающих двухкудитных гейтов в протоколе QRQ (QND-rotation-QND). В качестве меры перепутывания была выбрана сила перепутывания e_p, широко применяемая для анализа перепутывания кубитов, и ее обобщение на кудитный случай. Для расчета силы перепутывания нами было использовано операторное разложение Шмидта. Было получено значение силы перепутывания для унитарного двухкудитного преобразования в QRQ протоколе для произвольной размерности логического пространства. Также были найдены условия, при которых в протоколе реализуются перепутывающие преобразования, представимые в виде рациональной степени SWAP гейта ($SWAP^{m/n}$) и показана инвариантность этих условий относительно размерности системы. Кроме того, в работе представлен анализ вероятностей выполнения перепутывающих операций.

Ключевые слова: *квантовая оптика, квантовые вычисления, кудиты, орбитальный угловой момент*

В области квантовых вычислений одним из самых перспективных направлений являются квантовые вычисления в дискретных переменных. Они обладают высокой степенью достоверности и могут быть реализованы на различных физических платформах. Тем не менее, реализация перепутывающих операций носит вероятностный характер [1], имеются проблемы с коррекцией ошибок [2] и проблема декогеренции [3], что ограничивает возможности масштабируемости квантовых вычислительных устройств.

Выбор фотонов в качестве платформы для квантовых вычислений обусловлена устойчивостью их к декогеренции, высокой скоростью передачи информации, а также разработанной технической базой для манипулирования и генерации квантовых состояний света.

С недавнего времени появилось новое перспективное направление для исследований — гибридные, свето-атомные системы. Подобный подход позволяет создавать перепутывание состояния логических разной физической природы. При этом, как показано в работе [4], выбор орбитального углового момента в качестве кодирующей информацию степени свободы позволяет в рассматриваемых системах переходить к логических объектам высокой размерности — кудитам. Важной особенностью свето-атомных систем является также возможность осуществлять хранение квантовой информации на долгоживущих атомных степенях свободы вместе с логическими операциями [5].

Представленный в работе протокол является расширением двухкубитного протокола [6] на кудитный случай. Нами рассматривается квантовое неразрушающее (QND) взаимодействие многомодового света с ОУМ с атомным ансамблем, поворот атомных и световых квадратур, и еще одно QND взаимодействие (далее — QRQ протокол). Подобный подход в работе [7] позволял переключаться между режимами квантовой QND памяти и режимом перепутывания, однако мы рассматриваем произвольные углы поворота и описываем преобразования на языке дискретных переменных.

В предыдущей работе [6] была показана возможность генерации перепутывающего унитарного преобразования $\sqrt{SWAP}$ с вероятностью $1/3$. Интерес представляет исследование данного протокола на системах больших размерностей — генерация операций, обладающих большей силой перепутывания и увеличение вероятностей.

Для оценки меры перепутывания двухкудитного унитарного преобразования необходимо ввести метрику, которая бы удовлетворяла требованиям, предложенным в работе [8]. В качестве такой меры была выбрана сила перепутывания e_p, описанная в статье [9]:

$$e_p = \frac{1}{d^4}[E(U) + E(US_{12}) - E(S_{12})], \quad (1)$$

где d — размерность кудита, U — рассматриваемый гейт, S_{12} — гейт SWAP для первой и второй систем, E(U) — линейная энтропия. Введя операторное разложение Шмидта для произвольного унитарного оператора U:

$$U = \sum s_n A_n \otimes B_n,$$

где $\{A_n\}$, $\{B_n\}$ — базисы на пространстве операторов, действующих на подсистемы 1 и 2, а $s_n \geq 0$ — числа Шмидта, можно выразить энтропию следующим образом:

$$E(U) = \frac{1}{d^4}\sum s_n^4 \quad (2)$$

Тогда сила перепутывания унитарного преобразования U, реализуемого в рассматриваемом QRQ протоколе примет следующий вид:

$$e_p(U) = \frac{2(-1+d)q^2x^2}{(1+d)(q^2+x^2)}, \quad (3)$$

где q и x — некоторые функции от физических управляющих параметров схемы, таких как углы поворота квадратур атомных и световых операторов, а также длительности первого и второго QND взаимодействия. Из выражения (3) видно, что значение силы перепутывания двухкудитного гейта, реализуемого в QRQ протоколе факторизуется на два множителя — на зависящий от размерности системы и второй, зависящий только от параметров взаимодействия.

Полученное выражение для силы перепутанности позволяет нам ассоциировать полученные преобразования с изотропными двухкудитными гейтами $SWAP^{m/n}$, имеющими степень перепутывания вида:

$$e_p(SWAP^{m/n}) = \frac{1}{4}sin(\frac{\pi m}{n})^2 \frac{2(-1+d)}{(1+d)} \quad (4)$$

Приравняв значения e_p в выражениях (3) и (4), увидим, что размерные множители совпадают. Таким образом, можно связать параметры системы и степень перепутывания выполняемого изотропного гейта, который она позволяет генерировать:

$$\frac{q^2x^2}{(q^2+x^2)} = \frac{1}{4}sin(\frac{\pi m}{n})^2 \quad (5)$$

Отсутствие в выражении размерности d и показывает размерную инвариантность условий генерации изотропных гейтов.

В работе также показано, что вероятность генерации полученных преобразований будет зависеть от параметров самой системы, и не содержать размерный множитель.

Таким образом, нами был проведен анализ перепутывающих операций на двухкудитной системой размерности d, генерируемых в QRQ протоколе, и показано, что вероятности преобразований и значения управляющих параметров схемы, обеспечивающих генерацию $SWAP^{m/n}$ гейта, не зависят от размерности системы.

Благодарность

Работа была поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» (грант № 22-1-4-20-1).

Список источников

[1] *O'Brien J.L. et al.* Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate // Nature. 2003. Vol. 426. № 6964. P. 264–267.

[2] *Li J.* Some Progress on Quantum Error Correction for Discrete and Continuous Error Models // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 46998–47012.

[3] *DiVincenzo D.P.* Quantum computation // Science. 1995. Vol. 270. № 5234. P. 255–261.

[4] *Vashukevich E.A. et al.* Conversion and storage of modes with orbital angular momentum in a quantum memory scheme // Physical Review A. 2020. № 101 (3). Art. no. 033830.

[5] *Vashukevich E.A. et al.* High-fidelity quantum gates for OAM single qudits on quantum memory // Laser Physics Letters. 2022. Vol. 19. № 2. Art. no. 025202.

[6] *Vashukevich E.A., Golubeva T.Y.* Parallel two-qubit entangling gates via QND interaction controlled by rotation // arXiv e-prints. 2024. C. arXiv: 2405.08141.

[7] *Muschik C.A. et al.* Quantum information at the interface of light with atomic ensembles and micromechanical oscillators // Quantum Information Processing. 2011. Vol. 10. P. 839–863.

[8] *Horodecki M., Horodecki P., Horodecki R.* Limits for entanglement measures // Physical Review Letters. 2000. Vol. 84. № 9. Art. no. 2014.

[9] *Wang X., Sanders B.C., Berry D.W.* Entangling power and operator entanglement in qudit systems // Physical Review A. 2003. Vol. 67. № 4. Art. no. 042323.

Entangling two-qudit operations in a protocol of quantum non-demolition interaction between multimode light and an atomic ensemble

R. Surmay, V.A. Leonov, E.A. Vashukevich

Saint-Petersburg University, Saint-Petersburg, Russia

The aim of this work is to describe the possibility of generating entangling two-qudit gates in the QRQ (QND-rotation-QND) protocol. As a measure of entanglement, we selected the entanglement strength (e_p), widely used for analyzing qubit entanglement, and its generalization to the qudit case. To calculate the entanglement strength, we employed the Schmidt operator decomposition. The entanglement strength was derived for a unitary two-qudit transformation in the QRQ protocol for an arbitrary dimension of the logical space. We also established the conditions under which the protocol implements entangling transformations expressible as a rational power of the SWAP gate (SWAP$^{m/l}$) and demonstrated the invariance of these conditions with respect to the system dimension. Furthermore, the work presents an analysis of the probabilities of implementing entangling operations.

Keywords: *quantum optics, quantum computations, qudits, orbital angular momentum*

Секция 8
Технологии микро-
и наноструктурирования

Алмазная дифракционная оптика ТГц диапазона

М.С. Комленок[1], Т.В. Кононенко[1], В.С. Павельев[2], Б.А. Князев, Г.А. Командин[1], В.Г. Ральченко[1], В.И. Конов[1]

[1] *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия*

Увеличение мощности излучения терагерцовых источников требует разработки новой оптики для работы с ними. В этой работе предлагается метод лазерной репликации для изготовления алмазной цилиндрической дифракционной линзы с кусочно-непрерывным профилем микрорельефа для терагерцового диапазона. Процедура включает инвертированное структурирование кремниевой подложки методом лазерной абляции для ее последующей репликации на поверхность алмаза методом химического осаждения из газовой фазы. Испытания изготовленной линзы, проведенные с помощью Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) на длине волны λ=141 мкм, продемонстрировали высокую дифракционную эффективность линзы (95±5 %) и хорошее соответствие измеренного и рассчитанного распределений интенсивности в фокальной плоскости.

Ключевые слова: *алмаз, лазерная абляция, дифракционные оптические элементы*

Введение

Алмазная оптика является лучшим выбором для мощного ТГц излучения из-за рекордного значения теплопроводности 10÷20 Вт/см·К [1]. Кроме того, алмаз имеет более низкое значение показателя преломления n = 2,38 по сравнению с кремнием (n = 3,4), что приводит к уменьшению потерь на френелевское отражение с 50 до 30 % на плоскопараллельной пластине. Алмазные пластины уже использовались в качестве материала для выходных окон в мощных (> 1 МВт) гиротронах [2, 3]. В настоящее время доступны поликристаллические CVD-алмазные пластины диаметром более 100 мм, но их лазерная обработка представляет собой нетривиальную задачу, поскольку алмаз является широкозонным диэлектриком (его спектральное окно прозрачности простирается от 225 нм до радиоволн). Поэтому он эффективно поглощает УФ-излучение, что объясняет использование эксимерных УФ-лазеров для изготовления первой дифракционной алмазной оптики для CO_2-лазеров [4–6]. Однако эксимерные лазеры имеют сравнительно низкую частоту следования импульсов (<1 кГц), что существенно ограничивает их производительность при обработке материалов. На изготовление одного элемента с апертурой 4 мм для рабочей длины волны λ = 10,6 мкм уходит около 3 часов [5]. Для ТГц-диапазона по сравнению с ИК-диапазоном требуются значительно большие апертуры и глубина рельефа дифракционных элементов. В случае алмазной дифракционной линзы для лазера на свободных электронах с длиной волны λ=141 мкм необходимо создать рельеф с максимальной глубиной, которая равна λ/(n–1) = 141 мкм/(2,38–1) ≈100 мкм, на пластине диаметром не менее 20 мм. Современные твердотельные (дисковые и волоконные) лазеры со сверхкороткими импульсами и высокой частотой следования обеспечивают как высокопроизводительную, так и прецизионную обработку многих материалов. Такие лазеры уже успешно применялись для изготовления кремниевых ДОЭ терагерцового диапазона [7–11]. Однако основная длина волны этих лазеров находится в ближнем ИК или видимом диапазонах, где алмаз прозрачен. В этом случае абляция алмаза обеспечивается нелинейным поглощением, локализованным в высокоинтенсивной области лазерной каустики. Длина поглощающей области обычно достигает сотен микрон [12] для стандартных гальванометрических двухкоординатных сканаторов с F-Theta линзами с фокусным расстоянием более 75 мм, которые часто используются для быстрого сканирования по поверхности лучом лазерных систем с высокой частотой повторения. Это провоцирует приповерхностные оптические пробои [12] и появление поглощающих графитоподобных включений в объеме алмаза в отличие от поверхностной абляции алмаза УФ-излучением с λ<225 нм, поглощаемым в тонком поверхностном слое [13]. Образование графитоподобных включений в объеме может вызывать трещины или даже выколы материала вследствие разности плотностей графита и алмаза. Во избежание проникновения лазерного излучения ИК-видимого диапазона в объем алмаза было предложено и реализовано нанесение тонкого поглощающего покрытия (металлического или графитового) на поверхность образца [12, 13]. Однако этот подход не полностью подавлял приповерхностный пробой для коротких пикосекундных импульсов, которые обеспечивают более высокую точность и меньшую шероховатость поверхности по сравнению с длинными импульсами. Чтобы преодолеть указанные трудности с обработкой поверхности алмаза в этой работе предлагается использовать метод реплики, заключающийся в формировании инвертированного профиля на поверхности кремния разработанным методом лазерной абляции, а затем выращивание алмаза методом газофазного синтеза (CVD) на структурированной кремниевой подложке (шаблоне).

Эксперимент

Подложка из полированного поликристаллического кремния толщиной 3 мм и диаметром 40 мм использовалась для создания шаблона и последующего CVD-синтеза алмаза. Схематичное изображение стадий метода реплики представлено на рис. 1. Для обработки поверхности кремния использовался высокочастотный (200 кГц) дисковый Yb:YAG-лазер фирмы Dausinger + Giesen GmbH (λ = 1030 нм, τ = 1 пс), обеспечивающий необходимую производительность процесса абляции на большой площади и глубине.

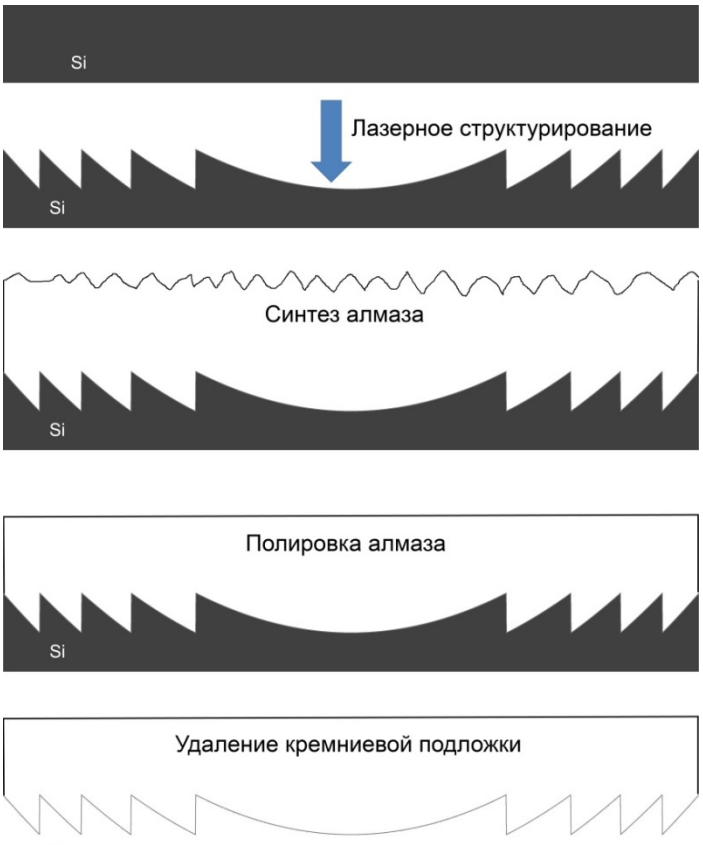


Рис. 1. Этапы создания алмазной дифракционной линзы методом реплики

Движение лазерного луча по поверхности кремния осуществлялось высокоскоростным гальванометрическим сканатором XY (Miniscan II от Raylase), оснащенным F-Theta линзой с фокусным расстоянием 100 мм. Пучок скачкообразно перемещался от точки к точке, формируя матрицу с размером ячейки ~ 11 мкм. Локальная глубина рельефа поверхности определялась временем облучения соответствующей точки матрицы, контролируемой внешней ячейкой Поккельса. Микрорельеф цилиндрической дифракционной линзы (диаметр апертуры — 20 мм, фокусное расстояние — 40 мм, рабочая длина волны — 141 мкм) был рассчитан на основе подхода, описанного в [14], и состоял из 9 зон Френеля с непрерывным рельефом поверхности в пределах каждого из них. Максимальная глубина рельефа 100 мкм достигалась после многократного прохода лазерного луча по обрабатываемой области поверхности. Толщина удаляемого абляцией за один проход слоя составляла 2 мкм.

Структурированный лазером кремниевый шаблон засевали алмазными наночастицами (Adamas Nanotechnologies Inc.), диспергированными в изопропаноле (концентрация 0,25 г/л), в ультразвуковой ванне (мощность 450 Вт) в течение 30 мин. Затем поликристаллический алмаз осаждался на поверхность кремниевого шаблона из смеси CH_4/H_2 в микроволновой плазменной CVD установке ARDIS-100 (ООО «Оптосистемы»), работающей на частоте 2,45 ГГц. Осаждение проходило непрерывно в течение 496 часов, что привело к формированию алмазной пленки толщиной 550 мкм. Ростовая поверхность выращенной пленки была механически отполирована для уменьшения шероховатости поверхности с ≈ 5 до 0,09 мкм, после чего толщина алмазной линзы уменьшилась с 550 до 320 мкм. Полученная профилированная алмазная пластина химически отделялась от Si-подложки в смеси $HF+HNO_3+CH_3COOH$. Параметры роста алмаза и процессов постобработки были аналогичны данным, опубликованным в работе [15]. Морфологию поверхности анализировали с помощью

интерферометра белого света (NewView5000, ZYGO), обеспечивающего расчет средней шероховатости R_a выбранного участка, и растрового электронного микроскопа (РЭМ, JSM-6510LV, JEOL).

Результаты и обсуждение

РЭМ-изображения части обработанного лазером кремниевого шаблона и полученной алмазной линзы показаны на рис. 2, а, б, соответственно. Впадины на кремниевой подложке соответствуют выступам на алмазной реплике. Увеличенные РЭМ-изображения границы между двумя соседними зонами Френеля представлены на рис. 2, в, г для образцов кремния и алмаза, соответственно. Лазерная абляция кремния сопровождалась поступательным ростом шероховатости поверхности, что объясняет большую шероховатость более глубоких участков рельефа (R_a = 1,5 мкм) по сравнению с более мелкими участками (R_a = 0,2 мкм). Шероховатость поверхности алмаза повторяет шероховатость кремниевого шаблона.

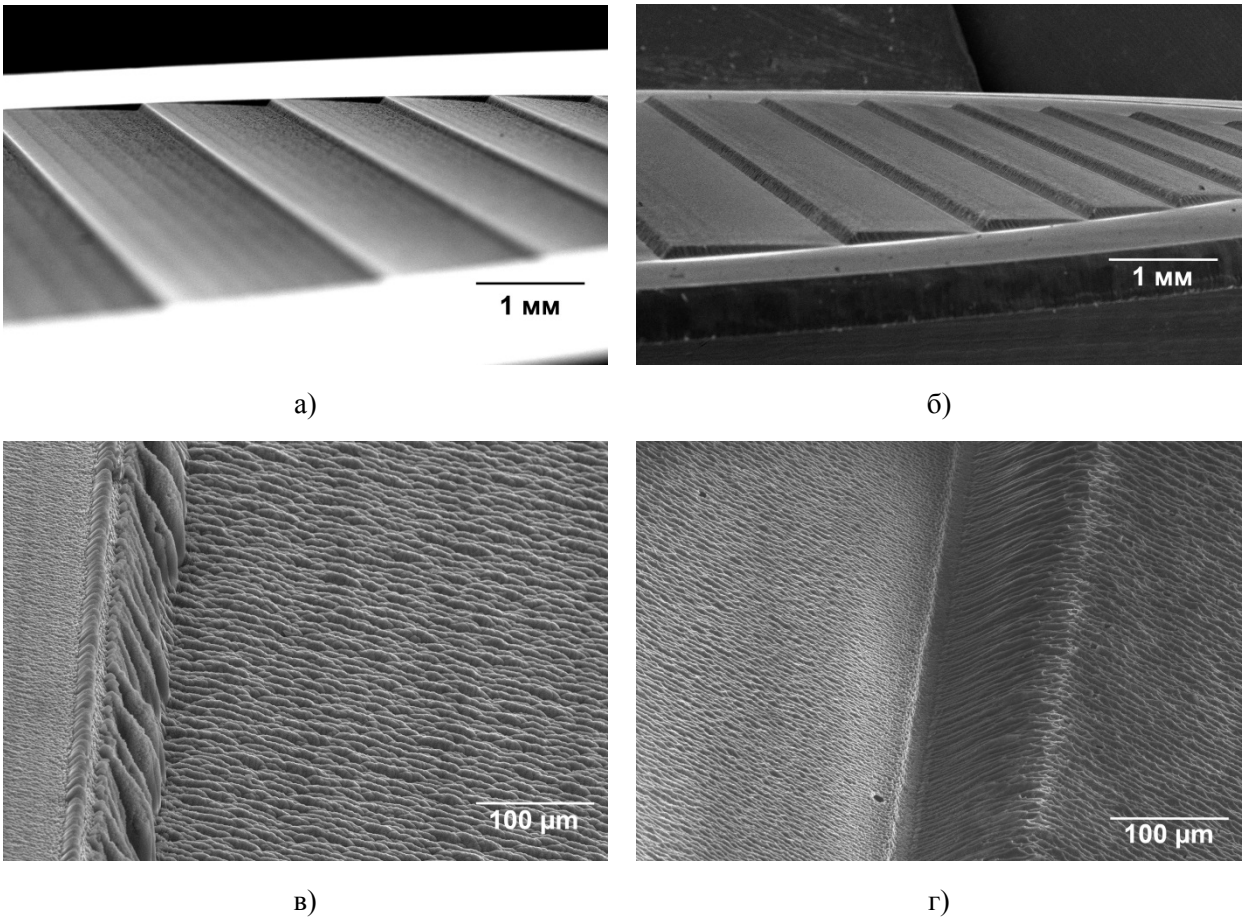
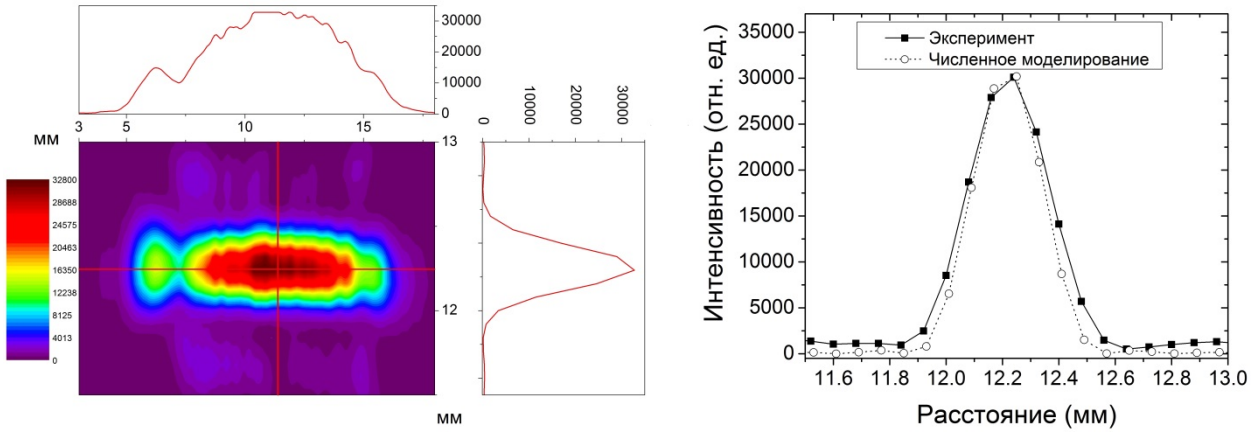


Рис. 2. РЭМ-изображение кремниевого шаблона (а) и выращенного на нем алмаза (б); РЭМ-изображение ступеньки между соседними зонами Френеля на кремниевом шаблоне (в) и алмазной линзе (г)

Исследование оптических свойств линзы проводилось с помощью Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) с длиной волны 141 мкм и средней мощностью около 50 Вт, что соответствует пиковой мощности около 100 кВт при импульсе 100 пс [16]. Гауссов диаметр пучка составлял 22 мм и немного превышал апертуру линзы (20 мм). Поэтому была использована проекционная схема [17] для измерения распределения интенсивности, чтобы уменьшить потери энергии на дифракцию. Для регистрации изображений использовалась камера Pyrocam IV (Ophir Spiricon) на основе пироэлектрического сенсора 320×320. Двумерное распределение интенсивности пучка, прошедшего через линзу, записывалось на разных расстояниях от линзы для точного определения положения сфокусированной перетяжки луча. Минимальный размер сфокусированного лазерного пятна был найден на расстоянии 41 ± 1 мм от линзы, что хорошо согласуется с расчетным фокусным расстоянием 40 мм. Распределение интенсивности в фокальной плоскости, а также два ортогональных сечения при максимальной интенсивности показаны на рис. 3, а. Вертикальные и горизонтальные сечения могут быть точно аппроксимированы функциями Гаусса с полуширинами на

уровне $1/e^2$ w = 0,21 и 6 мм соответственно. Из-за уменьшения изображения с коэффициентом 0,63 реальные значения w были больше и составляли 0,33 и 9,5 мм. На рис. 3, б экспериментальный профиль интенсивности (вертикальный) сравнивается с результатом численного расчета для безаберрационной цилиндрической линзы с теми же параметрами. Для численного расчета распределения интенсивности использовался пакет программ WaveThruMasks, созданный в среде Matlab для расчета дифракции на серии амплитудно-фазовых масок [18]. Моделирование проводилось для распространения луча с гауссовым распределением интенсивности (w = 11 мм в соответствии с реальным размером) через цилиндрическую линзу в приближении скалярной дифракции. Численный расчет дает аналогичное распределение интенсивности в центральной части. Видно довольно хорошее соответствие между измеренным и смоделированным распределением интенсивности. Разница в ширине на полувысоте теоретического и экспериментального профилей составляет около 0,03 мм, что меньше пространственного разрешения пирокамеры (0,08 мм). Суммарная мощность в фокальной плоскости XY рассчитывалась путем интегрирования интенсивности пучка, представленной на рис. 3, а. Дифракционная эффективность линзы оценивалась по отношению мощности в фокальной плоскости
к мощности, прошедшей через линзу, и составила значение 95±5 %.



а) б)

Рис. 3. Распределение интенсивности в фокальной плоскости с двумя ортогональными сечениями (а); сравнение экспериментального профиля интенсивности (черные метки со сплошной линией) и рассчитанного профиля (светлые метки с прерывистой линией) (б)

Заключение

Продемонстрирована возможность создания алмазных ДОЭ для терагерцового диапазона с использованием метода лазерной репликации. Фокусирующая способность изготовленной дифракционной цилиндрической линзы оценивалась путем измерения перетяжки сфокусированного гауссова пучка с помощью Новосибирского лазера на свободных электронах на длине волны λ=141 мкм. Минимальный размер лазерного пятна был найден на расстоянии 41 ± 1 мм от линзы, что хорошо согласуется с расчетным фокусным расстоянием 40 мм. Дифракционная эффективность линзы оказалась близкой к 100 %. Предложенный подход может быть применен для изготовления более сложных высокоэффективных алмазных ДОЭ для управления мощным излучением терагерцового диапазона.

Благодарность

Работа выполнена на уникальной установке «Новосибирский лазер на свободных электронах» с использованием оборудования «Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения».

Список источников

[1] *Sukhadolau A.V., Ivakin E.V., Ralchenko V.G. et al.* Thermal conductivity of CVD diamond at elevated temperatures // Diamond and related materials. 2005. Vol. 14 (3–7). P. 589–593.

[2] *Parshin V.V., Ralchenko V.G., Konov V.I.* 23th Int. Conf. on IR & MM Waves. Colchester: England. 1998.

[3] *Thumm M.* Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42 (3). P. 590–599.

[4] *Pavelyev V.S., Soifer V.A., Golovashkin D.L. et al.* Diamond diffractive optical elements for infrared laser beam control // Proceedings of the SPIE. 2004. Vol. 5456. P. 209–219.

[5] *Кононенко В.В., Конов В.И., Павельев В.С. и др.* Алмазная дифракционная оптика для CO2-лазеров // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 1. С. 9–10.

[6] *Pavelyev V.S., Soifer V.A., Kazanskiy N.L. et al.* Synthesis and investigation of diamond diffractive optical elements // Proceedings of the SPIE 2006. Vol. 6290. P. 97–105.

[7] *Комленок М.С., Володкин Б.О., Князев Б.А. и др.* Создание линзы Френеля терагерцевого диапазона с многоуровневым микрорельефом методом фемтосекундной лазерной абляции // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 10. С. 933–936.

[8] *Pavelyev V.S., Komlenok M.S., Volodkin B.O. et al.* Fabrication of high-effective silicon diffractive optics for the terahertz range by femtosecond laser ablation // Physics Procedia. 2016. Vol. 84. P. 170–174.

[9] *Тукмаков К.Н., Комленок М.С., Павельев В.С. и др.* Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевого фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 6. С. 941–946.

[10] *Komlenok M.S., Kononenko T.V., Konov V.I. et al.* Silicon diffractive optical element with piecewise continuous profile to focus high-power terahertz radiation into a square area // JOSA B. 2021. Vol. 38 (8). P. B9–B13.

[11] *Minkevičius L., Indrišiūnas S., Šniaukas R. et al.* Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon // Optics letters. 2017. Vol. 42 (10). P. 1875–1878.

[12] *Кононенко Т.В., Пивоваров П.А., Хомич А.А. и др.* Влияние поглощающего покрытия на абляцию алмаза лазерными ИК импульсами // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 3. С. 244–250.

[13] *Smedley J., Bohon J., Wu Q., Rao T.* Laser patterning of diamond. Part I. Characterization of surface morphology // Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105 (12). Art. no. 123107.

[14] *Головашкин Д.Л., Досколович Л.Л., Казанский Н.Л. и др.* Дифракционная компьютерная оптика. М.: Физматлит, 2007. 736 с.

[15] *Kononenko T.V., Sovyk D.N., Pivovarov P.A. et al.* Fabrication of diamond diffractive optics for powerful CO2 lasers via replication of laser microstructures on silicon template // Diamond and Related Materials. 2020. Vol. 101. Art. no. 107656.

[16] *Kulipanov G.N. et al.* Novosibirsk Free Electron Laser-Facility Description and Recent Experiments // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. Vol. 5. P. 798–809.

[17] *Kononenko T.V., Knyazev B.A., Sovyk D.N.* Silicon kinoform cylindrical lens with low surface roughness for high-power terahertz radiation // Optics & Laser Technology. 2020. Vol. 123. Art. no. 105953.

[18] *Kameshkov O.E., Knyazev B.A.* Simulating diffraction on a series of amplitude-phase masks for experiments at the Novosibirsk free electron laser // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83. P. 184–189.

Diamond diffractive optics of terahertz range

M.S. Komlenok[1], T.V. Kononenko[1], V.S. Pavelyev[2], B.A. Knyazev, G.A. Komandin[1], V.G. Ralchenko[1], V.I. Konov[1]

[1] *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[2] *Samara National Research University, Samara, Russia*

Increasing the radiation power of terahertz sources requires the development of new optics. In this work, a laser-assisted replication method is proposed for the fabrication of a diamond cylindrical diffractive lens with a continuous profile for the terahertz range. The procedure involves the inverted structuring of a silicon substrate by laser ablation for its subsequent replication on the diamond surface by chemical vapor deposition technique. Testing of the fabricated lens carried out using a free-electron laser at the wavelength of 141 μm has demonstrated high diffraction efficiency of the lens (95±5 %) and a good agreement between the measured and calculated intensity distribution in the focal plane.

Keywords: *diamond, laser ablation, diffractive optical elements*

Процессы структурирования высокоразрешающих материалов, свойства и применение структурированных элементов

Н.Д. Ворзобова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Обобщены результаты исследований процессов микро- и наноструктурирования в объеме и поверхности высокоразрешающих фотополимерных и галогенсеребряных материалов методами голографии и литографии, достигнутые свойства периодических структур различных типов, элементов с произвольной формой поверхности и возможности применений для решения задач дифракционной оптики, защищенной печати, солнечной энергетики, 3D-печати.

Ключевые слова: *структурирование материалов в периодическом световом поле, свойства и применение объемных и поверхностных структур*

Введение

Существует множество подходов к методам микро- и наноструктурирования и материалам для их реализации. В данной работе рассмотрены особенности методов и свойств, относящихся к структурам в высокоразрешающих галогенсеребряных и фотополимерных материалах.

Результаты

Применительно к галогенсеребряным материалам рассмотрены особенности голографической записи в интерференционном поле импульсным излучением. Наибольшее внимание уделено влиянию временных характеристик импульсного излучения на свойства структур и определены условия получения характеристик, соизмеримых с характеристиками, получаемыми при записи непрерывным излучением.

Для фотополимерных материалов рассмотрены особенности процессов структурирования в периодическом световом поле методами литографии и голографии. Выявлено позитивное влияние процессов кислородного ингибирования и самоорганизации на характеристики структур.

Определены условия получения в фотополимерах голографических характеристик и свойств наноразмерных периодических структур различных типов, необходимых для решения актуальных практических задач [1–3]. Полученные дифракционные и селективные свойства структур, обеспечивают возможность увеличения углового диапазона падающего излучения [2, 3] для решения задач солнечной энергетики, а также получения смесителей лазерных пучков с различными длинами волн.

Рассмотрены процессы голографического формообразования в объеме фотополимерного материала. Отличием и преимуществом предлагаемого метода [1] относительно аддитивных технологий 3D печати является возможность одноэкспозиционного формирования элементов с произвольной формой и микроструктурирования большого поля.

Заключение

Обобщены результаты исследования процессов формирования и свойств структур различных типов. Показана возможность использования установленных свойств для получения структурированных элементов для решения актуальных практических задач солнечной энергетики, дифракционной оптики, защищенной печати, 3D печати.

Список источников

[1] *Vorzobova N., Sokolov P.* Application of photopolymer materials in holographic technologies // Polymers. 2019. Vol. 11. № 12. Art. no. 2020.

[2] *Vorzobova N., Sokolov P.* Properties of holographic elements based on periodic structures in a wide range of angles of incidence // Photonics. 2021. Vol. 8. № 12. Art. no. 562.

[3] *Vorzobova N., Sokolov P.* Formation and properties of volume and relief holographic gratings in photopolymer materials // J. Opt. Technol. 2023. Vol. 90. № 3. Art. no. 114.

Processes of structuring high-resolution materials, properties and application of structured elements

N.D. Vorzobova

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The report summarizes the results of study of micro- and nanostructuring processes in the volume and surface of high-resolution photopolymer and silver halide materials using holography and lithography methods, the achieved properties of periodic structures of various types, elements with arbitrary surface shapes; the possibilities of applications for solving problems in diffraction optics, protective printing, solar energy and 3D printing.

***Keywords**: structuring of materials in a periodic light field, properties and application of volume and surface structures*

Развитие метода контроля формы крупногабаритных асферических зеркал на основе применения цилиндрических рельефно-амплитудных синтезированных голограммных оптических элементов

А.В. Лукин, А.Н. Мельников

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

В докладе обсуждаются перспективные направления развития метода контроля формы крупногабаритных асферических зеркал оптических телескопов на основе использования цилиндрических синтезированных голограммных оптических элементов, и в этих целях предлагаются пути совершенствования и специализации делительной машины маятникового типа.

Ключевые слова: *метод контроля формы, крупногабаритное асферическое зеркало, цилиндрический синтезированный голограммный оптический элемент, делительная машина маятникового типа, полимерная пленка, рельефно-амплитудная синтезированная голограмма, сшивка интерферограмм*

В настоящее время в мире функционируют, создаются и находятся на стадии проектирования порядка десяти крупногабаритных оптических телескопов наземного и космического базирования. Для обеспечения наилучшего углового разрешения телескопов сформировалась тенденция увеличения светового диаметра их главных зеркал (ГЗ). Диапазон световых диаметров ГЗ составляет от 8 до 100 м. ГЗ указанных размеров могут быть изготовлены лишь как составные [1–9]. Следует отметить, что наиболее сложным из всех имеющихся и создаваемых в настоящее время в мире по форме с точки зрения обеспечения контроля и формообразования является составное вогнутое параболическое ГЗ космической обсерватории «Миллиметрон» диаметром 10 м [1, 10]. В то же время методы и аппаратура контроля формы крупногабаритных составных ГЗ и выпуклых составных вторичных зеркал не «поспевают» за ростом их габаритов и ограничены по своим техническим возможностям. Это становится сдерживающим фактором и одновременно актуальной проблемой для обеспечения полноценного контроля формы крупногабаритных составных зеркал [11–15].

Известен метод контроля формы заданного профиля асферической поверхности (АП) с помощью цилиндрического синтезированного голограммного оптического элемента (ЦСГОЭ) [16] как одномерного аналога кругового синтезированного голограммного оптического элемента [17].

Для развития этого метода в части решения указанной проблемы контроля формы крупногабаритных составных зеркал с АП было предложено использовать крупноформатные ЦСГОЭ на стеклянных подложках с возможностью их прецизионного реплицирования [18–21]. Причем было показано, что единственно возможным технологическим оборудованием для изготовления крупноформатных ЦСГОЭ является делительная машина маятникового типа (ДММТ) [22–25] как по обеспечению принципиально неограниченной ширины нарезки дифракционных структур ЦСГОЭ необходимой точности, так и по высокой производительности. Лазерно-голографический контроль формы крупногабаритного составного зеркала с АП при помощи ЦСГОЭ (оригинала или реплики) должен производиться в его нескольких заданных сечениях, а результаты расшифровки интерферограмм должны «сшиваться» для воссоздания полноразмерной формы контролируемого зеркала.

Для обеспечения контроля формы составного вогнутого параболического ГЗ космической обсерватории «Миллиметрон» предлагается этот же лазерно-голографический метод со следующими новациями:

— использовать относительно узкую металлизированную полимерную пленку длиной порядка 10 м в качестве подложки пропускающего ЦСГОЭ;

— ДММТ оснастить двумя бобинами (подающей и принимающей) для подачи металлизированной полимерной пленки в зону нарезки дифракционной структуры пропускающего ЦСГОЭ и последующего ее приема;

— изготавливаемый пропускающий ЦСГОЭ будет представлять собой рельефно- амплитудную синтезированную голограмму, которая характеризуется технологической простотой изготовления;

— на самой металлизированной полимерной пленке предварительно изготовить контрольные полосы (штрихи) в более ускоренном режиме для обеспечения более точного контроля погрешности нанесения дифракционной структуры пропускающего ЦСГОЭ, прецизионная система измерений подачи металлизированной полимерной пленки должна быть разработана в рамках отдельной НИОКР;

— система привода подачи металлизированной полимерной пленки также должна быть разработана в рамках отдельной НИОКР.

Далее использовать своеобразные «пяльцы» для закрепления 10-тиметрового изготовленного пропускающего ЦСГОЭ в лазерно-голографическом устройстве контроля формы. Контроль профиля ГЗ провести в нескольких его сечениях (трех – шести) и выполнить «сшивку» результатов расшифровки полученных интерферограмм профилей, восстановив таким образом полноразмерную форму исследуемого ГЗ.

Список источников

[1] Астрокосмический центр ФИАН // Космическая обсерватория «Миллиметрон». URL: http://millimetron.ru (дата обращения 29.05.2025).

[2] The European Southern Observatory // Extremely Large Telescope. URL: https://elt.eso.org (дата обращения 29.05.2025).

[3] The European Southern Observatory // OWL 100-m telescope: OWL Blue Book.
URL: https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/owl/ Phase_A_Review.html (дата обращения 29.05.2025).

[4] *Сычев В.В., Касперский В.Б., Машинина М.Л.* Оптическая система адаптивного 25-метрового телескопа с составным главным зеркалом из сферических сегментов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 2. С. 19–23.

[5] *Thronson H., Bolcar M.R., Clampin M. et al.* Path to a UV/optical/IR flagship: review of ATLAST and its predecessors // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 2016. Vol. 2. № 4. P. 041210-1–041210-11. https://doi.org/10.1117/1.JATIS.2.4.041210

[6] *Кириченко Д.В., Клейменов В.В., Новикова Е.В.* Крупногабаритные оптические космические телескопы // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7. С. 589–602. https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-7-589-602

[7] Сравнение диаметров главных зеркал основных крупноформатных телескопов по состоянию на март 2022 г. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/file:Comparison_optical_telescope_primary_mirrors.svg (дата обращения 29.05.2025).

[8] *Pirnay O., Bastin Ch., Lavielle V. et al.* Thirty Meter Telescope: Preliminary design of the M2 Support System and Positioner // Proceedings of SPIE. 2024. Vol. 13094. P. 130941L-1–130941L-14. https://doi.org/10.1117/12.3020199

[9] *Speet B., Kamphues F., de Vreugd J. et al.* Segmented active/adaptive thin shell mirror // Proceedings of SPIE. 2024. Vol. 13100. P. 1310043-1–1310043-7. https://doi.org/10.1117/12.3035716

[10] *Лукин А.В., Мельников А.Н., Скочилов А.Ф. и др.* О возможностях лазерно-голографического контроля процессов сборки и юстировки составного главного зеркала телескопа на примере космической обсерватории «Миллиметрон» // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 12. С. 45–49.

[11] *Карлин О.Г., Кукс В.Г., Липовецкий Л.Е. и др.* Изготовление и контроль асферической оптики. М.: ЦНИИ информации, 1980. 272 с.

[12] Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.

[13] *Ларионов Н.П.* Методы и средства контроля формы асферических поверхностей крупногабаритных и светосильных оптических элементов на основе использования осевых синтезированных голограмм: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13. Казань: КГЭУ, 2002. 178 с.

[14] *Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др.* Справочник технолога-оптика. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.

[15] *Martin H.M.* Making mirrors for giant telescopes // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 11116. P. 111160J-1–111160J-16. https://doi.org/10.1117/12.2534601

[16] *Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А.* Контроль профиля асферических поверхностей с помощью одномерных искусственных голограмм // Оптико-механическая промышленность. 1973. № 6. С. 67.

[17] *Лукин А.В.* Синтезированные голограммы и их применение в оптическом приборостроении // Межвузовский сборник «Оптическая запись и обработка информации». Куйбышев: Изд-во КуАИ, 1986. С. 5–16.

[18] *Лукин А.В., Мельников А.Н.* О возможности применения цилиндрических синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей // Прикладная оптика – 2022: XV Междунар. науч. конф.: сб. тез. СПб.: Изд-во Скифия-принт, 2023. С. 28–29.

[19] *Мельников А.Н.* Возможность применения цилиндрических осевых синтезированных голограмм для контроля формы крупногабаритных асферических поверхностей // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 9. С. 45–54.
https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023- 90-09-45-54

[20] *Ахметов М.М., Белозеров А.Ф., Балоев В.А.* Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики // Контенант. 2016. Т. 15. № 3. С. 39–42.

[21] *Лукин А.В., Мельников А.Н.* Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 10. С. 42–50. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50

[22] *Лукин А.В., Мельников А.Н.* Делительная машина для изготовления периодических штриховых структур, преимущественно дифракционных решеток (варианты) // Патент № 2130374 РФ. 1999.

[23] *Мельников А.Н.* Делительная машина маятникового типа для механического формообразования периодических штриховых структур: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2005. 207 с.

[24] *Беляков Ю.М., Лукин А.В., Мельников А.Н.* Устойчивость функционирования делительной машины маятникового типа к воздействию внешних факторов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 3. С. 23–28.

[25] *Мельников А.Н.* Технологии формообразования светосильных дифракционных оптических элементов на основе использования делительной техники маятникового типа // Фотоника. 2019. Т. 13. № 5. С. 468–475.
https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.5.468.475

Developing a shape control method for large-size aspherical mirrors based on the use of cylindrical relief-amplitude computer-generated holographic optical elements

A.V. Lukin, A.N. Melnikov

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

This report discusses promising development trends concerning the shape control of large-size aspherical mirrors of optical telescopes based on the use of cylindrical computer-generated holographic optical elements. To this end, it proposes ways of improving and specializing the pendulum-type ruling engine.

Keywords: *shape control method, large-size aspherical mirror, cylindrical computer-generated holographic optical element, pendulum-type ruling engine, polymer film, relief-amplitude computer-generated hologram, interferogram joining*

Гибкие дифракционные оптические элементы на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для оптических датчиков деформаций

М.Д. Васильев, Д.А. Синев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе показана возможность применения периодических рельефов на поверхности силиконовых пленок для определения величины и характера их деформации. Исследуемые образцы были созданы путем переноса рельефа лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур, сформированных на стальных пластинах, на силиконовые пленки методом импринт-литографии. Период таких структур составляет ~1 мкм, что позволяет формировать дифракционные картины во всем диапазоне длин волн видимого излучения. Главной особенностью полученных образцов является их гибкость и растяжимость, что позволяет предложить такие оптические элементы в качестве датчиков деформаций. В работе показаны зависимости изменения угла отклонения ±1 порядков дифракции для различных длин волн видимого диапазона при деформации дифракционных решеток на силиконе.

Ключевые слова: *дифракционные оптические элементы, ЛИППС, тензометрические датчики, датчики деформаций, импринт-литография*

В настоящее время представляет интерес расширение разнообразия устройств измерения механических деформаций для решения задач строительства, авиации и автомобильной промышленности. Наиболее распространенными сейчас являются резистивные датчики, работающие по принципу изменения сопротивления тонкого проводника при деформациях элемента, и волоконно-оптические, работающие на эффекте Брэгга. Несмотря на простоту и дешевизну самих чувствительных элементов, основной вклад в стоимость таких устройств вносят вычислительные системы, источники питания и освещения этих приборов, что значительно увеличивает стоимость их использования и ограничивает количество сфер применения высокоточных тензометрических датчиков. Помимо описанных методов также существуют и менее распространенные методы измерения деформаций, например, на основе муаровых узоров. Однако такие методы имеют низкую популярность в виду сложностей настройки оборудования и проведения измерений. В то же время существует хорошо изученный эффект дифракции света на упорядоченных элементах, например, растрированном изображении, представляющим собой периодический рельеф. В таком случае зависимость угла отклонения первых порядков дифракции будет описываться по формуле:

$$\sin\alpha = \pm\frac{\lambda}{d},$$

где α — угол первого порядка дифракции, λ — длина волны, d — период решетки. Как можно увидеть, существует взаимосвязь периода решетчатой структуры и угла дифракции. Из этого можно сделать вывод, что, измеряя величину изменения угла распространения выделенных порядков дифракции, возможно отслеживать величину деформации чувствительного элемента. Для наибольшей точности предлагаемых измерений следует максимально отделить друг от друга нулевой и первые максимумы дифракционной картины. Для этого необходимо создание высокоупорядоченных микрорельефов с периодом соизмеримым с длиной волны освещающего излучения. Предлагаемым решением такого вопроса может стать явление формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) [1]. Это явление активно изучается в последние десятилетия, в результате чего имеется большая база знаний об особенностях и механизмах формирования таких рельефов, что потенциально позволяет структурировать таким образом практически любой материал. Кроме того, отличительной особенностью ЛИППС, период которых соизмерим с длиной волны возбуждающего излучения, является простота их получения, так как не требуется прецизионной юстировки сложных оптических систем. К настоящему моменту уже проводился ряд исследований направленный на применение ЛИППС в качестве датчиков деформаций [2, 3]. Однако во всех случаях существовало значительное ограничение в виде механических свойств используемых материалов.

В настоящей работе предложен метод создания тензочувствительных оптических элементов методом переноса рельефа ЛИППС с мастер-матрицы на поверхность силиконовой пленки. Для создания мастер-матрицы была использована стальная пластина, на которой были подготовлены области ЛИППС. В качестве материала, на который осуществляется перенос рельефа используется двухкомпонентный силикон Silastic T-4, размешанный в массовом соотношении 1:10 — отвердитель: основной компонент. Образцы с равномерно распределенным по поверхности раствором по-

мещались в вакуумную камеру на 24 часа до полного затвердевания материала для удаления пузырей воздуха и более эффективного растекания силикона.

Измерения оптического тензометрического отклика полученных образцов проводились при освещении структуры диодным лазером с длиной волны 532 нм. Основываясь на характеристиках ЛИППС на мастер-матрице (период рельефа 1,0±0,3 мкм), ожидаемый угол отклонения первых максимумов дифракционной картины полученной структуры без деформации составляет 31.96° [1]. Экспериментальные результаты сходятся с теоретическими ожиданиями, из чего можно сделать вывод, что полученная на силиконовой пленке структура является отпечатком ЛИППС с мастер-матрицы. В то же время периодическая структура на поверхности силиконовой пленки демонстрирует высокую чувствительность к деформации. Ввиду малой толщины (h = 0,5 мм) силикона и его эластичности образец не требует приложения больших нагрузок для растяжения. Также важно отметить, что изменение толщины материала может позволить эффективно управлять чувствительностью к растягивающей нагрузке. На графике (рисунок) показана установленная зависимость отклонения угла первого порядка дифракции от величины удлинения образца. Чувствительность предлагаемого элемента составляет ~0,18 градусов при удлинении на 1% с формированием дифракционной картины как на отражение, так и на пропускание.

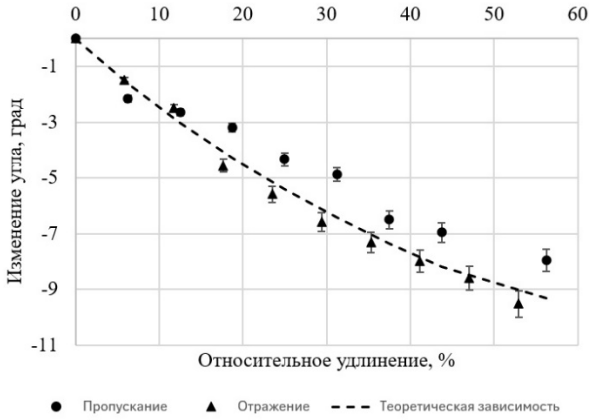


График зависимости изменения угла ±1 порядков дифракции при растяжении

Таким образом, в настоящей работе предложена и продемонстрирована возможность создания оптических тензометрических элементов с высокой чувствительностью. Предложенный метод позволяет исключить непосредственное использование источников лазерного излучения для создания каждого чувствительного элемента, так как мастер-матрица позволяет многократно создавать несколько образцов. Возможно управлять чувствительностью элементов к нагрузке, контролируя толщину образцов.

Благодарность

Финансирование исследования выполнено за счет Российского научного фонда (проект № 24-79-10230 Исследование и разработка методов цветной лазерной маркировки прозрачных материалов). Авторы благодарят канд. физ.-мат. наук Фокину Марию Ивановну и канд. техн. наук Москвина Михаила Константиновича за помощь в подготовке образцов.

Список источников

[1] *Москвин М.К. и др.* Лазерное формирование периодических структур как метод одноэтапного синтеза защитных голограмм // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 4. С. 18–34. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-18-34

[2] *Васильев М.Д. и др.* Лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры на гибких материалах как датчик деформаций // Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2025. XI Междунар. конф.: сб. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. С. 31

[3] *Gräf S. et al.* Mechano-responsive colour change of laser-induced periodic surface structures // Applied Surface Science. 2019. Vol. 471. P. 645–651. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.051

Flexible diffractive optical elements based on laser-induced periodic surface structures for optical strain sensors

M.D. Vasilev, D.A. Sinev

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The study shows the possibility of using periodic reliefs on the surface of silicone films to determine the magnitude and nature of their deformations. The samples were created by transferring the relief of laser-induced periodic surface structures formed on steel plates to silicone films using imprint lithography method. The period of such structures is ~1 μm, which allows forming diffraction patterns in the entire range of visible radiation wavelengths. The main feature of the samples is their flexibility, which allows us to propose such elements as strain sensors. This study shows the dependences of the angle of ±1 diffraction orders for different wavelengths during deformation of samples.

Keywords: *diffractive optical elements, LIPSS, strain gauges, deformation sensors, imprint lithography*

Запись волноводов в объеме плавленого кварца с помощью ультракоротких лазерных импульсов

А.Е. Рупасов, С.И. Кудряшов, А.В. Богацкая

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

В работе исследуется технология формирования оптических волноводов в плавленом кварце с использованием фемтосекундных лазерных импульсов. Описаны методики лазерной модификации материала, позволяющие создавать волноводы. Показано влияние параметров лазерного излучения (энергия, частота повторения, скорость сканирования) на геометрию и оптические свойства волноводов. Полученные результаты демонстрируют перспективность метода для создания интегральных оптических устройств, включая сенсоры и системы передачи информации.

Ключевые слова: *лазерная запись, волноводы, ультракороткие лазерные импульсы*

Введение

Ключевым применением высокопроизводительной лазерной 3D-модификации ультракороткими импульсами (УКИ) является прямая запись оптических волноводов в объеме плавленого кварца. Эта технология обеспечивает прецизионное управление параметрами импульсов (длина волны, длительность, энергия, поляризация), что позволяет наряду с волноводами создавать и другие микрооптические устройства высокой плотности внутри прозрачных твердых диэлектриков. К ним относятся «вечная» оптическая память [1–3], поляризационные элементы [4], волновые фазовые пластинки [5], цветовые микрофильтры [6], а также сложные фотонные устройства [7]. Физически, волноводы формируются на основе объемных лазерно-индуцированных модификаций, которые преимущественно изотропны. Это отличает их от двулучепреломляющих (анизотропных) модификаций, лежащих в основе поляризационных элементов, фазовых пластинок и упомянутых выше приложений [4–7], где ключевую роль играют фазовый сдвиг и интерференционно-поляризационные эффекты. Возможность трехмерной записи волноводов в плавленом кварце открывает путь к созданию объемных интегральных оптических схем. Эта технологическая платформа, в частности, стала физической основой для разработки ключевых компонентов фотонных квантовых компьютеров и других передовых процессоров, где требуется высокая стабильность и низкие оптические потери.

Экспериментальные результаты и обсуждения

Высокоинтенсивные ультракороткие лазерные импульсы (УКИ) локально модифицируют прозрачные твердые диэлектрики, формируя стабильные лазерно-индуцированные структуры. В частности, в объеме плавленого кварца была успешно реализована прямая запись оптических волноводов. Для оптимизации процесса исследовалось влияние ключевых параметров записи, таких как пиковая мощность импульса, скорость сканирования луча и частота следования импульсов, на геометрию и оптические свойства формируемых волноводных каналов. Визуализация записанных структур методом оптической микроскопии в проходящем свете наглядно демонстрирует их структуру и размеры (рис. 1), подтверждая эффективность метода УКИ-модификации для создания волноводов в кварце.

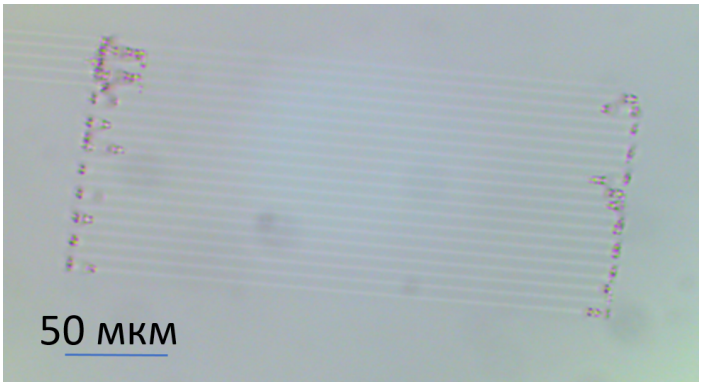


Рис. 1. Оптическое изображение волноводов, записанных в объеме плавленого кварца при одинаковых параметрах лазерного излучения

Фазовое распределение света в записанных волноводах было визуализировано с использованием интерферометра Маха — Цендера. Анализ интерферограмм выявил формирование периферийных оптических дефектов на краях волноводных структур. Возникновение данных дефектов обусловлено локальным превышением порога модификации материала, вызванным неоднородностью экспозиции. Эта неоднородность является прямым следствием ускорения и замедления подвижки образца в процессе лазерной записи, что приводит к вариациям плотности энергии импульса в начальной и конечной точках сканирования траектории (рис. 2).

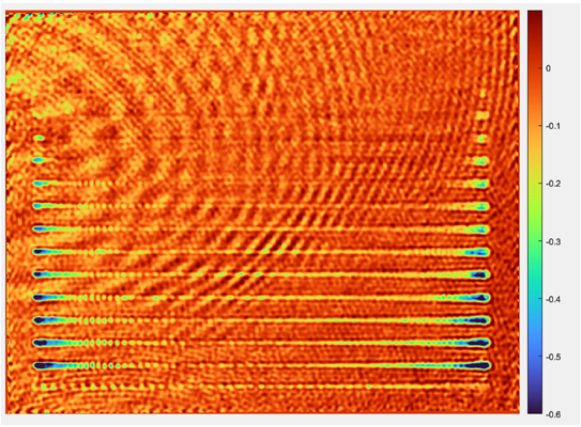


Рис. 2. Фазовая диаграмма волноводов в радианах.

Заключение

Прямая лазерная запись изотропных модификаций в объеме плавленого кварца ультракороткими импульсами представляет собой базовую технологию для создания оптических волноводов. Такие волноводы формируют основу трехмерной интегральной фотоники, обеспечивая реализацию сложных объемных оптических схем непосредственно в кварцевой подложке. Эта платформа является ключевой для разработки фотонных квантовых компьютеров и других специализированных оптических процессоров [8–10], требующих высокой стабильности среды распространения.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-72-10076).

Список источников

[1] *Wang H. et al.* 100-Layer Error-Free 5D Optical Data Storage by Ultrafast Laser Nanostructuring in Glass // Laser & Photonics Reviews. 2022. Vol. 16, iss. 4. https://doi.org/10.1002/lpor.202100563

[2] *Wang Z. et al.* 3D Imprinting of Voxel-Level Structural Colors in Lithium Niobate Crystal // Advanced Materials. 2023. Vol. 35. Iss. 47. https://doi.org/10.1002/adma.202370344

[3] *Gao J. et al.* Multi-Dimensional Shingled Optical Recording by Nanostructuring in Glass // Advanced Functional Materials. 2023. Vol. 34. Iss. 11. https://doi.org/10.1002/adfm.202306870

[4] *Shimotsuma Y. et al.* Ultrafast Manipulation of Self-Assembled Form Birefringence in Glass // Advanced Materials. 2010. Vol. 22. Iss. 36. P. 4039-4043. https://doi.org/10.1002/adma.201000921

[5] *Beresna M. et al.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 98. Iss. 20. https://doi.org/10.1063/1.3590716

[6] *Kudryashov S.I. et al.* Direct laser writing regimes for bulk inscription of polarization-based spectral microfilters and fabrication of microfluidic bio/chemosensor in bulk fused silica // Laser Physics Letters. 2022. Vol. 19. Iss. 6. Art. no. 065602. https://doi.org/10.1088/1612-202x/ac6806

[7] *Mills J.D. et al.* Embedded anisotropic microreflectors by femtosecond-laser nanomachining // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. Iss. 2. P. 196–198. https://doi.org/10.1063/1.1492004

[8] *Flamini F., Magrini L., Rab A.S. et al.* Thermally reconfigurable quantum photonic circuits at telecom wavelength by femtosecond laser micromachining // Light: Science & Applications. 2015. Vol. 4, No. 11. P. 354–354. https://doi.org/10.1038/lsa.2015.127.40

[9] *Osellame R., Hoekstra H., Cerullo G., Pollnau M. et al.* Femtosecond laser microstructuring: an enabling tool for optofluidic lab- on-chips // Laser & Photonics Reviews. 2011. Vol. 5, No. 3. P. 442–463. https://doi.org/10.1002/lpor.201000031

[10] *Stoian R. et al.* Ultrafast Laser Volume Nanostructuring of Transparent Materials: From Nanophotonics to Nanomechanics // Ultrafast Laser Nanostructuring: The Pursuit of Extreme Scales. Cham: Springer International Publishing, 2023. P. 1053–1084.

Direct Writing of Waveguides in Fused Silica Volume Using Ultrashort Laser Pulses

A.E. Rupasov, S.I. Kudryashov, A.V. Bogatskaya

Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

This work investigates the technology of fabricating optical waveguides in fused silica using femtosecond laser pulses. Material modification techniques enabling waveguide formation are described. The influence of laser parameters (pulse energy, repetition rate, scanning speed) on waveguide geometry and optical properties is demonstrated. The obtained results highlight the promise of this method for developing integrated optical devices, including sensors and information transmission systems.

***Keywords**: laser recording, birefringence, ultrashort laser pulses*

Инновационные подходы к лазерной защите металлов от химического и биологического воздействия

Е.А. Давыдова, М.А. Михалевич, Р.Р. Суслов, М.К. Москвин, Г.В. Романова

Институт лазерных технологий, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена разработке методов повышения устойчивости металлов к биообрастанию, минеральным отложениям и коррозии посредством лазерного создания микрорельефа. В рамках исследования изучено влияние лазерного воздействия при создании заданной микрогеометрии на смачиваемость материала, а также дальнейшее влияние смачиваемости и различных форм рельефа на устойчивость к разрушающим загрязнениям. Перспективность разрабатываемых методов подтверждается снижением уровня загрязнений не менее чем в 1,5 раза в сравнении с необработанным материалом.

Ключевые слова: *микроструктурирование, лазер, смачивание, биообрастание, коррозия, минеральные отложения*

Химические и биологические воздействия как образование биопленки, минеральных отложений или коррозии приводят к ухудшению работы металлических конструкций (например, уменьшение скорости корабля в ходу [1]), а также имеют негативные экономические и экологические эффекты (например, выведение системы из рабочего состояния при очистке или увеличение трат для обслуживания металлических изделий [2, 3]). Учитывая недостатки современных методов решения данных промышленных проблем (а именно большое количество технологических этапов, отсутствие исследований процессов образования данных загрязнений, а также ресурсозатратность при обработке) имеется необходимость разработки новых методов защиты металлов от химических и биологических воздействий.

В качестве тестируемых на уровень биообрастания и коррозии материалов выбраны нержавеющие стали AISI 304 и AISI 430, так как эти виды сталей широко используются в приборостроении и судостроении, в том числе при взаимодействии с агрессивными средами [4]. Для исследования минеральных отложений выбран дюралюминий АМцМ в связи с широкой распространенностью представленного сплава в сфере производства теплообменных комплексов и бытовой техники [5].

В представленной работе для проведения лазерного микроструктурирования поверхности использовался коммерческий лазерный комплекс «МиниМаркер 2» (ООО «Лазерный Центр», Россия). Система состоит из волоконного иттербиевого лазерного источника, генерирующего излучение на центральной длине волны 1,064 мкм с частотой 50-100 кГц и длительностью импульса 100 нс.

Морфология поверхности и состояние смачивания исследовались с помощью методов оптической и сканирующей электронной микроскопии, профилометрии, а также методом лежащей капли. Гидрофобизация структурированных поверхностей обеспечивалась продолжительной выдержкой на воздухе более 500 часов при нормальных условиях, а также с помощью выдержки образцов в растворе стеариновой кислоты.

Средой для проведения экспериментов по биообрастанию была выбрана морская вода из Финского залива, набранная в городе Сосновый Бор, так как в данном районе залива наиболее высокая концентрация микроорганизмов на единицу объема [6]. Оценка биообрастания определена с использованием химических индикаторов на основе резазурина и резоруфина.

Исследование степени защиты поверхности от минерального отложения производилось путем длительной выдержки образцов в агрессивной среде с жесткой водой. Среда с жесткой водой была создана посредством добавления в дистиллированную воду $CaCl_2$. В ходе эксперимента во время каждого замера контролировалась масса образцов и ее прирост из-за образования слоя минерального отложения с помощью лабораторных весов HR-250az.

При исследовании уровня коррозии металла были проведены XPS исследования в условиях сверхвысокого вакуума (UHV) 10^{-9} мбар с использованием коммерческого спектрометра «K-Alpha Thermo Scientific» с монохроматическим источником рентгеновского излучения Al Kα (1486,6 эВ).

Были определены критерии к создаваемому рельефу при устойчивости стали AISI 430 к биообрастанию:

1) Наличие гидрофобных свойств поверхности с целью снижения поверхностной энергии материала и снижения образования жидкости и питательных веществ на поверхности металла [7];

2) Минимизация шероховатости на наноуровне, что позволит уменьшить вероятность прикрепления жгутиковых микроорганизмов (менее 100 нм) и их колонизацию [8];

3) Размеры единичного элемента микрорельефа меньше, чем размеры взрослых особей микроорганизмов для меньшей площади контактов с материалом и меньшей вероятностью колонизации [9].

Данные критерии при формировании столбчатой биомиметической структуры розы снижают уровень биообрастания в 1,5–2 раза по сравнению с необработанным материалом.

Подобные столбчатые структуры при исследовании на минеральные отложения на дюралюминии АМцМ также показали устойчивость к данному типу загрязнений, что связано с гидрофобным состоянием Касси-Бакстера и, как следствие, низкой поверхностной энергией.

При лазерной обработке поверхности стали AISI 304 стойкость к питтинговой коррозии зависит от химического состава поверхностных слоев стали. Лазерное термическое воздействие на плотностях мощности, соответствующих нагреву и плавлению способно провести оксидирование и перераспределение компонентов в поверхностных слоях стали. Был сделан вывод о том, что устойчивость к питтинговой коррозии сопровождается высоким содержанием защитных Ni или NiO и низким содержанием негативно влияющего на стойкость к коррозии оксида марганца Mn_2O_3.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-00255, https://rscf.ru/project/24-79-00255/.

Список источников

[1] *Yang, W.J., Neoh K.-G., Kang E.-T. et al.* Polymer brush coatings for combating marine biofouling // Prog.Polym. Sci. 2014, Vol. 39, P. 1017−1042.

[2] *Wu Z. et al.* Review on descaling and anti-scaling technology of heat exchanger in high-salt wastewater thermal desalination // Water Science & Technology. 2023. Vol. 88. № 8. P. 2081–2107.

[3] *Zhang Y., Zhang S., Liu K.* Review on Corrosion Mechanism and Mechanical Properties Degradation of Building Structural Steel // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2024. Vol. 490. Art. no. 02012.

[4] *Moldovan E.R., Concheso Doria C., Ocaña J.L. et al.* Materials. 2022. Vol. 15 (13). Art. no. 4580.

[5] *Kawahito Y. et al.* Relationship of laser absorption to keyhole behavior in high power fiber laser welding of stainless steel and aluminum alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. № 10. P. 1563–1568.

[6] *Поляк Ю.М. и др.* Мониторинг Финского залива Балтийского моря: влияние антропогенных факторов на биогеохимические процессы в прибрежной зоне // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29. № 2. С. 99–117.

[7] *Yi P. et al.* Anti-biofouling properties of TiO_2 coating with coupled effect of photocatalysis and microstructure // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 656. Art. no. 130357.

[8] *Halder P. et al.* Engineered topographies and hydrodynamics in relation to biofouling control — a review // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. № 30. P. 40678–40692.

[9] *Филатов И.А. и др.* Возможности лазерных технологий для снижения биообрастания металлов в водной среде // Фотоника. 2022. Т. 16. № 4. С. 328–340.

Innovative solutions for laser protection of metals against chemical and biological effects

E.A. Davydova, M.A. Mikhalevich, R.R. Suslov, M.K. Moskvin, G.V. Romanova

Institute of Laser Technologies, ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The work is focused on the development of methods for increasing the resistance of metals to biofouling, mineral sediments and corrosion by creating laser microrelief. The research includes the analysis of the effect of laser treatment in the creation of a given microgeometry on the wettability of the material, as well as the further influence of wettability and various forms of relief on the resistance to destructive contamination. Prospectivity of the developed methods is confirmed by reduction of contamination level not less than 1.5 times in comparison with untreated material.

Keywords: *microstructuring, laser, wetting, biofouling, corrosion, mineral sediments*

Исследование формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на никеле при наносекундном воздействии

М.К. Москвин, Г.А. Мартиросян, Д.Д. Учанова, А.Д. Долгополов

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

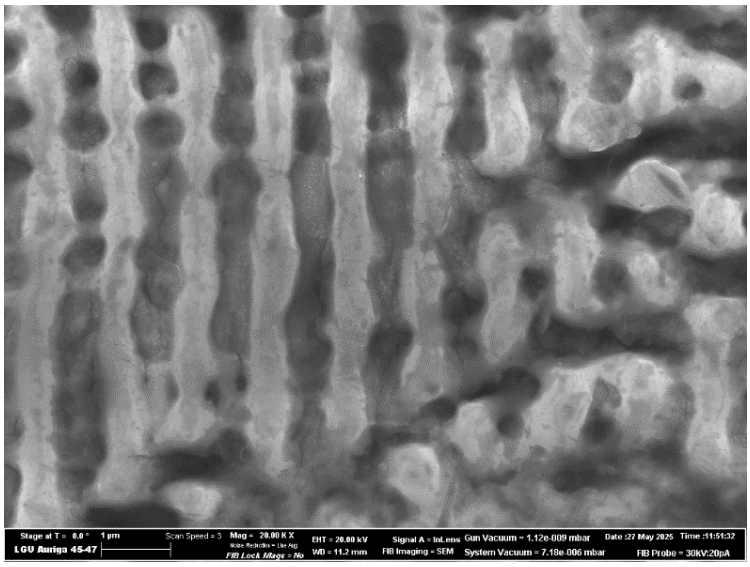
В работе исследован метод формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на массивном никеле марки НП2. Оптимизированы параметры лазерного воздействия: скорость сканирования, длительность импульса, частота повторения и энергия импульсов, для обеспечения формирования высокорегулярных рельефов с периодом в микронном и субмикронном диапазонах. Продемонстрирована возможность управления симметрией рельефа путем модуляции направления поляризации лазерного излучения в процессе сканирования. Установлена зависимость периода и высоты структур от параметров лазерной обработки.

Ключевые слова: *оптика, голография, дифракционные оптические элементы лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (липпс), дифракционная решетка, никель*

Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) на металлах является перспективным направлением лазерной обработки для создания функциональных микрорельефов, и элементов дифракционной оптики [1–3]. Первичный механизм формирования ЛИППС связан с генерацией поверхностных электромагнитных волн и их интерференцией с падающим излучением [4]. Дальнейшая эволюция структуры определяется параметрами лазерного воздействия и свойствами материала, приводящими к плавлению, абляции и окислению. Конфигурация сканирования и тип поляризации излучения определяют симметрию формируемых структур. В данной работе исследовано формирование ЛИППС на никеле марки НП2 при наносекундном лазерном воздействии.

Формирование ЛИППС было реализовано на базе системы МиниМаркер-2 (ООО «Лазерный Центр») с волоконным наносекундным лазером (IPG-Photonics), длинна волны 1064 нм, максимальная средняя мощность 20 Вт, длительность импульсов 4–200 нс, частота повторения 20–99 кГц). Перемещение пучка осуществлялось гальванометрической сканирующей системой. Фокусировка выполнялась объективом плоского поля с фокусным расстоянием 216 мм, диаметр пятна на уровне $1/e^2$ составлял 50 мкм. Для управления поляризацией использовалась система на основе призмы Глана — Тейлора, полуволновой ($\lambda/2$) и четвертьволновой ($\lambda/4$) пластин, позволяющая динамически модулировать состояние поляризации в процессе сканирования.

В результате лазерного воздействия на поверхности никеля были сформированы высокорегулярные ЛИППС. При линейной поляризации структуры ориентированы перпендикулярно направлению поляризации и имели период $\Lambda = 1{,}1 \pm 0{,}1$ мкм. На рисунке представлено СЭМ изображение сформированных структур.



СЭМ изображение поверхности никеля НП2 со сформированными ЛИППС.
Режим лазерного воздействия: $q = 1{,}5 \cdot 10^{12}$ Вт/м^2, $\tau = 4$ нс, $V = 60$ мм/с, $f = 150$ кГц

Были определены энергетические пороги формирования структур для наносекундных импульсов. Плотность мощности лазерного излучения для генерации ЛИППС находилась в диапазоне от $1{,}45 \cdot 10^{12}$ до $1{,}58 \cdot 10^{12}$ Вт/см^2, что соответствует нагреву поверхности материала от 1600 до 1800 °C. Температурный диапазон превышает температуру плавления никеля 1453 °C и ниже температуры кипения 2732 °C. Анализ элементного состава (ЭДС) выявил повышенное содержание кислорода в зоне гребней ЛИППС по сравнению с впадинами и необработанной поверхностью, что свидетельствует о ключевой роли термохимических процессов в формировании структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10230, https://rscf.ru/project/24-79-10230/.

Список источников

[1] *Hauschwitz P. et al.* LIPSS-based functional surfaces produced by multi-beam nanostructuring with 2601 beams and real-time thermal processes measurement // Scientific reports. 2021. Vol. 11. № 1. Art. no. 22944.

[2] *Zhou S. et al.* Hybrid periodic microstructures fabricated on chromium metal surface using ns-DLIP scanning combined with LIPSS // Optics & Laser Technology. 2022. Vol. 153. Art. no. 108261.

[3] *Skoulas E. et al.* Laser induced periodic surface structures as polarizing optical elements // Applied Surface Science. 2021. Vol. 541. Art. no. 148470.

[4] *Bonse J., Gräf S.* Maxwell meets Marangoni — a review of theories on laser-induced periodic surface structures // Laser & Photonics Reviews. 2020. Vol. 14. № 10. Art. no. 2000215.

Formation of laser-induced periodic surface structures on nickel via nanosecond laser exposure

M.K. Moskvin, G.A. Martirosyan, D.D. Uchanova. A.D. Dolgopolov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The study investigated a method for forming laser-induced periodic surface structures (LIPSS) on bulk nickel NP2 grade. Key laser parameters including wavelength, scanning speed, pulse duration, repetition rate, and pulse energy were optimized to achieve highly regular surface reliefs with periodicities in the micro- and submicrometr ranges. Demonstrated the ability to control the symmetry of the surface topography by dynamically adjusting the polarization direction of the laser beam during scanning. Furthermore, the period and height of the structures exhibited a strong dependence on adjustable processing parameters, such as energy density and scanning velocity.

Keywords: *laser-induced periodic surface structures (LIPSS), diffraction grating, nickel*

Шаблонный синтез для получения упорядоченных массивов магнитоплазмонных нанопроволок

Е.П. Кожина[1], С.А. Бедин[1], И.М. Долуденко[2], С.С. Косолобов[1], В.П. Драчев[1]

[1] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия
[2] Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе продемонстрированы возможности метода шаблонного синтеза для получения магнитоплазмонных наноструктур на основе биметаллических систем Ni–Ag и Ni–Au. Предлагается использовать эти структуры в качестве подложек для SERS-спектроскопии с целью детектирования органических молекул в малых концентрациях при низкой мощности возбуждающего излучения — в диапазоне нескольких микроватт. Метод обеспечивает возможность формирования чередующихся слоев с контролируемой толщиной от 10 нм. Количество слоев ограничивается общей толщиной шаблона и может составлять от 10 до 35 микрон. Перспективность таких платформ заключается в возможности контроля процесса агломерации под действием внешнего магнитного поля, что, в свою очередь, влияет на их оптические свойства и открывает возможность динамической модуляции их оптических характеристик.

Ключевые слова: *наноматериалы, шаблонный синтез, магнитоплазмонные наноструктуры, SERS*

Метод шаблонного синтеза позволяет получать калиброванные массивы наноструктур, параметры которых — такие как диаметр и периодичность — точно соответствуют геометрическим характеристикам используемого шаблона. В свою очередь, длина формируемых наноструктур задается временем осаждения и приложенным потенциалом. В качестве шаблонов наиболее часто используют пористый оксид алюминия (ААО) и трековые мембраны (ТМ). Преимущество последних заключается в возможности получения низкой плотности пор, что особенно важно для обеспечения заданных оптических свойств.

В последние годы активно развиваются исследования по синтезу многокомпонентных наноструктур [1, 2]. Оптические и механические свойства данных массивов могут контролироваться внешним магнитным полем [1]. Это открывает перспективы для создания адаптивных SERS-активных подложек с возможностью динамической настройки их плазмонных характеристик, а также для разработки сенсоров нового поколения с управляемой чувствительностью и селективностью.

Для электрохимического синтеза многокомпонентных наноструктур применяются два основных подхода: однованнный и двухваннный методы. Однованнный метод заключается в совместном осаждении ионов различных металлов из единого электролита. Данный подход обеспечивает возможность формирования биметаллических или полиметаллических наноструктур в рамках одной электрохимической ячейки без изменения состава электролита в процессе синтеза. Применение модуляции потенциала позволяет реализовать чередование тонких слоев с контролируемой толщиной от 10 нм. К числу ключевых преимуществ относятся возможность получения тонких слоев за счет быстрого переключения от осаждения одного металла к другому. Вместе с тем метод имеет свои недостатки, связанные включениями материала одного слоя в другой.

Двухваннный метод предполагает последовательное осаждение отдельных компонентов из разных независимых электролитов: после завершения формирования одного слоя электролит заменяется на другой, содержащий ионы следующего металла. Такой подход обеспечивает более высокую степень контроля над химическим составом и морфологией каждого слоя, что особенно важно при создании строго упорядоченных гетероструктур. Основными недостатками метода являются увеличенное время синтеза, риск загрязнения межфазных границ остаточными компонентами предыдущего электролита, а также большая минимальная толщина получаемых слоев, как правило, превышающая 50 нм по сравнению с однованнным методом.

В данной работе наноструктуры были изготовлены двухванновым методом с чередованием никеля-золота и никеля-кобальта. В качестве шаблона была использована полимерная трековая мембрана с диаметром пор 100 нм и поверхностной плотностью пор $1{,}2\times10^9$ см$^{-2}$. Толщина шаблона составляла 12 мкм.

Для осаждения каждого компонента использовали соответствующий электролит.

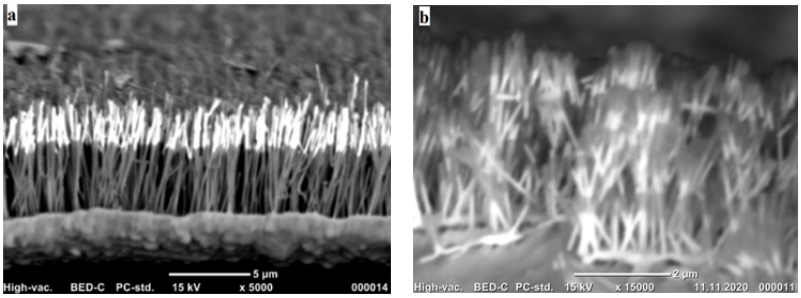
Осаждение никеля проводили с использованием электролита типа Уоттса следующего состава: сульфат никеля (II) — 300 г/л; хлорид никеля (II) — 45 г/л; борная кислота — 38 г/л. Значение pH никелевого электролита составляло 4. Электроосаждение проводили при температуре электролита 60 °C с использованием никелевого анода марки НПА1 (чистота более 99 %).

Осаждение золота проводилось с использованием коммерческого электролита для золочения. pH раствора поддерживался на уровне 9, а температура осаждения устанавливалась на уровне 70 °C. В качестве анода использовалась золотая проволока.

Осаждение серебра с использованием электролита следующего состава: $AgNO_3$ — 40 г/л, калий железосинеродистый — 40 г/л, карбонат калия — 35–40 г/л, калий роданистый — 80 г/л. Осаждение проводили при комнатной температуре. В качестве анода использовали проволоку из чистого серебра.

Осаждение каждого из металлов проводили в гальваностатическом режиме при плотности 2 мА/см^2.

После осаждения каждого слоя образец промывали в деионизованной воде и продолжали осаждение другого металла. На рисунке представлены изображения полученных структур, визуализированных с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6000 в режиме обратно рассеянных электронов. На рисунке (a) представлен вариант нанопроволок диаметром 100 нм, состоящих из двух сегментов — никеля в основании и золотой вершины. На рисунке (b) показан вариант многокомпонентной нанопроволоки с чередующимися слоями никеля и серебра с толщиной каждого слоя порядка 300 нм.



Схематическое представление многокомпонентных нанопроволок, синтезированных двухванновым методом: (a) — массив Ni-нанопроволок со слоем Au на вершине; (b) — массив нанопроволок с чередующимися слоями Ni-Ag

Таким образом, методом электрохимического шаблонного синтеза получены многокомпонентные наноструктуры на основе никеля с золотом и серебром. Реализованы два типа гетероструктур: с Au-слоем на вершине Ni нанопроволок и чередующимися слоями Ni–Ag. Показаны преимущества и ограничения однованного и двухванного методов осаждения в контексте контроля состава и морфологии. Полученные наноструктуры перспективны для применения в качестве SERS-активных подложек с возможностью управления свойствами внешним магнитным полем.

Список источников

[1] *Kozhina E.P. et al.* One-Dimensional Magneto-Optical Nanostructures: Template Synthesis, Structure, Properties, and Application in Spectroscopy Based on Plasmon Resonance // IEEE Magnetics Letters. 2022. Vol. 13. P. 1–5.

[2] *Zhigalina O.M. et al.* Structure of Cu/Ni Nanowires Obtained by Matrix Synthesis // Crystallography Reports. 2018. Vol. 63. № 3. P. 480–484.

Template synthesis for the production of aligned arrays of magneto-plasmonic nanowires

E.P. Kozhina[1], S.A. Bedin[1], I.M. Doludenko[2], S.S. Kosolobov[1], V.P. Drachev[1]

[1] *Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*
[2] *Shubnikov Institute of Crystallography, Kurchatov Complex of Crystallography and Photonics, National Research Centre "Kurchatov Institute," Moscow, Russia*

This study demonstrates the potential of template-assisted synthesis for fabricating magnetoplasmonic nanostructures based on bimetallic Ni–Ag and Ni–Au systems. The fabricated structures are proposed as highly sensitive substrates for surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), enabling the detection of organic molecules at ultralow concentrations under low-power excitation conditions — in the range of several microwatts. The method enables the formation of alternating layers with precisely controlled thicknesses down to 10 nm. The number of layers is limited by the overall thickness of the template and can vary from 10 to 35 micrometers. The potential of such platforms lies in the possibility of controlling the agglomeration process under the influence of an external magnetic field, which, in turn, affects their optical properties and opens up opportunities for dynamic modulation of these characteristics.

Keywords: *nanomaterials, template synthesis, magneto-plasmonic nanostructures, SERS*

Секция 9

Цифровая голография и методы визуализации

Регистрация и визуализация многомодового колебательного процесса методом прямого фазового восстановления во времени в цифровой голографической интерферометрии

И.В. Алексеенко, А.М. Кожевникова

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

В работе предложен метод регистрации многокомпонентного колебательного процесса с использованием техники цифровой голографической интерферометрии. Регистрация изображений объекта, который одновременно вибрировал на четырех резонансных частотах, осуществлялась в системе строгой синхронизации моментов записи голограмм на цифровую камеру с фазами исследуемого сложного колебания. Осуществлена техника сканирования колебания с малым фазовым сдвигом между экспозициями, что позволило провести дискретизацию («оптическую оцифровку») колебания и разделить отдельные частотные составляющие сложного колебательного процесса, а также визуализировать такие составляющие через алгоритм прямого фазового восстановления (temporal phase-unwrapping).

Ключевые слова: *цифровая голографическая интерферометрия, оптический неразрушающий контроль, исследование динамических процессов*

Введение

Динамические процессы различного характера проявляются в поведении многих механических систем и могут существенно влиять на их функциональные характеристики, увеличивать амортизацию и нагрузки и, как следствие, приводить к разрушению таких систем. К подобного рода динамическим процессам можно отнести многокомпонентные колебания на нескольких резонансных частотах. В работе предложен метод цифровой голографической интерферометрии, позволяющий зарегистрировать серию голограмм вибрирующего одновременно на четырех резонансных частотах объекта. Регистрация голограмм сфокусированного изображения осуществлялась как процесс сканирования вдоль исследуемого колебания. После обработки массива голограмм проведено выделение отдельных частотных компонент и визуализация их во времени.

Метод и техника эксперимента

Первичная голограмма как результат интерференции объектного и опорного полей регистрируется на матрицу цифровой камеры. Применение двойного Фурье-преобразования позволяет рассчитать разность фаз для двух состояний объекта $\varphi_{H1}(x,y)$ и$\varphi_{H2}(x,y)$ под действием вибраций по формуле [1]

$$\Delta\varphi(x,y) = arg\left[e^{-i\left(\varphi_{H2}(x,y)-\varphi_{H1}(x,y)\right)}\right]. \quad (1)$$

При этом связь между разностью фаз и величиной перемещения точек объекта определяется выражением [2]

$$\Delta\varphi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda}\boldsymbol{KL}, \quad (2)$$

где $\boldsymbol{K}$ — вектор чувствительности, $\boldsymbol{L}$ — вектор перемещения. При регистрации серии голограмм можно восстановить разность фаз как функцию во времени для отдельной точки объекта. При этом рассчитанная фазовая последовательность лежит в пределах [–π, π]. Если за время регистрации фаза меняется в пределах [–π, π] k — число раз, то общее изменение фазы от начального ее состояния до конечного составит $\Delta\phi + 2\pi k$ [3, 4]. Таким образом, можно восстановить функцию перемещения для каждой точки объекта во времени, а затем использовать метод Фурье-анализа уже для одномерного сигнала с целью выделения отдельных частотных составляющих. Такая процедура проводится для всех точек объекта. Обратное преобразование Фурье позволяет восстановить отдельные пространственные моды многочастотного колебательного процесса и визуализировать их в динамике.

Результаты экспериментальной работы

Комплекс цифрового голографического интерферометра состоял из следующих основных частей: лазер непрерывный Verdi V-18 с длиной волны излучения 532 нм, исследуемый объект — стальной диск диаметром 200 мм, толщиной 1,5 мм, система возбуждения механических колебаний (генератор, электромагнитный возбудитель, датчик контроля вибраций), компьютер, включающий плату сбора видео-

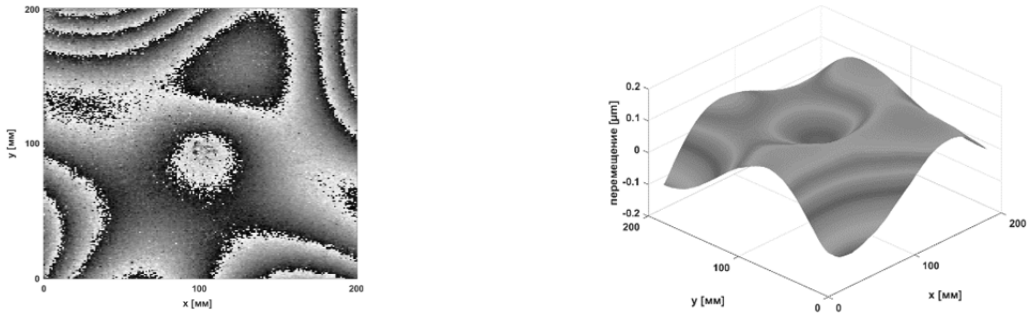
данных и многофункциональные платы ввода/вывода для управления и контроля процессами регистрации и измерения, ПЗС-камера марки Pulnix (1425-CL) с разрешением 1000×1000 пикселей и временем экспозиции 125 мкс. Диск возбуждался одновременно на четырех резонансных частотах: 164 Гц, 384 Гц, 660 Гц и 721 Гц. Регистрация голограмм осуществлялась через систему взаимной синхронизации камеры и сигнала с датчика колебаний. При этом каждая голограмма регистрировалась через 1 с + 0,02 мс. Таким образом осуществлялся фазовый сдвиг момента регистрации изображения относительно фазы колебания, а само колебание сканировалось во времени. Регистрировалось около 1000 изображений в течение 15 минут. Полученные из голограмм данные обрабатывались, а отдельные моды многочастотного колебания разделялись и визуализировались.

На рис. 1, (а) представлена разность фаз составного колебания объекта, на рис. 1, (б) и его трехмерная визуализация.

(а) (б)

Рис. 1. Результат измерений колебаний объекта на четырех частотах:
разность фаз составного колебания объекта (а); трехмерная визуализация колебания (б)

На рис. 2, (а) продемонстрированы разность фаз для чистой формы колебания на частоте 660 Гц и на рис. 2, (б) — трехмерное представление такого колебания, выделенное из сложного колебательного процесса.



(а) (б)

Рис. 2. Результат измерений колебаний объекта для частоты колебания 660 Гц: (а) распределение для чистой формы в 660 Гц; (б) трехмерная визуализация колебания 660 Гц, восстановленное из сложного колебательного процесса

Заключение

Предложенный метод позволяет проводить прямое наблюдение и измерение колебательных процессов, а также демонстрирует возможность выделения отдельных мод колебаний многокомпонентных вибраций. Реализована возможность динамической визуализации таких процессов во времени.

Благодарность

Статья подготовлена в рамках гранта РНФ № 23-79-00023 «Оптический неразрушающий контроль и диагностика первой стенки ТОКАМАК-реакторов с использованием метода двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии и системы лазерного сканирования».

Список источников

[1] *Takeda M. et al.* Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry // Journal of the Optical Society of America. 1982. № 76. P. 156–160.

[2] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 85 с.

[3] *Huntley J.M. et al.* Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis // Applied optics. 1993. Vol. 32. № 17. P. 3047–3052.

[4] *Pedrini G. et al.* Temporal phase unwrapping of digital hologram sequences // Applied optics. 2003. Vol. 42. № 29. P. 5846–5854.

Acquisition and visualization of a multimode oscillation with temporal phase-unwrapping by digital holographic interferometry

I. Alekseenko, A. Kozhevnikova

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

The based on digital holographic interferometry technique method for multimode oscillations is proposed in the report. Acquisition of images corresponding the object, which simultaneously vibrated at four- resonant frequencies, was performed with a strictly mutual synchronization of digital camera grabbing procedure and the phases of the investigated multimode-frequency oscillation. The technique of scanning the oscillation with a fine phase shift between image grabbing allows sampling ('optical digitization') of the vibration and separating frequency modes of the oscillatory process, as well as to visualize them through the temporal phase-unwrapping algorithm.

Keywords: *digital holographic interferometry, optical-nondestructive testing, dynamic events research*

Исследование амплитудно-фазовой поляризационной анизотропии пленок ZnO:Ag методом цифровой голографии

А.В. Черных[1], В.Р. Гресько[1], А.С. Езерский[1, 2], Т.В. Резцов[1], Е.Г. Циплакова[1, 2], М.М. Сергеев[1], Н.В. Петров[1, 3]

[1] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Харбинский инженерный институт, Харбин, Китай*
[3] *Харбинский политехнический институт, Харбин, Китай*

Предложен поляризационный голографический микроскоп на основе интерферометра Маха-Цендера, включающий призму Волластона и матричный поляризационный детектор. Микроскоп позволяет регистрировать полное состояние оптического векторного поля, формируемого анизотропными образцами, в режиме однократной экспозиции. Проведены исследования амплитудно-фазовой поляризационной спектральной анизотропии пленок ZnO:Ag, которые были обработаны с различными углами линейной поляризации фемтосекундного излучения с длиной волны 515 нм.

Ключевые слова: *цифровая голографическая микроскопия, поляризация, количественная фазовая визуализация, лазерная обработка, ZnO:Ag пленки*

Введение

Цифровая голографическая микроскопия — эффективный метод быстрой количественной фазовой визуализации прозрачных и отражающих образцов [1]. Однако при исследовании анизотропных материалов, обладающих свойствами двулучепреломления и поляризационной чувствительности, традиционные голографические подходы могут приводить к неполной или искаженной оценке их оптических характеристик. В данной работе представлен цифровой поляризационный голографический микроскоп, позволяющий восстанавливать амплитудно-фазовое распределение светового поля, формируемого образцом, при освещении его двумя ортогональными линейно-поляризованными волнами [2]. Это обеспечивает восстановление полного векторного поля, включая информацию о поляризационной анизотропии. В качестве демонстрации возможностей микроскопа было проведено исследование спектральной поляризационной анизотропии тонких пленок ZnO:Ag, которые обладают относительно небольшой поляризационной восприимчивостью — амплитудная модуляция составляет порядка 10 % [3].

Экспериментальная установка

После лазерной обработки фемтосекундными импульсами пленки ZnO с наночастицами серебра начинают проявлять спектральную анизотропию. Причем максимумы наблюдаются в синей (450–500 нм) и красной (650–700 нм) областей видимого спектра [3]. Для получения полной поляризационно-фазовой информации об особенностях этих пленок проводились измерения обработанных образцов с помощью поляризационного голографического микроскопа при последовательном освещении на трех длинах волн: 450, 532 и 650 нм. Принципиальная схема разработанного микроскопа показана на рис. 1. Одной из особенностей работы микроскопа заключается в использовании двух взаимно некогерентных линейно-поляризованных источников лазерного излучения. Такой подход позволяет освещать образец двумя пучками с ортогональными состояниями поляризации, а также избегать необходимости вращения положения образца или направления плоскости поляризации пучка в объектном плече. Вторая особенность микроскопа — это использование призмы Волластона, установленной в опорном плече интерферометрической схемы, которая позволяет пространственное разделение взаимно-некогерентных пучков в частотной области Фурье-спектра при обработке цифровых голограмм. Четыре голограммы регистрировались с помощью поляризационного матричного фотодетектора FLIR BFS-U3-51S5P-C, где над каждым квадрантом пикселей камеры расположен линейный микрополяризатор с соответствующим направлением поворота на 0, 45, 90 и 135°. По полученным четырем голограммам проводилось восстановление матрицы Джонса обработанных пленок ZnO:Ag в поле зрения микроскопа.

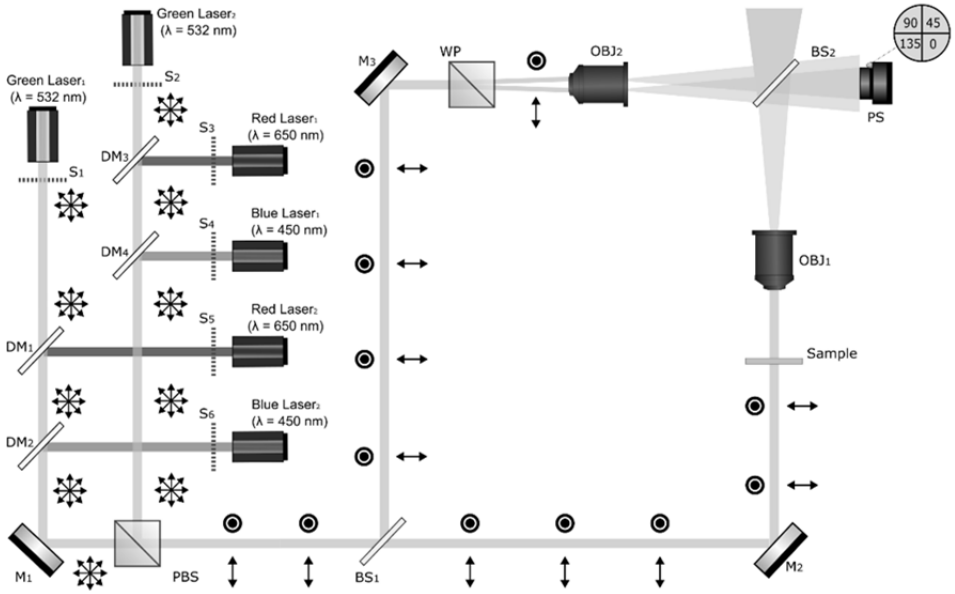
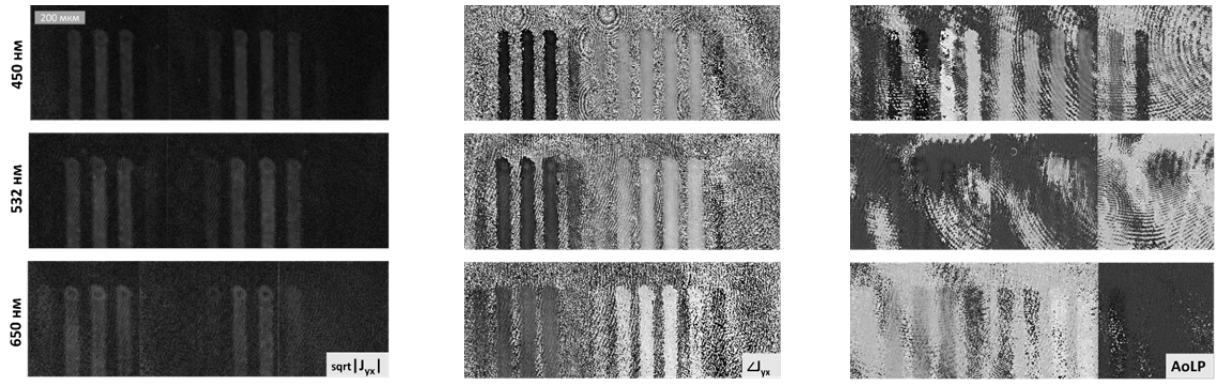


Рис. 1. Принципиальная схема поляризационного голографического микроскопа: Laser —лазерный модуль, S — затвор, M — зеркало, DM — дихроичное зеркало. BS — светоделитель. PBS — поляризационный, WP — призма Волластона, S — образец, OBJ — объектив, PS — поляризационный сенсор

Результаты

Предварительно, на образце пленки ZnO:Ag под действием линейно-поляризованного фемтосекундного излучения с длиной волны 515 нм были записаны треки с шириной 40 мкм. Треки формировались при различных углах плоскости поляризации: 90, 80, 70, 60, 50, 45, 40, 30, 20, 10, 0 ° относительно горизонтальной оси правосторонней системы координат. Результаты восстановления комплексного поля из голограмм представлены на рис. 2.



а) б) в)

Рис. 2. Распределения амплитуды и фазы компоненты J_{yx} и угла линейной поляризации на трех длинах волн (450, 532 и 650 нм) обработанных полос пленок ZnO:Ag: а) квадратный корень амплитуды компоненты J_{yx}; б) фаза компоненты J_{yx} в диапазоне (–π, π); в) вычисленный угол линейной поляризации (–π/2, π/2)

На рис. 2, а) представлены восстановленные распределения квадратного корня амплитуды компоненты J_{yx} матрицы Джонса для длин волн 450, 532 и 650 нм. Данная компонента соответствует изображению, формируемому в конфигурации скрещенных поляризаторов (линейный горизонтальный поляризатор перед образцом и линейный вертикальный — после образца). Отметим, что в разработанном микроскопе регистрация голограмм в скрещенных поляризаторах не производится напрямую — компонента J_{yx} вычисляется путем обработки двух голограмм, зарегистрированных при ориентации поляризаторов под углами 45 ° и 135 °. На рис. 2, б) показаны соответствующие фазовые распределения, на которых уже видны сдвиги фазы для различных длин волн регистрации и направлений поляризации излучения обработки.

Полученные матрицы Джонса дают полную информацию об образце, на их основе можно выделить различные поляризационные эффекты и преобразования оптического поля. При прохождении деполяризованного излучения обработанные области увеличивают степень линейной поляризации света. В случаях прохождения деполяризованного света на длинах волн 450 и 650 нм наблюдается поворот угла линейной поляризации в зависимости от направления поляризации излучения обработки, как показано на рис. 2, в). При прохождении же деполяризованного света с длиной волны 532 нм, напротив, обработанные пленки не обладают выраженной степенью и углом линейной поляризации излучения.

Заключение

Разработанный поляризационный голографический микроскоп обеспечивает возможность количественного исследования поляризационно-зависимых эффектов, возникающих при воздействии интенсивного короткоимпульсного лазерного излучения на пленки ZnO с наночастицами серебра. Микроскоп может быть совмещен с системой лазерной обработки для контролируемой модификации свойств материалов.

Восстановление матриц Джонса обработанных пленок ZnO:Ag позволяет численно моделировать их воздействие на оптическое поле и определять оптимальные конфигурации для контролируемой модификации пленок. Анализ полученных матриц Джонса выявил способность этих пленок поляризовать проходящее деполяризованное излучение в синей и красной областях видимого спектра. Эти результаты согласуются с данными предыдущих поляризационно-спектральных исследований [3].

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания (№ FSER-2025-0007).

Список источников

[1] *Wang Z. et al.* Digital holography as metrology tool at micro-nanoscale for soft matter // Light: Advanced Manufacturing. 2022. Vol. 3. № 10.

[2] *Reztsov T.V. et al.* Dynamic analysis of toron formation in chiral nematic liquid crystals using polarization holographic microscope // Polymers. 2025. Vol. 17. № 13. Art no. 1849.

[3] *Гресько В.Р. и др.* Фемтосекундная лазерная модификация золь-гель пленок ZnO:Ag с проявлением дихроизма // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 155. № 3. С. 384–398.

Study of amplitude-phase polarization anisotropy of ZnO:Ag films by digital holography

A.V. Chernykh[1], V.R. Gresko[1], A.S. Ezerskii[1, 2], T.V. Reztsov[1], E.G. Tsiplakova[1], M.M. Sergeev[1], N.V. Petrov[1, 3]

[1] *ITMO University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *Harbin Engineering University, Harbin, China*
[3] *School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China*

A polarization holographic microscope based on a Mach-Zehnder interferometer, including a Wollaston prism and a matrix polarization detector, is proposed. The microscope allows recording the full state of the optical vector field formed by anisotropic samples in a single exposure mode. The amplitude-phase polarization spectral anisotropy of ZnO:Ag films pretreated with different angles of linear polarization of femtosecond radiation with a wavelength of 515 nm are studied.

Keywords: *digital holographic microscopy, polarization, quantitative phase imaging, laser processing, ZnO:Ag films*

Метод синтеза бинарных дифракционных оптических элементов с адаптивным применением прямого поиска

А.С. Овчинников, П.А. Черемхин, А.В. Шифрина

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

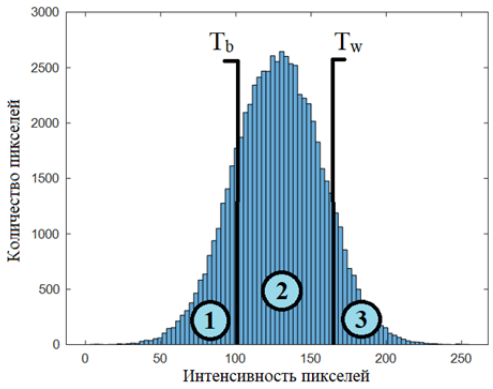
Разработан гибридный алгоритм бинаризации амплитудных голограмм, сочетающий предварительное квантование и бинаризацию с выборочным применением прямого поиска со случайной траекторией (ППСТ). Такой подход позволяет существенно сократить объем итерационной обработки при сохранении высокого качества реконструкции голограмм. По сравнению со стандартным ППСТ время бинаризации было уменьшено в 5–10 раз при соответствующей потере качества на уровне 5–10 % в зависимости от требуемого баланса между точностью и скоростью обработки. Предложенный алгоритм ориентирован на задачи высокоскоростного синтеза бинарных голограмм для оптических систем на основе микрозеркальных модуляторов света.

Ключевые слова: *голография, бинаризация, квантование, амплитудные голограммы, прямой поиск со случайной траекторией, микрозеркальные модуляторы света*

В условиях растущего интереса к микрозеркальным модуляторам света (МЗМ) в оптико-цифровых системах, актуальной остается задача разработки эффективных методов бинаризации амплитудных голограмм и дифракционных оптических элементов [1]. МЗМ-технологии находят применение в голографических дисплеях, оптических корреляторах, цифровой микроскопии и системах оптической памяти [2]. Наиболее простым и универсальным способом адаптации амплитудных голограмм для DMD-отображения является их бинаризация [3]. Однако классические подходы к бинаризации голограмм приводят к значительной потере качества реконструкции, особенно при высоком разрешении изображений и неоднородном распределении интенсивности.

Целью работы стало снижение вычислительной сложности метода ППСТ [4] при сохранении высокого качества бинаризации голограмм Фурье. Для этого предложен гибридный подход, сочетающий локальное применение ППСТ только к наиболее «сложным» участкам — тем, где стандартные методы бинаризации дают наибольшую ошибку. В рамках алгоритма сначала синтезируется полутоновая голограмма Фурье, затем формируются ее бинарная и квантованная версии. Далее на основе анализа квантованного изображения подбираются два порога: T_w — выше которого всем пикселям присваивается значение 255 (забеляются), и T_b — ниже которого всем пикселям присваивается значение 0 (зачерняются). Область между ними, содержащая «сложные» пиксели, обрабатывается методом ППСТ.

На рисунке показан пример того, как могут быть расположены T_w и T_b на гистограмме распределения интенсивностей. Область 1 — пиксели с интенсивностью 0. Область 2 — «сложная» область, пиксели которой бинаризованы согласно используемому методу бинаризации, которые далее требуют применения ППСТ. Область 3 — пиксели с интенсивностью 255.



Пример расположения пороговых значений T_w и T_b, делящие гистограмму распределения на три области

Для оценки эффективности были проведены численные эксперименты с использованием 5 полутоновых и 5 бинарных тестовых изображений. Синтезированные голограммы Фурье имели размеры от 256×256 до 1080×1080 пикселей. Среди рассмотренных методов бинаризации были гло-

бальные и локальные пороговые, а также итеративные. Качество восстановления оценивалось по целевой функции, которая объединяла метрики качества индекса структурного сходства и нормированного среднеквадратического отклонения.

По результатам численных экспериментов, при помощи данного подхода удалось уменьшить время обработки голограммы в пять раз без потери в качестве. Вместо пяти полных итераций ППСТ (5 раз по ~250 сек.) потребовалось две итерации применения ППСТ к «сложным» пикселям (2 раза по ~125 сек.). Уменьшение рассматриваемой области «сложных» пикселей обеспечило более чем десятикратное ускорение расчетов.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

Список источников

[1] *Jiao S. et al.* Complex-Amplitude Holographic Projection with a Digital Micromirror Device (DMD) and Error Diffusion Algorithm // IEEE Jounal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2020. Vol. 26. № 5. Art. no. 2800108. https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.2996657

[2] *Cheremkhin P.A. et al.* DMD-based optical pattern recognition using holograms generated with the Hartley transform // Optics and Lasers in Engineering. 2023. Vol. 166. Art. no. 107584. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107584

[3] *Ovchinnikov A.S. et al.* What Binarization Method Is the Best for Amplitude Inline Fresnel Holograms Synthesized for Divergent Beams Using the Direct Search with Random Trajectory Technique? // Journal of Imaging. 2023. Vol. 9. № 28. https://doi.org/10.3390/jimaging9020028

[4] *Cheremkhin P.A. et al.* Iterative synthesis of binary inline Fresnel holograms for high-quality reconstruction in divergent beams with DMD // Optics and Lasers in Engineering. 2022. Vol. 150. Art. no. 106859. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106859

The method of synthesis of binary diffraction optical elements with adaptive application of direct search

A.S. Ovchinnikov, P.A. Cheremkhin, A.V. Shifrina

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

A hybrid algorithm for binarization of amplitude holograms has been developed, combining pre-quantization and binarization with selective application of direct search with a random trajectory (DSRT). This approach makes it possible to significantly reduce the amount of iterative processing while maintaining high-quality hologram reconstruction. Compared to the standard PPST, the binarization time was reduced 5–10 times with a corresponding loss of quality at the level of 5–10 %, depending on the required balance between accuracy and processing speed. The proposed algorithm is focused on the tasks of high-speed synthesis of binary holograms for optical DMD-systems.

Keywords: *holography, binarization, quantization, amplitude holograms, direct search with a random trajectory, digital micromirror device*

Особенности применения ИИ для анализа изображений частиц, восстановленных из цифровых голограмм

В.В. Демин, М.М. Курков, В.Т. Калайда

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

В работе исследованы возможности нейросети YOLOv8 по классификации когерентных изображений планктонных частиц, численно восстановленных из цифровых голограмм в лабораторном и натурном эксперименте. Показано, что устойчивое распознавание частиц в условиях когерентных шумов и низкого контраста их голографических изображений обеспечивается при использовании для обучения нейросети датасета с укрупненной морфологической таксономией.

Ключевые слова: *цифровая голография планктона, сверточные нейронные сети, погружаемая цифровая голографическая камера*

Введение

Зоопланктон является чувствительным биоиндикатором состояния водной среды, реагирующим на ее минимальное загрязнение, при этом поведенческие реакции изменяются по-разному для разных видов (таксонов) планктона. Поэтому экологическая диагностика водной среды требует *in situ* определения параметров, поведения и классификации планктонных частиц в мониторинговом режиме. Наиболее эффективным средством для этого является цифровая голография, позволяющая получать информацию о распределении частиц в объеме исследуемой среды, их размерах, форме, а также классифицировать их [1]. Наиболее часто используют осевую схему, в которой на цифровую камеру регистрируется интерференционная картина предметной (рассеянной на частицах) и опорной (прошедшей без рассеяния) волн, которая и является цифровой голограммой. Послойное численное восстановление изображений поперечных сечений исследуемого объема позволяет обнаруживать и определять параметры каждой планктонной частицы. Изображения частиц, восстановленные из цифровой голограммы, характеризуются наличием когерентных шумов и, вследствие этого, низкой контрастностью, что существенно затрудняет последующий анализ восстановленных изображений [2].

Методика

Для классификации активно применяют сверточные нейронные сети, которые демонстрируют высокую эффективность при распознавании объектов на изображениях с шумовой составляющей, а также позволяют быстро классифицировать различные объекты, например планктон, на изображениях, восстановленных из голограмм [3]. Особенности применения нейросетевой модели в условиях натурной голографической съемки заключаются в возможности поэтапного обогащения и адаптации датасета прямо в ходе экспедиционных работ, устойчивости модели к зашумленным и частично расфокусированным реконструкциям и возможности применения укрупненной таксономии, обеспечивающей надежное распознавание морфологически близких объектов. В данной работе рассматривается такая возможность, повышающая обобщающую способность моделей, что особенно оправданно в натурных условиях. При восстановлении голографических изображений планктонных частиц мелкие структурные элементы часто теряются или искажаются, что снижает информативность изображения для распознающих алгоритмов [4]. В таком случае обоснованным представляется переход к универсализированной таксономии, опирающейся на устойчивые внешние признаки, различимые даже на когерентных изображениях. Этот подход позволяет не терять в качестве диагноза, поскольку биоиндикационное исследование ориентируется на крупные (доминирующие) таксоны, в структуре популяции, без привязки к биологическим видам.

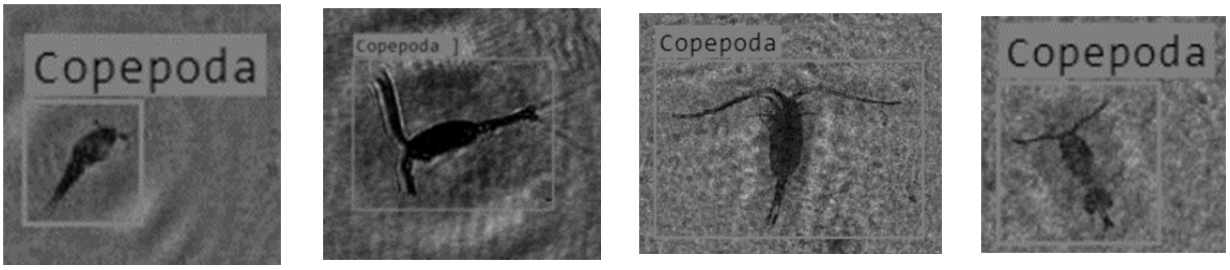
Из анализа голографических изображений, полученных при полевых мониторинговых измерениях с помощью погружаемой цифровой голографической камеры, сформирована универсальная таксономическая схема для обучения модели, включающая семь классов:

1) Copepoda.
2) Cladocera.
3) Copelata (аппендикулярии, оболочники).
4) Larvae (различные личинки).
5) Chaetognatha.
6) Nauplii (молодые формы, неотличимы у многих видов).
7) Artemia (специфично для конкретных озер).

Виды, объединенные в образованные классы, имеют близкие биологические и популяционные свойства. На основе данной укрупненной систематики была обучена сверточная нейронная сеть YOLOv8, ориентированная на распознавание зоопланктона по изображениям, восстановленным из цифровых голограмм. В процессе обучения использовались наборы голографических изображений представителей каждого из семи таксонов, полученных в ходе натурных регистраций.

Результаты

Результаты лабораторных экспериментов и полевых испытаний нейросетевой модели, проведенных по материалам подводной голографической съемки в экспедициях на ледостойкой самодвижущейся платформе «СП42», в акваториях Баренцева, Черного морей и озера Байкал, подтвердили корректность выбранного подхода. На рис. 1 можно наблюдать случаи, когда особи разных видов отряда Copepoda биологической классификации, отличающиеся по деталям строения были распознаны как представители Copepoda. Несмотря на то, что морфология части обнаруженных организмов отличалась от таксонов, представленных в обучающей выборке (в основном *Calanoida*), модель успешно идентифицировала их принадлежность к соответствующей укрупненной группе.



а) б) в) г)

Рис. 1. Различные виды Copepoda, распознанные нейросетью: а) *Harpacticoida;* б) *Cyclopoida;* в) *Calanoida;* г) *Calanoida* с яйцевым мешком

Обученная модель продемонстрировала высокую селективность высокую селективность к видам, принадлежащим к разным классам. Такие представители, как, Cladocera и Cirripedia, были уверенно распознаны моделью с долей верных классификаций, превышающей 90 %, Copepoda и Chaetognatha продемонстрировали умеренные значения точности (70 % и 68 % соответственно), матрица ошибок приведена на рис. 2.

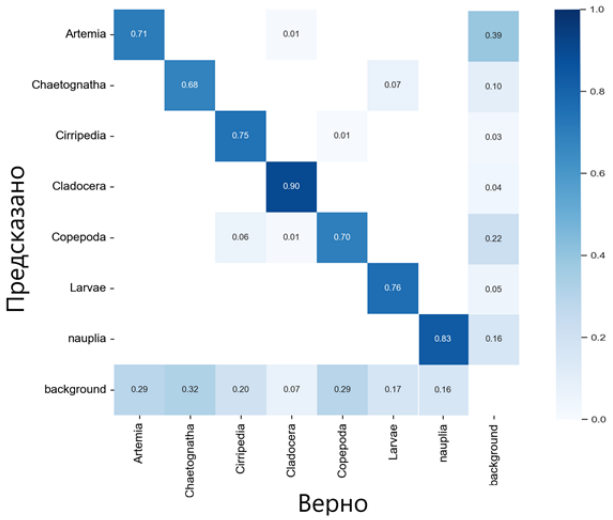


Рис. 2. Матрица ошибок обученный модели

Даже при наличии визуального шума и вариативности натурных изображений, доля пересечений между этими таксонами минимальна, что указывает на сформированное у модели устойчивое

различие по укрупненным признаковым группам. Стоит учитывать, что датасет, использованный для обучения, является натурным — он получен в различных водоемах, с использованием голографических систем в сложных полевых условия.

Заключение

Полученные данные свидетельствуют о высокой степени обобщения, достигаемой моделью при работе с голографическими изображениями, а также подтверждают практическую состоятельность стратегии перехода от видовой к отрядной классификации в условиях когерентных шумов и слабоконтрастных голографических изображений частиц. Такой подход позволяет создавать устойчивые и переносимые модели, применимые к новым экосистемам без необходимости повторной адаптации под конкретный видовой состав.

Список источников

[1] *Fratz M. et al.* Digital holography in production: An overview // Light: Advanced Manufacturing. 2021. Vol. 2:15. P. 1–13.

[2] *Dyomin V. et al.* Features of the application of coherent noise suppression methods in the digital holography of particles // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 8685. Art. no. 1.

[3] *Guo B. et al.* Automated plankton classification from holographic imagery with deep convolutional neural networks // Limnology and Oceanography: Methods. 2021. Vol. 19. P. 1–16.

[4] *Dyomin V. et al.* Underwater holographic sensor for plankton studies in situ including accompanying measurements // Sensors. 2021. Vol. 21. № 14. Art. no. 4863.

Specifics of applying AI to the analysis of particle images reconstructed from digital holograms

V.V. Dyomin, M.M. Kurkov, V.T. Kalayda

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Neural networks are typically applied to images with well-defined, sharp contours. In contrast, particle images reconstructed from digital holograms are characterized by coherent and other types of noise, which impose specific constraints on standard image processing algorithms. This study explores the applicability of the YOLOv8 neural network architecture to the analysis of plankton particle images obtained via digital holography. It is demonstrated that robust object recognition is achievable, provided that classification strategies are adapted to account for the specifics of coherent imaging. The use of an aggregated morphological taxonomy — aligned with externally visible features captured in holographic reconstructions — is proposed as a means of enhancing the model's generalization capability across diverse aquatic environments.

Keywords*: optics, digital holography, convolutional neural networks, immersive digital holographic camera*

Фурье спектроскопия планктонных концентраций по данным in situ цифрового голографического мониторинга

В.В. Демин, Д.В. Куркова, И.Г. Половцев, А.Ю. Давыдова

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

Рассматриваются временные ряды планктонных концентраций, зарегистрированные на длительной стоянке в натурных условиях с помощью погружной цифровой голографической камеры. Спектральный анализ позволяет выделить биоритмы — характерные колебания изменчивости планктонных концентраций, характеристики которых могут быть использованы в биоиндикационных целях. Полученные результаты подтверждают эффективность цифрового голографического мониторинга, как технологии для выявления аномалий поведения, связанных с загрязнением водоемов на ранней стадии.

Ключевые слова: *цифровая голография, планктон, погружная цифровая голографическая камера, биоритмы*

Введение

Разработка неинвазивных методов ранней диагностики загрязнения водных экосистем является актуальной задачей. В связи с массовой антропогенной деятельностью, затрагивающей практически все водоемы, эта задача должна решаться средствами автоматизированного биоиндикационного мониторинга, ориентированного на определения реакции гидробионтов, населяющих водоем. В качестве таковых наиболее перспективен автохтонный зоопланктон. Цифровая голография in situ является перспективной технологией для мониторинговой регистрации свойств автохтонного планктона в виде временного ряда наблюдений [1].

Методы

Принцип работы цифровой голографической камеры основан на регистрации интерференционной картины, возникающей при просвечивании исследуемого объема лазерным излучением. Интерференция происходит между опорной волной (нерассеянным излучением) и предметной волной (излучением, рассеянным на частицах). Картина интерференции фиксируется цифровой камерой в виде двумерного массива дискретных квантованных значений интенсивности, который и является цифровой голограммой исследуемого объема. Полученная голограмма передается в память компьютера, где осуществляется численное восстановление изображения с последующим извлечением информации о морфологии, пространственном положении и оптических свойствах отдельных частиц среды. При этом воспроизводится информация о каждой частице (планктонной особи, оседающей неживой частице, капле нефти, пузырьке газа и т. п.), содержащейся в регистрируемом объеме водной среды. В данной работе речь идет о морских частицах — автохтонный зоопланктон, характеризующийся изменчивостью своих параметров и реакций под воздействием внешних факторов среды [2, 3], в том числе и концентрации, определяемой по результатам обработки голограмм.

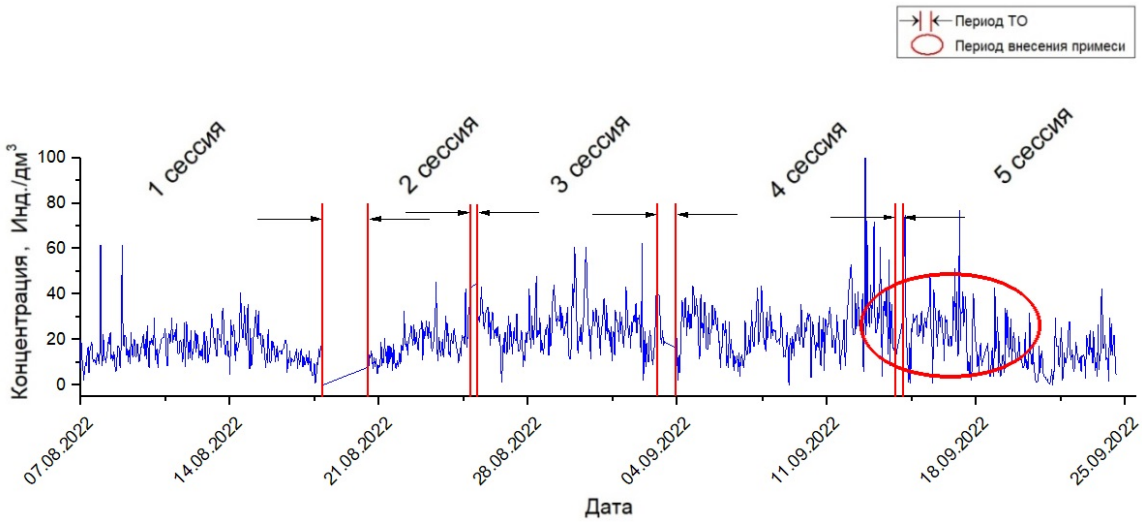


Рис. 1. Временной ряд концентрации зоопланктона

В натурном эксперименте измерения концентраций планктона проводились на глубине 20 м в течение 32 суток. При этом на береговую вычислительную станцию по волоконной линии связи передавались пакеты голограмм по 20 шт. в час. В рамках проведенного морского эксперимента (Зеленецкая губа Баренцева моря, август – сентябрь 2022) были зарегистрированы временные ряды концентраций планктона в рабочем объеме погружаемой цифровой голографической камеры, формируемые с шагом один час (рис. 1).

Перерывы в измерениях, обозначенные красными линиями, связаны с необходимостью технического обслуживания (ТО) камеры. В процессе измерений было проведено кратковременное и контролируемое «загрязнение» рабочего объема посредством точечного введения индикаторной примеси NaCl. Солевой раствор является безвредным загрязнителем, если воздействие не очень длительно (5–10 суток). Соответствующие дни выделены на графике красным эллипсом.

Результаты

Для получения биоиндикационной информации в настоящей работе использован спектральный анализ временного ряда планктонных концентраций путем преобразования Фурье, что позволило выявить периодические компоненты, синхронизированные с факторами внешней среды.

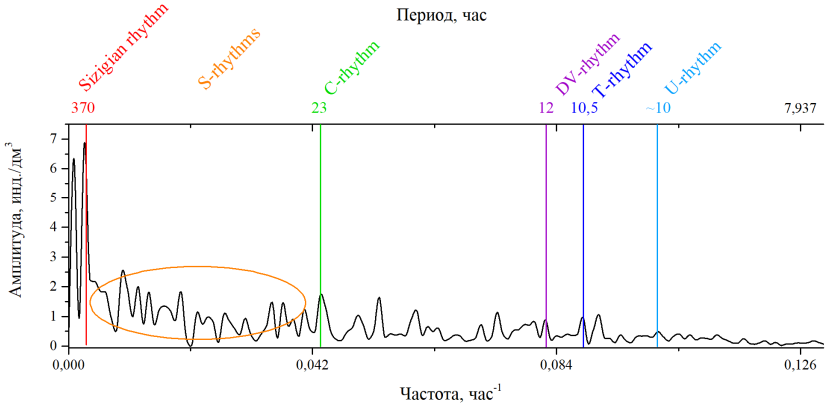
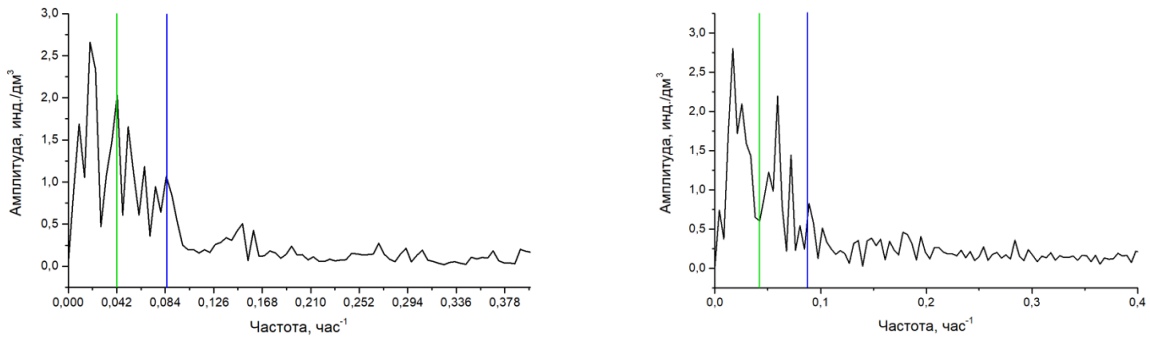


Рис. 2. Спектр изменчивости планктонных концентраций, полученный в результате Фурье-преобразования временного ряда измерений. Эллипсом отмечены структурирующие ритмы, обусловленные изменением структуры турбулентных потоков

Результаты Фурье анализа зарегистрированного ряда представлены на рис. 2 в виде спектра, имеющего структуру с характерными линиями, наиболее интересной из которых является линия циркадного ритма с периодом ~24 часа (на рис. 2 отмечена зеленым цветом).

По информации о положении, форме и интенсивности линий мы можем делать выводы о состоянии акватории, так как сбой биоритмов может свидетельствовать о наличии внешних воздействий, включая антропогенные загрязнения, способные трансформировать циркадные механизмы регуляции активности планктонных организмов [4–6]. На рис. 3 приведены спектры, которые были получены в течение суток без воздействия (а) и с воздействием индикаторной примеси NaCl (б).



(а) (б)

Рис. 3. Спектры временных рядов после обработки усредняющим алгоритмом: (а) — в период без воздействия, (б) — в период с воздействием индикаторной примеси NaCl

За все сутки без воздействия четко фиксируется линия циркадного ритма с периодом ~24 часа, что видно по положению зеленой линии и выраженному увеличению амплитуды на рис. 3, (а). Однако в период воздействия наблюдается заметное снижение амплитуды в этой области спектра, где ранее фиксировался стабильный ритм (рис. 2, (б)). Эта трансформация и является сигналом о том, что основной биологический ритм сбит, а внутренняя регуляция активности планктонного сообщества нарушена. Подавление амплитуды циркадного ритма в спектре может служить ранним диагностическим признаком экологического неблагополучия и использоваться в качестве спектроскопического биомаркера нарушений в водной среде. Признак ранний, поскольку еще биоценоз не нарушен, есть только опасные тенденции к этому.

Заключение

Выполненный анализ временных рядов концентраций зоопланктона, полученных в ходе длительного натурного эксперимента с использованием погружаемой цифровой голографической камеры, подтвердил высокую информативность спектральных характеристик этих рядов в задаче экологического мониторинга. Применение преобразования Фурье позволило выделить ключевые ритмические компоненты, отражающие как физиологическую активность биоценоза, так и внешние возмущающие воздействия.

Показано, что цифровая голография in situ, дополненная методами спектроскопического анализа, открывает перспективы для построения неинвазивных систем экологического мониторинга и оценки состояния акваторий в реальном времени.

Список источников

[1] *Fratz M. et al.* Digital holography in production: An overview // Light: Advanced Manufacturing. 2021. Vol. 2:15. P. 1–13.

[2] *Jumars P.A., Trowbridge J.H., Boss E., Karp-Boss L.* Turbulence-plankton interactions: A new cartoon // Marine Ecology. 2009. Vol. 30, № 2. P. 133–150. https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2009.00288.x

[3] *Naylor E.* Chronobiology of marine organisms. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 289 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/281709604 (дата обращения 20.04.2025).

[4] *Aguzzi J.* Biological rhythms in the marine environment: The Norway lobster as a case study // Contributions to Science. 2008. Vol. 3, № 4.

[5] *Zhang L., Hastings M.H., Green E.W., Tauber E., Sladek M., Webster S.G., Kyriacou C.P., Wilcockson D.C.* Dissociation of circadian and circatidal timekeeping in the marine crustacean Eurydice pulchra // Current Biology. 2013. Vol. 23. P. 1863–1873. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2013.08.03

[6] *Ohman M.D., Frost B.W., Cohen E.H.* Reverse diel vertical migration: an escape from invertebrate predators // Science. 1983. Vol. 220. P. 1404–1407.

Fourier spectroscopy of plankton concentrations based on in situ digital holographic monitoring data

V.V. Dyomin, D.V. Kurkova, I.G. Polovtsev, A.Y. Davydova

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The time series of plankton concentrations recorded at long-term parking in natural conditions using an immersion digital holographic camera is considered. Spectral analysis allows us to identify biorhythms, which are characteristic fluctuations in the variability of plankton concentrations, the characteristics of which can be used for bioindication purposes. The results obtained confirm the effectiveness of digital holographic monitoring as a technology for detecting behavioral anomalies associated with water pollution at an early stage.

Keywords: *digital holography, plankton, submersible digital holographic camera, biorhythms*

Метрики для оценки качества изображений восстановленных из голограмм

Е.К. Баландин, П.А. Черемхин, А.В. Козлов, Н.Н. Евтихиев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Проведено численное моделирование синтеза голограмм с различной степенью зашумленности и восстановление изображений из полученных голограмм. Реализованы два типа существующих метрик оценки качества изображений, как требующие исходное изображение для своей работы, так и не требующие. Приведены результаты сравнения применения обоих типов метрик к изображениям, восстановленным из голограмм.

Ключевые слова: *цифровая голография, метрики оценки качества изображений, реконструкция изображений, соотношение сигнал-шум, индекс структурного сходства*

Введение

В задачах повышения качества, фильтрации и сжатия изображений, в том числе восстановленных из голограмм, требуются корректно оценивать их качество [1]. Для оценки качества в настоящее время используется большое количество метрик:

1) требующие исходное изображение, с попиксельным сравнением: PSNR (пиковое отношение сигнал/шум), НСКО (нормированное среднеквадратическое отклонение) и коэффициент корреляции (КК).

2) требующие исходное изображение, учитывающие соседние пиксели: индекс структурного сходства и его модификации (SSIM, IW-SSIM, MS-SSIM), FSIM (сходство признаков), DSS (дискретное косинусное преобразование), GMSD (отклонение сходства величины градиента), HaarPSI (отклонение перцептивного сходства Хаара), MDSI (индекс сходства среднего отклонения) и VIFp (точность визуальной информации).

3) не требующие исходного изображения — BRISQUE (оценка качества изображения без оригинала), спекл-контраст.

В работе реализованы все три типа метрик. В табл. 1 представлены метрики, рассмотренные в рамках данной работы.

Таблица 1. Классификация метрик по входным данным и методам

С исходным изображением		Без исходного изображения
Попиксельно	Областные	
Пиковое отношение сигнал -шум (PSNR) Коэффициент корреляции НСКО — нормированное среднеквадратичное отклонение	SSIM IW-SSIM FSIM DSS GMSD HaarPSI MDSI VIFp	BRISQUE Спекл-Контраст

Метод сравнения

Для сравнения точности метрик между собой часто применяется метод предложенный VQE (Video Quality Experts) group, он заключается в том, что полученный набор значений метрик для различных уровней шума аппроксимируется монотонной логарифмической функцией, содержащей четыре 4 свободных параметра [2]:

$$y(x) = \beta_1 + \left(\frac{\beta_2 - \beta_1}{1 + e^{-\beta_3(x-\beta_4)}}\right).$$

Набор значений, полученный непосредственно метриками, и набор, полученный путем аппроксимации, анализировались при помощи следующих двух параметров:

- Коэффициент корреляции Пирсона [3] — показывает «точность» метрики (погрешность оценки качества изображения).
- Коэффициент корреляции Спирмена [4] — показывает «монотонность» метрики (степень согласованности с динамикой уровня шума).

Моделирование шумов

Для моделирования шумов фотодетектора, записывающего голограмму, использован гауссов шум с нормальным распределением:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} exp\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

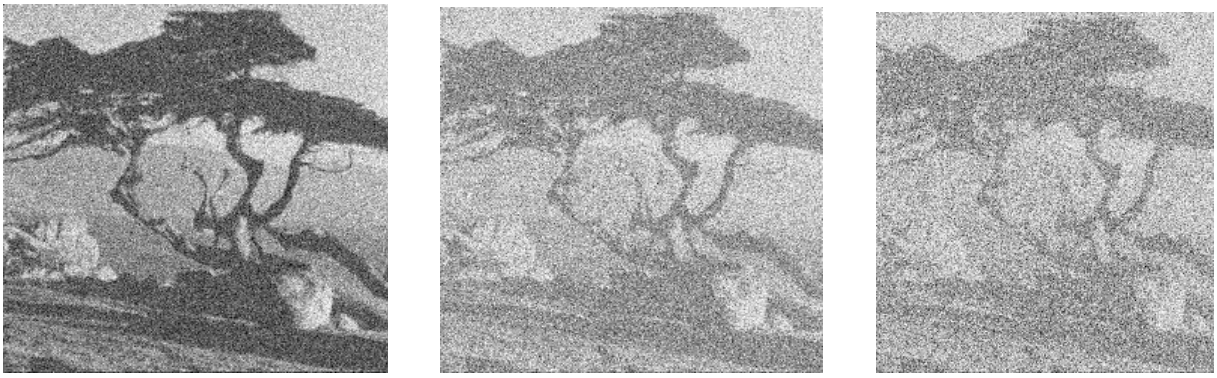
где μ — среднее значение шума, σ — дисперсия.

Другой использовавшийся в работе тип шума — «Соль и перец» — представляет из себя случайно распределенные значения с максимальной и минимальной интенсивностью. Параметром, описывающим уровень данного шума, считалось количество зашумленных пикселей в процентном соотношении. Он использовался для имитации спекл-шума.

Результаты

Для синтеза голограмм и восстановления изображений было использовано преобразование Френеля и выбраны следующие характеристики: размер объекта 256×256 пикс., размер голограммы 1200 × 1200 пикс. разрядностью 8 бит, длина волны излучения 532 нм, расстояние между изображением и голограммой 2 м. Численное моделирование синтеза проведено с помощью программной реализации на языке Python.

На рис. 1 представлены примеры изображений, восстановленных из голограмм с различным уровнем шума.



а б в

Рис. 1. Примеры восстановленных изображений с различным уровнем гауссова шума: уровень шума 4 (а), 8 (б), 12 (в)

В табл. 2 и 3 представлены значения коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена, усредненные по группам.

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции, усредненные по группам для гауссового шума

Коэф. корр.	Пирсон	Спирмен
Попиксельные	0,990±0,013	0,981±0,017
Областные	0,994±0,005	0,90±0,17
Безреференсные	0,9888±0,0012	0,84±0,10

Таблица 3. Значения коэффициентов корреляции, усредненные по группам для шума «соль и перец»

Коэф. корр.	Пирсон	Спирмен
Попиксельные	0,992±0,011	0,98±0,02
Областные	0,994±0,007	0,89±0,19
Безреференсные	0,9861±0,0010	0.82±0.12

Как видно из полученных результатов, интересующие нас в рамках цифровой голографии безреференсные метрики спекл-контраст и BRISQUE показали результат хуже, чем референсные метрики для обоих видов шума. Значения остальных метрик близки между собой.

Заключение

В ходе данной работы реализовано 14 существующих метрик оценки качества изображений, из которых 12 — референсные, и 2 — безреференсные. Проведено сравнение эффективности их работы на изображениях, восстановленных из численно синтезированных голограмм, при помощи метода VQE group. Полученные результаты будут использованы для разработки новой метрики оценки качества восстанавливаемых изображений.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

Список источников

[1] *Cheremkhin P.A. et al.* An Optical-Digital Method of Noise Suppression in Digital Holography // Journal of Optics. 2022. Vol. 24. № 11. Art. no. 115702.

[2] *Group V.Q.E. et al.* Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment. Phase II. 2003. VQEG.

[3] *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

[4] *Khawla Ali Abd Al-Hameed.* Spearman's correlation coefficient in statistical analysis // International Journal of Nonlinear Analysis and Applications. 2022. Vol. 13. № 1. P. 3249–3255. https://doi.org/10.22075/ijnaa.2022.6079

Metrics in evaluating images reconstructed from holograms

E.K. Balandin, P.A. Cheremkhin, A.V. Kozlov, N.N. Evtikhiev

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Numerical modeling of the synthesis of holograms with different noise levels and image reconstruction from the obtained holograms has been carried out. Two types of image quality metrics were implemented: that require original image and no-reference. The results of comparing 2 types of metrics at all and the metrics with each other are presented.

Keywords: *digital holography, image quality metrics, image reconstruction, signal-noise ratio, structure-similarity index measure*

Технология измерений и визуализации микрометровых дефектов методом двухдлинноволновой цифровой голографии

В.В. Сементин, М.В. Гавриш, П.К. Розанов, У.В. Прохорова, А.П. Погода, А.С. Борейшо

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

В работе продемонстрирована технология по трехосевой реконструкции поверхности с распознаванием дефектов размерами от 25 до 100 мкм, с возможностью измерения длины, ширины и высоты. Технология заключается в измерении перепадов высот с помощью биений, формируемых волнами с отличающимися длинами волн в пределах 1 нм. Измерения по горизонтали производятся методами цифровой голографии через определяемое в зависимости от дистанции реконструкции значение величины одного пикселя цифрового реконструированного изображения комплексной амплитуды объектной волны.

Ключевые слова: *цифровая голография, двухдлинноволновая голографическая интерферометрия, микроскопия*

Введение

На текущий день актуальной является задача бесконтактного неразрушающего контроля качества. Данная задача находит свое применение в аддитивном производстве, в микроэлектронике, в производстве точных механизмов, для ювелирной промышленности, для производства турбинных лопаток. Один из способов визуализации и измерения дефектов, лежащих в диапазоне от 10 до 100 мкм — это двухдлинноволновая голографическая интерферометрия [1].

Принцип цифровой голографии

Технология измерения и визуализации микрометровых дефектов основано на технологии двухдлинноволновой цифровой голографии. Запись цифровых голограмм проводится на цифровой приемник с пространственным разрешением до 300 мм$^{-1}$. Для обеспечения такого пространственного разрешения угол между опорным и объектным лучом в голографии не должен превышать 8,7° [2]. Восстановление проводится математическим моделированием опорной волны, которая интегрируется вместе с цифровой голограммой (матрицей интенсивностей интерференционной картины) для получения матрицы значений комплексной амплитуды объектной волны:

$$\Gamma(\xi',\eta') = \frac{i}{\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} U_h(x,y)U_r(x,y)\frac{exp(-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho')}{\rho'}dxdy, \quad (1)$$

где $U_h(x,y)$ — цифровая голограмма, а $U_r(x,y)$ — функция, описывающая опорную волну, ξ',η' — координаты объектной волны в плоскости восстановления, ρ' — расстояние между точкой в плоскости голограммы и точкой в плоскости восстановления.

Интенсивность определяется как модуль комплексной амплитуды, а фаза — как комплексная часть в каждой точке пространства голограммы.

Двухдлинноволновая запись позволяет определять перепад высот в зависимости от длины биения двух близких длин волн:

$$\Delta z = \frac{\Delta\varphi}{4\pi}\Lambda = \frac{\Delta\varphi\lambda_1\lambda_2}{4\pi|\lambda_1-\lambda_2|}, \quad (2)$$

где Δφ — матрица разностей фаз, полученная в результате реконструкции двухдлинноволновой голограммы, Λ — длина волны биения.

Расстояние между точкой в плоскости голограммы и точкой в плоскости восстановления влияет на размер реконструированного объекта относительно поля приемника (пропорциональная зависимость) [3]. Для квадратного поля линейный размер объекта, соответствующего 1 пикселю приемника, определяется по формуле:

$$\Delta\xi = \frac{\lambda\rho'}{N\Delta x}, \quad (3)$$

где N — количество пикселей приемника, Δx — расстояние между двумя соседними пикселями, что соответствует размеру одного пикселя.

Результаты

Измерения проводились на двух эталонах шероховатости — Ra 40,80 и Ra 10,14. Действительные перепад высот и ширина трапецеидального профиля и усредненные измеренные значения представлены в таблице.

Действительные и измеренные параметры эталонов

Параметр	Ra 40,80 действительные размеры	Ra 40,80 измеренные размеры	Ra 10,14 действительные размеры	Ra 10,14 измеренные размеры
Перепад высот *h,* мкм	100	94,6	24,5	25,2
Ширина трапецеидального профиля *d*, мм	150	134,4	65	56

Измерения проходили с помощью перестраиваемого лазера с центральной длиной волны 407 нм, на голографической схеме, основанной на интерферометре Майкельсона. Длина волны биения составляла 633,8 мкм, что соответствует биению длин волн λ_1 = 407,4 нм и λ_2 = 407,65 нм, и 158,6 мкм, что соответствует биению длин волн λ_1 = 407,4 нм и λ_2 = 408,4 нм.

На рис. 1 и 2 представлены результаты трехмерной визуализации и трапецеидальные срезы для эталонов шероховатости Ra 40,80 и Ra 10,14 соответственно.

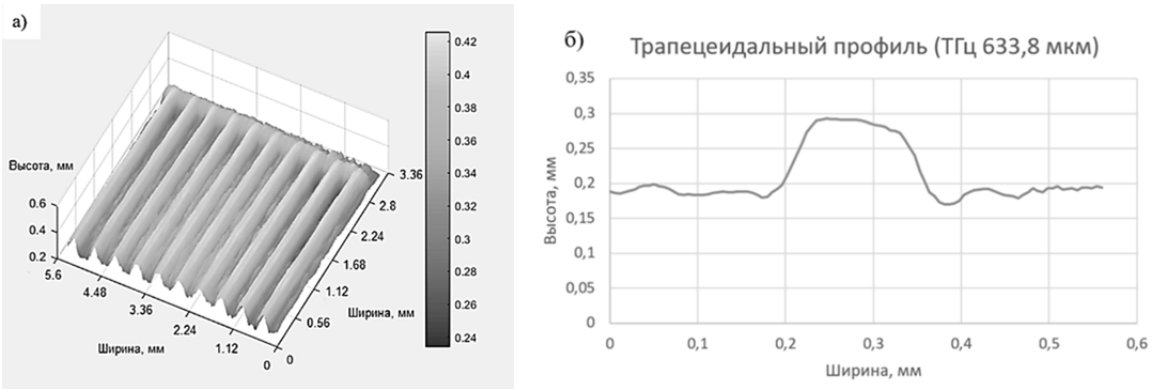


Рис. 1. Трехмерная визуализация (а) и трапецеидальный срез (б) эталона Ra 40,80

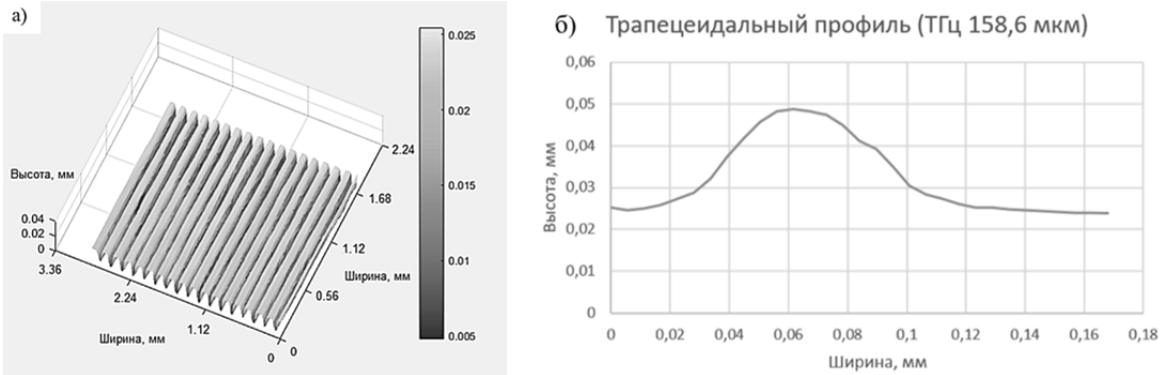


Рис. 2. Трехмерная визуализация (а) и трапецеидальный срез (б) эталона Ra 10,14

Заключение

Технология измерений и визуализации микрометровых дефектов методом двухдлинноволновой цифровой голографии является компромиссным решением между точностью и скоростью измерений. Данная технология затрагивает микрометровый диапазон измерений, что может быть актуально для микроэлектроники, ювелирного производства, аддитивного производства и других применений.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № FZWF-2025-0002, НИОКТР 125052706438-3).

Список источников

[1] *Di J.* Dual wavelength digital holography for improving the measurement accuracy // International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (Icopen2013). SPIE, 2013. Vol. 8769. P. 122–127.

[2] *Сементин В.В.* Цифровая голографическая система послойного контроля качества детали аддитивного производства // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 3. С. 89–99.

[3] *Rosen J.* A review of incoherent digital Fresnel holography // J. Holography Speckle. 2009. Vol. 5. № 2. P. 1–17.

Technology of measuring and visualizing micrometer defects using the method of two-wavelength digital holography

V.V. Sementin, M.V. Gavrish, P.K. Rozanov, U.V. Prokhorova, A.P. Pogoda, A.S. Boreysho

Baltic State Technical University "Voenmekh" D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

This paper demonstrates a technology for three-axis surface reconstruction with recognition of defects with sizes from 25 to 100 μm, with the ability to measure length, width and height. The technology consists of measuring height differences using synthetic wavelength formed by waves with different wavelengths within 1 nm. Horizontal measurements are made using digital holography methods through the value of one pixel of the digital reconstructed image of the complex amplitude of the object wave, determined depending on the reconstruction distance.

Keywords: *digital holography, dual-wave holographic interferometry, microscopy*

Исследование топологических структур в хиральных нематических жидких кристаллах в реальном времени методом поляризационной цифровой голографии

Т.В. Резцов[1], А.В. Черных[1], Н.В. Петров[1,2], Т. Орлова[3]

[1] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Харбинский политехнический институт, Харбин, Китай*
[3] *Ереванский государственный университет, Ереван, Армения*

В работе исследуется динамика формирования торона в хиральном нематическом жидком кристалле под воздействием фемтосекундного инфракрасного лазерного излучения. Для регистрации поляризационных характеристик использовался поляризационный голографический микроскоп, позволяющий одновременно регистрировать четыре интерферограммы при линейных поляризациях 0°, 45°, 90° и 135°. На основе восстановленных матриц Джонса, соответствующих рассматриваемой области ЖК-ячейки, показана пространственно-временная эволюция амплитудных и фазовых характеристик в процессе образования топологической структуры — торона.

Ключевые слова: *жидкие кристаллы, топологические структуры, цифровая голография*

Введение

Топологические структуры в хиральных нематических жидких кристаллах (ЖК) привлекают внимание благодаря своим особым оптическим свойствам [1]. Одним из таких объектов являются тороны — конфигурации с локализованной дезориентацией поля директора. Они обладают особыми свойствами: при взаимодействии с проходящим светом, способны менять его поляризацию. Изучение динамики формирования топологических важно как для понимания физических механизмов самоупорядочивания, так и для возможных применений в фотонных устройствах [2]. Актуальными являются современные цифровые голографические методы благодаря своей способности регистрировать пространственные распределения фазовых и поляризационных параметров [3].

Экспериментальная установка

Для регистрации поляризационных характеристик светового поля разработана оптическая система на основе схемы Маха — Цендера, как показано на рисунке.

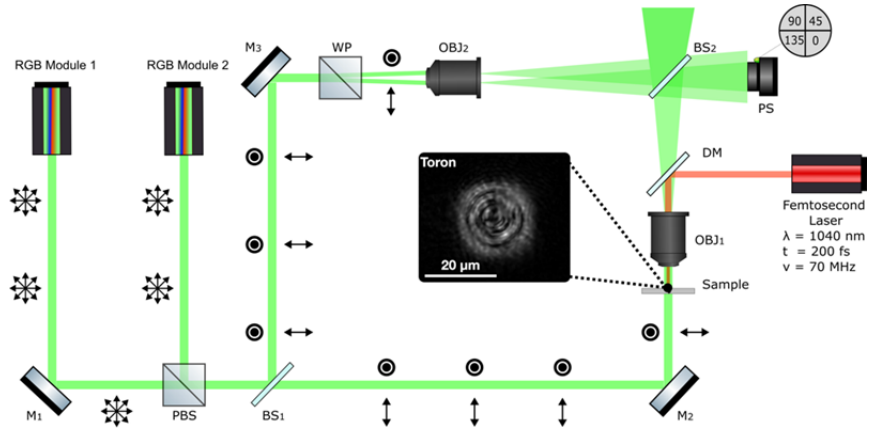


Схема поляризационного голографического микроскопа: BS — светоделитель; DM — дихроичное зеркало; Sample — ЖК-образец; M — зеркало; OBJ — объектив; PBS — поляризационный светоделитель; PS — поляризационный сенсор; RGB module — модуль с красным (R), зеленым (G) и синим (B) лазерами; WP — призма Волластона; Toron — восстановленное изображение торона в скрещенных поляризатора

Ключевой особенностью системы является поляризационный сенсор (FLIR BFS-U3-51S5P-C), обеспечивающий одновременную регистрацию четырех интерферограмм, соответствующих поляризациям 0°, 45°, 90° и 135°. Система адаптирована для работы с тремя длинами волн: 450 нм, 532 нм и 650 нм. Формирование торонов индуцировалось фемтосекундным ИК-лазером (1040 нм, 200 фс, 70 МГц). В качестве объекта исследования использовалась жидкокристаллическая смесь на основе E7 с хиральной добавкой S811. В работе рассмотрены образцы, представляющие собой ЖК ячейки толщиной 10 мкм и 25 мкм.

Восстановление элементов матрицы Джонса

Записанные интерферограммы обрабатывались методом быстрого преобразования Фурье с выделением шести значимых порядков в области пространственных частот. Выделяя каждый из этих шести порядков и выполняя обратное Фурье-преобразование, мы восстанавливаем комплексные амплитудные распределения интерферирующих волновых фронтов. Эта операция выполняется как с образцом, так и без него. Поля, зарегистрированные без образца, используются для компенсации внутренних аберраций системы путем деления соответствующих комплексных амплитудных распределений на них. Затем из шести комплексных полей рассчитывается матрица Джонса. Таким образом, метод позволяет за одну экспозицию восстановить амплитудный и фазовый отклики образца, давая полное представление о его локальной поляризационной модуляции. Сопоставив распределения амплитуд и фаз ее элементов, удалось отследить динамические изменения матриц Джонса в процессе формирования торона.

Заключение

Проведенный эксперимент подтверждает возможность регистрации и анализа эволюции топологических структур в жидких кристаллах на основе поляризационной цифровой голографии. Полученные данные свидетельствуют о способности торонов модулировать поляризационные характеристики света, аналогично поведению q-пластин [4, 5]. Метод может быть использован для дальнейших спектральных и временных исследований динамики дефектных конфигураций в мягких анизотропных средах.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания (№ FSER-2025-0007).

Список источников

[1] *Smalyukh I.I. et al.* Three-dimensional colloidal crystals in liquid crystalline blue phases // Nature Materials. 2010. Vol. 9. № 2. P. 139–145.

[2] *Paterson D.A. et al.* Generation of topological structures in liquid crystals // Molecular Systems Design & Engineering. 2022. Vol. 7. № 6. P. 607–621.

[3] *Poy G. et al.* Study of photonic structures in liquid crystalline systems // Nature Photonics. 2022. Vol. 21. P. 1177–1184.

[4] *Petrov N.V. et al.* Design of broadband terahertz vector and vortex beams: I. Review of materials and components // Light: Advanced Manufacturing. 2022. Vol. 3. № 1. P. 640–652.

[5] *Petrov N.V. et al.* Design of broadband terahertz vector and vortex beams: II. Holographic assessment // Light: Advanced Manufacturing. 2022. Vol. 3. № 1. P. 752–770.

Real-time investigation of topological structures in chiral nematic liquid crystals using polarization digital holography

T.V. Reztsov[1], A.V. Chernykh[1], N.V. Petrov[1, 2], T. Orlova[3]

[1] *ITMO University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China*
[3] *Yerevan State University, Yerevan, Armenia*

This work investigates the dynamics of toron formation in a chiral nematic liquid crystal under femtosecond infrared laser irradiation. A polarization holographic microscope was used to record polarization characteristics, enabling simultaneous acquisition of four interferograms at linear polarizations of 0°, 45°, 90°, and 135°. Based on reconstructed Jones matrices corresponding to the studied region of the LC cell, we demonstrate the spatiotemporal evolution of amplitude and phase characteristics during the formation of the topological structure (toron).

Keywords: *liquid crystals, topological structures, digital holography*

Секция 10
Современные функциональные оптические материалы

Сенсибилизация голографических фотополимерных материалов комплексами с переносом заряда

В.В. Шелковников[1, 2], Д.И. Деревянко[1], Н.А. Орлова[1], В.В. Бардин[1]

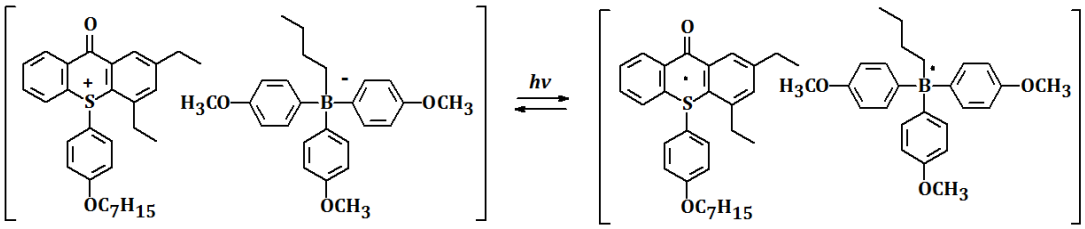
[1] *Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Рассмотрена сенсибилизация записи голограмм в фотополимерных материалах светочувствительными комплексами с переносом заряда (СКПЗ) между донорными и акцепторными компонентами фотополимерной композиции. Предложен механизм фотораспада СКПЗ на основе катиона тиоксантенония и трифенилалкилборатного аниона.

Ключевые слова: *голографические фотополимерные материалы, сенсибилизация, комплексы с переносом заряда*

Светочувствительные комплексы с переносом заряда (СКПЗ) используются в качестве систем фотоинициирования радикальной полимеризации в видимой области спектра вследствие образования у СКПЗ дополнительной полосы поглощения в длинноволновой области. Особенностью применения СКПЗ является возможность фотополимеризации в блоке в толстых слоях мономера, вследствие низкого коэффициента экстинкции СКПЗ по сравнению с сенсибилизаторами на основе красителей. Возможность полимеризации в толстых слоях имеет значение в голографии для записи информации или дифракционных структур, например, оптических ночфильтров.

Наиболее эффективно СКПЗ образуется при сочетании ионных соединений донорного и акцепторного типа, как показано на риснуке. В качестве акцептора электрона выступают светочувствительные органические катионы йодония, сульфония (A — компонента), в качестве донора электрона могут выступать анионы алкилтрифенилборатов (D — компонента). Соли (алкил)(арил)боратов являются эффективными соинициаторами свободно-радикальной фотополимеризации. Наряду с использованием красителей для инициации фотополимеризации, образование СКПЗ является альтернативным подходом для создания фотоинициирующих систем с областью сенсибилизации расширенной до видимого диапазона длин волн.



Структура светочувствительного КПЗ и его радикальное состояние вследствие фотоактивированного переноса электрона

В докладе рассмотрены СКПЗ на основе синтезированных и коммерческих солей сульфония и различными донорными компонентами. Вычислены термодинамические параметры образования СКПЗ (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса). Проведены квантово-химические расчеты полосы переноса заряда СКПЗ и их согласование с экспериментом. Проведено сопоставление чувствительности СКПЗ по сравнению с красителями сенсибилизаторами. Предложен механизм фотораспада СКПЗ на основе катиона тиоксантенония и трифенилалкилборатного аниона. Первичный акт фотораспада СКПЗ показан на рисунке.

Holographic photopolymer material sensitization by the charge transfer complexes

V.V. Shelkovnikov[1, 2], D.I. Derevyanko[1], N.A. Orlova[1], V.V. Bardin[1]

[1] *N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The hologram recording sensitization in the photopolymer material by the light sensitive charge transfer complexes (LCTC) between donor and acceptor components of the photopolymer composition is considered. The photochemical mechanism of the LCTC decay on the base of thioxantenonium cation and alkyltriphenylborate anion is proposed.

Keywords: *holographic photopolymer material, sensitization, charge transfer complexes*

Фазовая модуляция света в пространственных модуляторах на основе сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов

С.П. Котова[1], Е.П. Пожидаев[2], С.А. Самагин[1]

[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*

Представлены результаты исследований возможности использования сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов в качестве электрооптической среды для фазовых пространственных модуляторов света. Измерены электрооптические характеристики кристаллов и выполнено численное моделирование многоэлементных модуляторов. Создан экспериментальный образец 12-секторной спиральной пластины на основе жидкокристаллического сегнетоэлектрика. Детально исследованы ее характеристики, включая топологический заряд сформированных кольцеобразных световых полей. Частота реконфигурации формируемых световых полей достигает 3 кГц. Показано, что влияние амплитудной модуляции, возникающей из-за сопутствующего изменения состояния поляризации света, на формирование вихревых световых полей с помощью спиральной пластины не является значимой. Потери, обусловленные использованием поляризатора, не превышают 12 %, что приемлемо для ряда прикладных задач.

Ключевые слова: *фазовая модуляция света, сегнетоэлектрические жидкие кристаллы, ферриэлектрические жидкие кристаллы, квадратичный электрооптический эффект, секторная спиральная пластина*

Важной задачей современной фотоники является увеличение скорости преобразования пространственных распределений световых полей. Частота преобразования (модуляции) в современных фазовых пространственных модуляторах света (ПМС) на основе нематических жидких кристаллов составляет несколько десятков Гц. Повысить быстродействие можно за счет ориентационных эффектов в жидкокристаллических сегнетоэлектриках (ЖКС) и ферриэлектриках с субволновым шагом спиральной структуры, в частности, ориентационного эффекта Керра [1–3]. В работе представлены результаты исследований электрооптических характеристик указанных материалов для задач фазовой модуляции. Изготовлена секторная спиральная пластина (ССП) на основе жидкокристаллического сегнетоэлектрика и детально исследованы ее характеристики.

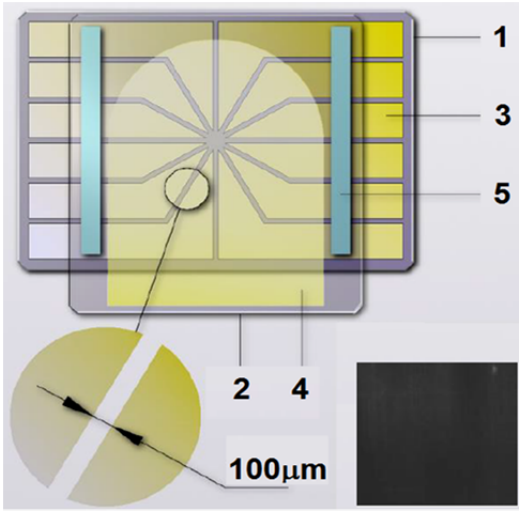
Жидкокристаллические сегнетоэлектрики по пространственной упорядоченности относятся к хиральным смектическим С* жидким кристаллам. Ферриэлетрические фазы жидких кристаллов (ЖК) являются промежуточными между ферроэлектрическими и антиферроэлектрическими фазами. Особенностью эффекта Керра в указанных ЖК является двуосная трансформация эллипсоида показателей преломления и поворот его главной оптической оси при приложении электрического поля. Это не позволяет реализовать чисто фазовую модуляцию в ячейках с планарной ориентацией оси геликоида подложкам.

Нами были изучены электрооптические характеристики трех синтезированных в ФИАН смесевых ЖК сегнетоэлектриков, а также ферриэлектрического кристалла FerriLCM-1 [3], шаг спирали которых менее 100 нм [4]. Экспериментальные данные показали, что все смеси обеспечивают непрерывную эффективную фазовую задержку в диапазоне от 0 до 2π радиан при использовании ячеек со слоем ЖК около 50 мкм. Напряженности электрического поля составили для сегнетоэлектрических ЖК смесей от 1.42, 1.92 и 3.08 В/мкм при времени переключения меньше 1 мс. Для ферриэлектрика FerriLCM-1 соответствующие значения при толщине ячейки 107 мкм равны 0,47 В/мкм и около 1,5 мс.

С использованием полученных экспериментальных данных проведен расчет характеристик вихревых световых полей, которые можно сформировать с помощью 12 секторной спиральной пластины на основе исследованных ЖК смесей ЖКС-587-F-7 и FerriLCM-1 [4, 5]. Показано, что влияние амплитудной модуляции, возникающей из-за изменения состояния эллиптичности, на формирование вихревых световых полей с помощью ПМС на основе исследованных материалов не является значимой.

Создан экспериментальный образец 12-секторной спиральной пластины с использованием ЖКС-587-F-7 [6]. Схема ССП показана на рисунке. Толщина слоя ЖК составляла 50 мкм. ССП управлялась знакопеременным питающим напряжением, частота сигнала варьировалась от 100 до 4000 Гц. В экспериментах пластина освещалась линейно-поляризованным коллимированным пучком лазера, электрический вектор которого был направлен вдоль оси спирали ЖКС. Для устранения искажений в картине распределения интенсивности, вызванных рассеянием при переходных процессах, длительность которых составляет около 150 микросекунд, использовался электрооптический затвор, синхронизованный с питанием ССП. Экспериментальные результаты в целом согласу-

ются с расчетными. Продемонстрировано формирование кольцеобразных световых полей с топологическим зарядом от 1 до 4. Определение величины топологического заряда производилось компенсационным методом с использованием фазового элемента, формируемого многопиксельным ЖК ПМС.



Схематическое изображение секторной спиральной пластины:
1, 2 — подложки, 3,4 — слои ITO, 5 — прокладки. На вкладке изображение фрагмента ячейки размером 100×100 μm в скрещенных поляризаторах. Толщина ячейки 50 μm

Таким образом, проведено сравнение сегнетоэлектрических и ферриэлектрических ЖК в качестве электрооптической среды для фазовой модуляции на примере формирования вихревых световых полей. Показано, что оба жидких кристалла при одинаковой толщине ячейки обеспечивают сравнимые значения изменения состояния эллиптичности модулируемого светового поля. Световые потери при отсечении нежелательной компоненты поляризации составляют менее 12 %, что вполне достаточно для ряда прикладных задач. Величина управляющего напряжения, необходимого для достижения фазового сдвига 2π при одинаковых толщинах ЖК слоя, в случае ферриэлектрического ЖК в 2,6 раза меньше, чем в случае сегнетоэлектрического ЖК. По быстродействию исследованный ферриэлектрик занимает промежуточное положение между нематическими и сегнетоэлектрическими ЖК.

Исследование финансировалось Российским научным фондом (РНФ), грант № 24-22-00239.

Список источников

[1] *Pozhidaev E.P. et al.* Orientational Kerr effect and phase modulation of light in deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch // Phys. Rev. E. 2013. Vol. 87. Art. no. 052502.

[2] *Kotova S.P. et al.* Light modulation in planar aligned short-pitch deformed-helix ferroelectric liquid crystals // Phys. Rev. E. 2015. Vol. 92. Art. no. 062502.

[3] *Pozhidaev E.P. et al.* Broad temperature range ferrielectric liquid crystal as a highly sensitive quadratic electro-optical material // Optics Letters. 2022. Vol. 47. P. 1598–1601.

[4] *Kotova S.P. et al.* Spatial phase light modulator based on the ferroelectric liquid-crystals: possibility of the device construction // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 161. Art. no. 01007.

[5] *Pozhidaev E.P. et al.* Ferrielectric Liquid Crystal with a Subwavelength Helix Pitch As an Electro-Optic Medium for Phase Spatial Light Modulators // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2023. Vol. 50 (Suppl 1). P. S85–S95.

[6] *Kotova S.P. et al.* Ferroelectric liquid crystal with sub-wavelength helix pitch as an electro-optical medium for high-speed phase spatial light modulators // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 135. Art. no. 106711.

Phase modulation of light in spatial modulators based on ferroelectric and ferrielectric liquid crystals

S.P. Kotova[1], E.P. Pozhidaev[2], S.A. Samagin[1]

[1] *Lebedev Physical Institute, Samara Branch, Samara, Russia*
[2] *Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

The results of research on the possibility of using ferroelectric and ferrielectric liquid crystals as an electro-optical medium for phase spatial light modulators are presented. The electro-optical characteristics of crystals are measured and numerical modeling of multi-element modulators is performed. An experimental sample of a 12-sector spiral plate based on a liquid crystal ferroelectric has been made. Its characteristics, including the topological charge of the formed ring-shaped light fields, are studied in detail. The frequency of reconfiguration of the generated light fields reaches 3 kHz. It is shown that the effect of amplitude modulation, which occurs due to a concomitant change in the state of light polarization, on the formation of vortex light fields using a spiral plate is not significant. Losses due to the use of a polarizer do not exceed 12 %, which is acceptable for a number of applications.

Keywords: *phase modulation of light, ferroelectric liquid crystals, ferrielectric liquid crystals, quadratic electro-optical effect, sector spiral plate*

Объединение технологий фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена для создания фотонных интегральных устройств на основе ФТР стекла

Н.В. Никоноров, В.А. Попова, Е.М. Сгибнев, В.В. Песняков, А.М. Алексеев, Е.М. Алексеев

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрены вопросы объединения технологий фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена для создания фотонных интегральных устройств на основе фото-термо-рефрактивного (ФТР) стекла. Показано, что на основе ФТР стекла можно создавать элементы ввода-вывода излучения и планарные градиентные оптические волноводы, т. е. можно реализовывать монолитную интеграцию голографических и волноводных структур на единой подложке. Модификация поверхности стекла ионным обменом позволяет также увеличивать механическую, термическую и оптическую прочность брэгговских решеток на основе ФТР стекла.

Ключевые слова: *фото-термо-рефрактивное стекло, брэгговская решетка, ионный обмен, планарный волновод*

Введение

Одним из трендов развития фотоники в XXI веке является миниатюризация оптических и фотонных элементов, приборов и систем с целью уменьшения их массогабаритных характеристик, энергопотребления и управляющих воздействий. Одним из путей такой миниатюризации является интеграция (объединение) оптических и фотонных элементов и систем на единой подложке. Можно выделить два подхода такого объединения. Первый подход относится к гибридной интеграции на единой подложке разнообразных функциональных оптических планарных элементов (например, волноводов, дифракционных решеток, устройств ввода-вывода излучения, сенсорных устройств и т. д.) и является привлекательным с точки зрения создания устройств и систем интегральной оптики и фотоники. Главный недостаток такого подхода — соединение функциональных оптических элементов, изготовленных из разных материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР), на единой подложке. Например, на стеклянную подложку наносится волноводный слой (чаще всего полимер с повышенным показателем преломления по отношению к стеклянной подложке), на волновод наносится второй слой (полимер или фотополимер), в котором формируются методом лазерной записи или импринтинга дифракционные решетки ввода-вывода излучения. Разные ТКЛР могут негативно влиять на работу интегрально-оптических устройств в условиях колебания температуры, повышенных вибраций и т. д. Второй подход — это монолитная интеграция, когда оптические элементы и подложка сделаны из одного материала, т. е. когда проблема материалов с разными ТКЛР отпадает. Такая интеграция возможна при использовании, так называемых, многофункциональных оптических материалов, позволяющих проводить разнообразные операции со световыми потоками: генерировать и усиливать свет, модулировать, записывать, избирательно поглощать, отражать, вращать поляризацию и т. д. Т. е. такие среды объединяют в себе свойства нескольких материалов, отличающихся по своей функциональности. Одним из примеров таких сред является кристалл ниобата лития, который одновременно является нелинейно-оптической, акусто-оптической, электро-оптической, фоторефрактивной и ионообменной средой. При легировании ниобата лития редкоземельными ионами, такой материал можно использовать как лазерную среду. К сожалению, список таких материалов невелик, и разработка таких материалов является крайне актуальной задачей.

Для реализации подхода монолитной интеграции в нашей работе предложено использовать фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло. ФТР стекло — многофункциональный материал, крайне востребованный сегодня на рынке фотоники, который имеет большой потенциал как голографическая, люминесцентная, ионообменная и лазерная среда [1]. Таким образом многофункциональное ФТР стекло позволяет отдельно записывать высокоэффективные объемные брэгговские решетки (ОБР) разного функционального назначения за счет фото-термо индуцированной (ФТИ) кристаллизации, создавать планарные волноводы за счет наличия в составе стекла ионов натрия и использования низкотемпературного ионного обмена (НИО), изготавливать 3D-полые микроструктурированные элементы за счет разности скоростей травления кристаллической и стеклообразной фазы, а также SERS-датчики за счет восстановления ионов серебра до металлических наночастиц в поверхностном слое стекла, реализовывать усиление, генерацию и архивную память. В настоящей работе впервые продемонстрирован подход монолитной интеграции голографических дифракционных решеток, выполняющих функцию элементов ввода-вывода излучения в волновод, и ионообменных волноводных структур на единой подложке ФТР стекла.

Монолитная интеграция ОБР и волновода в ФТР стекле

В основе объединения ФТИ кристаллизациии НИО в ФТР стекле лежит различение в температурах технологических процессов: T~500 °C для ФТИ кристаллизации и T~300–400 °C для НИО, например, $Na^{+}_{(стекло)}$–$Ag^{+}_{(расплав\ соли)}$. Т. е. на первой стадии можно создать ОБР за счет ФТИ кристаллизации при УФ облучении и последующей термообработки. Поскольку после записи характеристики ОБР стабильны не только при комнатной температуре, но и при высоких температурах (до 600 °C) [1], то последующий НИО будет формировать волноводный слой при сохранении ОБР. Следует отметить, что в случае обмена $Na^{+}_{(стекло)}$ –$Ag^{+}_{(расплав\ соли)}$ профиль показателя преломления волноводного слоя $\Delta n(x)$ совпадает с градиентом распределения концентрации C(x) ионов серебра в поверхностном слое ФТР стекла. Обратная последовательность, т. е. создание волновода методом НИО, а потом запись ОБР будет приводить к сильному изменению свойств волновода — перераспределению (размыванию) концентрации ионов-диффузантов по глубине ионообменного слоя вследствие высокой подвижности ионов серебра в стекле. Например, термообработка Ag-волновода при температурах ФТИ кристаллизации будет приводить к уменьшению концентрации ионов серебра C(x) в поверхностном слое и, в связи с этим, уменьшению прироста показателя преломления волновода $\Delta n(x)$, вплоть до полного исчезновения волноводного слоя. Кроме того, высокая температура будет восстанавливать ионы серебра до металлического серебра и, соответственно, повышать оптические потери. В нашей работе использовался первый вариант, т. е. сначала записывалась ОБР за счет ФТИ кристаллизации, а проводился НИО и формировался волновод.

Элементы ввода-вывода излучения в планарные волновод на ФТР стекле

Градиентный Ag^{+}-волновод, интегрированный с ОБР для ввода-вывода излучения, был изготовлен и протестирован в двух режимах: а) ввод излучения в волновод при помощи ОБР и вывод излучения из волновода при помощи стандартной призмы, б) ввод излучения в волновод при помощи стандартной призмы и вывод излучения из волновода при помощи ОБР. Показано, что ОБР может работать как элемент ввода излучения в оптический волновод, так и как элемент вывода излучения из оптического волновода. При этом ОБР ввода-вывода излучения и волонод созданы на единой подложке из ФТР стекла при объединении двух технологий ФТИ кристаллизации и НИО, т. е. реализован подход монолитной интеграции.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы объединения технологий фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена для создания фотонных интегральных устройств на основе ФТР стекла. Показано, что на основе ФТР стекла можно создавать элементы ввода-вывода излучения и планарные градиентные оптические волноводы, т. е. можно реализовывать монолитную интеграцию голографических и волноводных структур на единой подложке.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект № 24-43-20020).

Список источников

[1] *Никоноров Н.В. и др.* Фототерморефрактивное стекло — перспективный материал фотоники (обзор) // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 3. С. 68–100.

Combining photo-thermo-induced crystallization and ion exchange technologies to create photonic integrated devices based on PTR glass

N.V. Nikonorov, V.A. Popova, E.M. Sgibnev, V.V. Pesnyakov, A.M. Alekseev, E.M. Alekseev

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The paper considers the issues of combining photo-thermo-induced crystallization and ion exchange technologies for creating photonic integrated devices based on photo-thermo-refractive (PTR) glass. It is shown that PTR glass can be used to create radiation input/output elements and planar gradient optical waveguides, i. e. it is possible to implement monolithic integration of holographic and waveguide structures on a single substrate. Modification of the glass surface by ion exchange also allows increasing the mechanical, thermal and optical strength of Bragg gratings based on PTR glass.

Keywords: *photo-thermo-refractive glass, Bragg grating, ion exchange, planar waveguide*

Голографический спекл-экран в фото-термо-рефрактивном стекле

М.В. Гавриш[1, 2], П.К. Розанов[1, 2], А.П. Погода[2], Н.В. Никоноров[1]

[1] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Балтийский государственный технический университет «Военмех» Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия*

Голографические спекл-экраны — диффузоры с управляемой индикатрисой рассеяния — широко используются для проекционных систем с лазерными источниками излучения, применяемых в комплексах космического базирования. Ключевой особенностью спекл-экрана является то, что несмотря на определенную длину волны записи голограммы, на этапе использования эффект диффузного рассеяния обеспечивается для излучения с произвольной длиной волны, в том числе и для белого света. Продемонстрирована технология регистрации спекл-экрана по осевой схеме в фото-термо-рефрактивном стекле. Произведен анализ параметров записывающего излучения, определено оптимальное время экспозиции.

Ключевые слова: *голографический спекл-экран, индикатриса рассеяния, фото-термо-рефрактивное стекло, управление излучением*

Введение

В последние годы наблюдается рост интереса к системам управления излучением в широком спектральном диапазоне, в частности к голографическим рассеивателям. Особое место среди них занимают голографические спекл-экраны, обладающие уникальным свойством формирования заданной индикатрисы рассеяния. Голографический спекл-экран формируется путем записи интерференционного паттерна, образованного спекловым полем, возникающим при рассеянии когерентного света на шероховатой поверхности или в случайной среде. В процессе записи фиксируется трехмерная интенсивностная структура этого поля, что позволяет впоследствии воспроизводить его статистические свойства при освещении зарегистрированной области.

Основным отличием голографического спекл-экрана от традиционных диффузоров является то, что форма индикатрисы рассеяния может быть целенаправленно сформирована в процессе записи. Это позволяет получать диффузоры с заданной угловой характеристикой, обеспечивающие, например, узкое или широкое угловое распределение рассеянного света [1, 2].

При воспроизведении структура функционирует как объемный дифракционный элемент, рассеивающий свет в соответствии с зафиксированным статистическим распределением. Поскольку запись происходит при использовании узкого спектра (обычно лазерного излучения), возникает вопрос универсальности рассеяния при других длинах волн. Как показывают исследования, при соблюдении определенных условий (например, в случае случайных фазовых структур с высокой пространственной частотой) рассеяние становится практически независимым от длины волны, вплоть до белого света.

В качестве среды записи все более широкое применение находят фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла, обладающие высоким разрешением, стабильностью и возможностью записи объемных фазовых структур [3, 4]. В данной работе продемонстрирована технология регистрации голографического спекл-экрана в ФТР-стекле по осевой схеме, а также проведен анализ влияния параметров записи на характеристики рассеяния [5].

Методика эксперимента

Запись голографического спекл-экрана осуществлялась по осевой схеме, в которой опорный и объектный пучки совмещены по направлению распространения. В качестве объекта использовалось спекловое поле, формируемое за счет диффузного отражения когерентного излучения от шероховатой поверхности. Это позволило обеспечить пространственно-хаотичную интерференционную картину с характерными размерами спеклов порядка 5–20 мкм в зависимости от параметров оптики и расстояния до рассеивателя.

Для записи применялся HeCd лазер с длиной волны $\boldsymbol{\lambda = 325}$ **нм**, стабильной выходной мощностью 20 **мВт** и хорошими пространственными характеристиками (TEM_{00}). Пучок лазера проходил через коллиматор и далее фокусировался на диффузирующую поверхность (матовое стекло или мелкодисперсную пластину), создавая спекловое поле. Свет, рассеянный в прямом направлении, экспонировал фото-термо-рефрактивное стекло, размещенное вблизи или непосредственно за рассеивателем [6]. Экспозиция варьировалась в диапазоне от 30 до 300 секунд с шагом 30 секунд. После экспонирования образцы подвергались термической обработке при температуре 500 °C в тече-

ние 10 часов для инициирования фототермохимических реакций, формирующих пространственные изменения показателя преломления. На рис. 1 представлена схематичное изображение оптической установки.

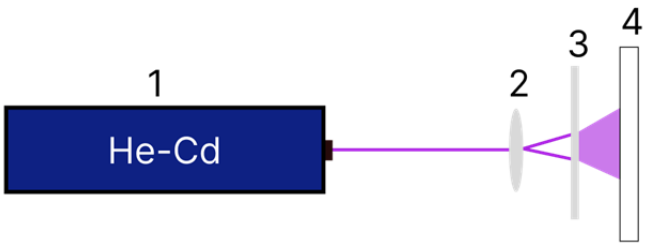


Рис. 1. Оптическая схема установки: 1 — He-Cd laser Kimmon IK3501R-G с длинной излучения 325 нм с номинальной мощностью 50 mW; 2 — рассеивающая линза; 3 — специально подготовленный рассеиватель; 4 — ФТР-стекло

Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальной оптической диагностики установлено, что наилучшее качество рассеяния достигается при экспозиции 120–150 секунд. Полученные голограммы демонстрируют устойчивую, симметричную индикатрису рассеяния с угловой шириной порядка 30–40°. Интенсивность рассеянного света оставалась стабильной в диапазоне длин волн 450–650 нм, включая белый свет. Спектральная независимость индикатрисы подтверждает дифракционную природу формирования спекловой структуры и возможность применения таких элементов в системах с различными источниками света. Повторяемость результатов подтверждена на нескольких образцах. На рис. 2 представлено фото голографического спекл-экрана и матового стекла.

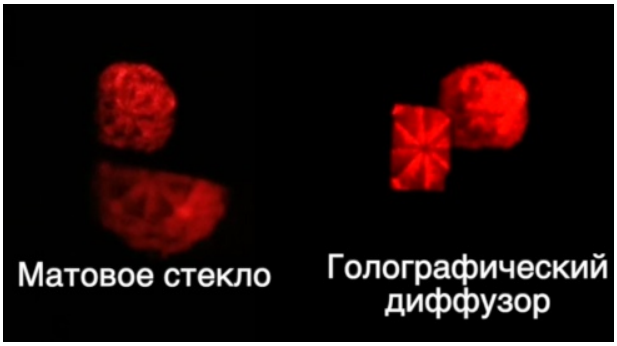


Рис. 2. Рассеяния света на спекл-экране

Заключение

В настоящей работе продемонстрирована технология регистрации голографического спекл-экрана в фото-термо-рефрактивном стекле по осевой схеме. Полученные экспериментальные результаты подтвердили возможность формирования устойчивых голографических структур с контролируемой индикатрисой рассеяния, обладающих спектральной универсальностью и высокой стабильностью.

Проведен анализ влияния параметров записи, в первую очередь времени экспозиции, на характеристики рассеяния. Установлено, что оптимальная экспозиция составляет 120–150 секунд. Полученные структуры демонстрируют симметричную, сглаженную индикатрису рассеяния с угловой шириной порядка 30–40°, пригодную для использования в системах равномерной подсветки.

Особое внимание уделено вопросу спектральной зависимости: показано, что форма углового распределения практически не изменяется при изменении длины волны зондирующего излучения, включая работу с белым светом. Это подтверждает применимость разработанного рассеивателя в широком спектральном диапазоне.

Разработанная методика может быть использована для создания голографических оптических элементов нового поколения, предназначенных для лазерных проекционных систем, в том числе в условиях космического или военного применения. Высокая воспроизводимость и устойчивость

структуры делают данный подход перспективным с точки зрения интеграции в прикладные оптические системы.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 075-03-2025-415).

Литература

[1] Nikonorov N. New Photo-Thermo-Refractive Glasses for Holographic Optical Elements: Properties and Applications // Holographic Materials and Optical Systems. 2017. https://doi.org/10.5772/66116

[2] *Glebov L.* Volume Holographic Elements in a Photo-Thermo-Refractive Glass // Journal of Holography and Speckle. 2009. Vol. 5. P. 77–84. https://doi.org/10.1166/jhs.2009.011

[3] *Freund I.* Joseph W. Goodman: Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications // Journal of Statistical Physics. 2008. Vol. 130. P. 413–414. https://doi.org/10.1007/s10955-007-9440-8

[4] *Pawluczyk R.* Holographic diffusers // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 1993. https://doi.org/10.1117/12.166350

[5] *Glebov L., Smirnov V.* Periodic structures in photo-thermo-refractive glasses induced by homogeneous UV irradiation // Optica Publishing Group. 1997. Paper JSuE.15.

[6] *Dorrer C., Zuegel J.D.* Design and analysis of binary beam shapers using error diffusion // J. Opt. Soc. Am. B 24. 2007. P. 1268–1275.

Holographic diffuser in photo-thermo-refractive glass

M.V. Gavrish[1], P.K. Rozanov[1], A.P. Pogoda[1], A.P. Nikonorov[2]

[1] *Baltic State Technical University "Voenmekh" D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia*
[2] *ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

Holographic diffusers with a controlled scattering indicatrix are widely used for projection systems with laser radiation sources applied in space-based complexes. The key feature of the diffuser is that despite a certain wavelength of hologram recording, at the stage of use the diffuse scattering effect is provided for radiation with random wavelength or even white light. The technology of diffusers registration according to the axial scheme in photo-thermo-refractive glass is demonstrated. The parameters of the recording radiation are analyzed, the optimal exposure time is determined.

Keywords: *holographic diffuser, scattering indicatrix, photo-thermo-refractive glass, radiation control*

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-03-2025-415).

Особенности спектров фотолюминесценции легированных кристаллов фосфида галлия

А.А. Скворцова, С.Г. Каленков

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Обнаружено, что при люминесценции кристаллов фосфида галлия p-GaP(Zn, O, N), возникающей под воздействием лазера с длиной волны 405 нм и мощностью не более 30 мВт, возбуждаются две полосы излучения — зеленая (λ = 565 нм), связанная с рекомбинацией на атомах N и красная (λ = 700 нм), связанная с примесями Zn и O. Рассматриваемые примесные центры с глубокими уровнями энергии в запрещенной зоне обладают большими временами жизни и возможностью существования в нескольких зарядовых состояниях. В работе установлена зависимость между величиной оптической мощности внешнего излучения и спектрами фотолюминесценции кристаллов легированного фосфида галлия. В частности показано, что при изменении оптической мощности лазера (λ = 405 нм), происходит перераспределение интенсивности между красной и зеленой линиями спектра фотолюминесценции исследуемых образцов: при низких мощностях (P < 5 мВт) тока зеленая люминесценция доминирует над красной, в то время как при больших P падающего лазерного излучения доминирует красная люминесценция. Таким образом, увеличение мощности внешнего излучения приводит к росту процессов излучательной рекомбинации в пользу Zn-O комплексов.

Ключевые слова: *фосфид галлия, примесные комплексы, фотолюминесценция, оптическая мощность лазерного излучения*

За последние годы спрос на полупроводниковые материалы непрерывно растет, что связано с их отличительными электрофизическими свойствами, а также широким диапазоном применения. Такой полупроводник, как GaP активно используется в целом ряде оптоэлектронных структур и устройств — начиная с фотоприемников и светодиодов, заканчивая солнечными батареями и инжекционными лазерами [1]. Известно, что GaP обладает рядом преимуществ, связанных с широкой запрещенной зоной (≈ 2,6 эВ при T = 300 K), благодаря которой полупроводник становится пригодным для применения в видимом свете. Кроме того следует отметить совместимость GaP с другими полупроводниковыми материалами: он используется в качестве подложки для выращивания полупроводников III-V групп для последующего изготовления гетероструктурных устройств [2, 3]. В отличие от материалов с прямой запрещенной зоной, которые излучают свет за счет прямой электронно-дырочной рекомбинации, непрямая запрещенная зона GaP приводит к более слабому спонтанному излучению. Однако легирование или наноструктурирование GaP может приводить к усилению процессов люминесценции [4], что дает возможность управления оптическими свойствами полупроводника.

Одним из способов «управления» является оптическая мощность. Но, стоит отметить, что работ по влиянию оптической мощности на люминесценцию кристаллов GaP мало, и во всех них обращено внимание на экспериментальные факты, без углубленного изучения физики наблюдаемого поведения полупроводника. Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование влияния оптической мощности на спектры люминесценции легтрованных кристаллов GaP.

В качестве объекта исследования выступали монокристаллические пластины p-GaP(Zn, O, N) диаметром 30 мм и толщиной 0,45 мм. Регистрация спектров люминесценции осуществлялось с помощью спектрофотометра OHSP-350. Оптическая мощность измерялась с помощью лазерного измерителя мощности UNI-T UT385. В проведенном намиэксперименте спектры люминесценции регистрировались по схеме, представленной на рис. 1. Возбуждение осуществлялось лазером с длиной волны 405 нм.

В полученных спектрах люминесценции, представленных на рис.2, видны две полосы: полоса флуоресценции с максимумом при λ_1=565 нм, зависящая от наличия соединений с азотом в объекте исследования, и полоса фосфоресценции с максимумом λ_2=700 нм, связанная с наличием Zn и O в образце [5].

Наблюдаемая экспериментальная картина (рис. 2) может быть условно разделена на несколько стадий: при увеличении оптической мощности с 4 до 60 мкВт интенсивность первого пика (λ_1=565 нм) растет и при $P_{опт}$ = 60 мкВт достигает максимума. При дальнейшем повышении мощности $P_{опт}$ (от 177 до 627 мкВт) наблюдается рост интенсивности второго пика (λ_2=700 нм). Особенно это заметно на кривых 5 и 6 рис. 2., а при $P_{опт}$ = 0,943 мВт интенсивность обоих пиков становится сопоставимой (кривые 7, 8 рис. 2). При последующем увеличении оптической мощности ($P_{опт}$ > 1 мВт) интенсивность второго пика (λ_2=700 нм) увеличивается. Наблюдаемые изменения спектров люминесценции связываются авторами с динамикой люминесцирующих центров: до-

стижение предела интенсивности свечения пика $\lambda 1$ говорит об ограниченности центров излучательной рекомбинации на основе азота, концентрация которого в кристалле ниже концентрации легирующей примеси (Zn). Поэтому при увеличении мощности возбуждающего лазера наблюдается плавный рост пика $\lambda 2$.

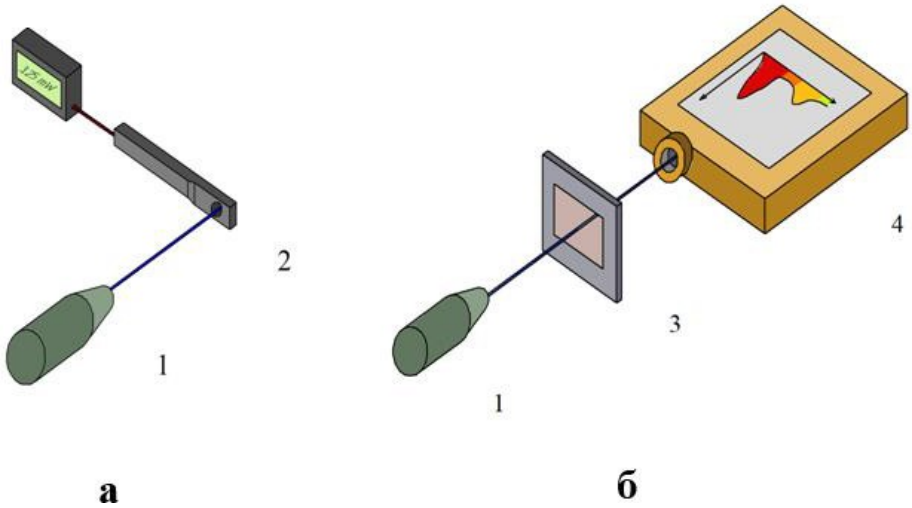


Рис. 1. Оптическая схема регистрации спектров люминесценции (1 — лазер, 2 — измеритель оптической мощности, 3 — держатель с образцом, 4 — спектрофотометр) в режиме: а — измерения мощности, б — регистрации спектров

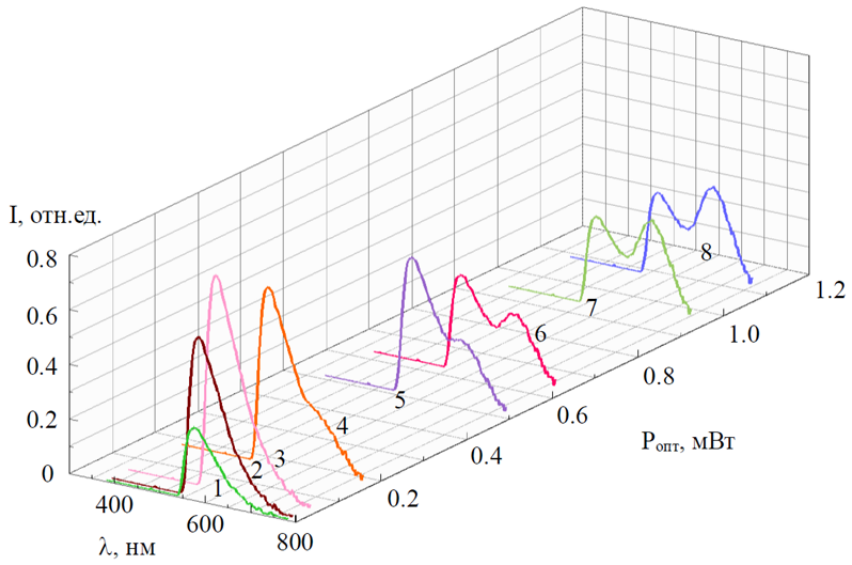


Рис. 2. График зависимости спектров люминесценции от оптической мощности падающего на образец излучения $P_{опт}$: 1 — 4 мкВт; 2 — 14 мкВт; 3 — 55 мкВт; 4 — 177 мкВт; 5 — 0,512 мВт; 6 — 0,627 мВт; 7 — 0,943 мВт; 8 — 1,086 мВт

Таким образом, в работе экспериментально обнаружено влияние оптической мощности на спектры люминесценции в кристаллах p-GaP:(Zn,N), связанной с состоянием и концентрацией центров люминесценции на основе примесных центров.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект FZRR-2023-0009).

Список источников

[1] *Mochalov L., Logunov A., Vorotyntsev V.* Preparation of gallium of the special purity for semiconductors and optoelectronics // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 258. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118001

[2] *Dvoretckaia L., Fedorov V., Pavlov A., Komarov S., Moiseev E., Miniv D., Kaveev A., Smirnov A., Kirilenko D., Mozharov A., Mukhin I.* Selective area epitaxy of gallium phosphide-based nanostructures on microsphere lithography-patterned Si wafers for visible light optoelectronics // Materials Research Bulletin. 2025. Vol. 182. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.113126

[3] *Assali A., Kanouni F., Zou Q., Khenata R.* Optical characteristics of dilute gallium phosphide bismide: Promising material for near-infra photonic device applications // Physics Letters A. 2020. Vol. 384. https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126147

[4] *Wang B.-P., Zhang Z.-C., Zhang N.* Fabrication and optical properties of gallium phosphide nanoparticulate thin film // Solid State Sciences. 2010. Vol. 12. P. 1188–1191. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.03.016

[5] *Pyshkin S., Ballato J., Bass M. et al.* Luminescence of long-term ordered pure and doped gallium phosphide // J. Electronic Mater. 2008. Vol. 37. P. 388–395. https://doi.org/10.1007/s11664-007-0375-2

Features of photoluminescence spectra of doped gallium phosphide crystals

A.A. Skvortsova, S.G. Kalenkov

Moscow polytechnic university, Moscow, Russia

It was found that during the luminescence of gallium phosphide crystals p-GaP(Zn, O, N), which occurs under the influence of a laser with a wavelength of 405 nm and a power of no more than 30 mW, two radiation bands are excited — green (λ = 565 nm), associated with recombination on N atoms, and red (λ = 700 nm), associated with impurities of Zn and O. The impurity centers under consideration with deep energy levels in the band gap have long lifetimes and the possibility of existing in several charge states. The work establishes a relationship between the optical power of external radiation and the photoluminescence spectra of crystals of doped gallium phosphide. In particular, it is shown that when the optical power of the laser changes (λ = 405 nm), the intensity is redistributed between the red and green lines of the photoluminescence spectrum of the studied samples: at low power (P < 5 mW) current, green luminescence dominates over red, while at high incident laser radiation, red luminescence dominates. Thus, an increase in the power of external radiation leads to an increase in the processes of radiative recombination in favor of Zn-O complexes.

Keywords: *gallium phosphide, impurity complexes, photoluminescence, optical power of laser radiation*

Алмазная ТГц антенна

М.С. Комленок, В.В. Кононенко, Т.В. Кононенко, А.А. Ушаков, А.П. Большаков

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

Легирование алмаза позволило использовать коммерчески доступные фемтосекундные (ФС) лазеры ИК-диапазона для оптической накачки фотопроводящих антенн вместо сложных УФ ФС лазеров для генерации фотоносителей в чистом алмазе. Однако продемонстрированная мощность генерируемого терагерцового излучения все еще далека от максимально доступного уровня. Основным ограничивающим фактором является то, что электроды, формирующие электрическое поле в алмазной подложке, расположены на поверхности алмаза, а уровень напряжения смещения ограничен электрическим пробоем по поверхности алмаза (20 кВ/см). В работе демонстрируется возможность заглубление проводящих структур в алмазную подложку для значительного увеличения электрического поля в антенне.

Ключевые слова: *алмаз, фотопроводящая антенна, ТГЦ излучение*

Введение

Создание компактных твердотельных источников импульсного терагерцового (ТГц) излучения, основанных на использовании фемтосекундных лазеров, дало мощный толчок развитию и применению многочисленных исследований, главным образом, в области спектроскопии, в медицине и системах безопасности.

На данный момент наиболее эффективными являются два механизма преобразования оптической частоты в терагерцовую: нелинейное оптическое выпрямление и инжекция носителей зарядов в фотопроводящих антеннах (ФПА). Каждый из этих методов наряду с важными достоинствами не свободен от серьезных недостатков, ограничивающих их применение в новых перспективных областях (дистанционное зондирование, широкополосная космическая связь и др.). С одной стороны, оптическое выпрямление обеспечивает высокие пиковые мощности субмиллиметрового излучения, но требует для накачки высокоэнергетические лазерные импульсы и технически не позволяет получить высокие частоты их повторения, т. е. имеет ограниченную производительность. ФПА потенциально являются более привлекательными источниками ТГц излучения, поскольку требуют гораздо меньших интенсивностей накачки и могут выдавать высокие мощности с существующими лазерами. ФПА работают при комнатной температуре без криогенного охлаждения. Они очень компактны и могут генерировать импульсы с высокой пиковой мощностью. GaAs быстро стал основной подложкой для фотопроводящих антенн благодаря таким свойствам, как относительно высокая диэлектрическая прочность, высокая подвижность носителей и оптимальная запрещенная зона. Эти ФПА стали широко использоваться в качестве ТГц излучателей и детекторов, и именно на их основе появились такие направления, как ТГц спектроскопия с временным разрешением и др. [1].

В ФПА высокое приложенное поле приводит к большой тепловой нагрузке из-за омических потерь фототока внутри материала (джоулева нагрева), к пробою диэлектрика и деградации материала. Чтобы решить эти проблемы, нужны полупроводники с большой электрической прочностью, высокой теплопроводностью и высокой подвижностью носителей. Поиск новых материалов для подложек ФПА идет непрерывно и на сегодняшний день основные узкозонные полупроводники в значительной мере изучены. Вместо традиционных узкозонных полупроводников предлагается использовать широкозонный алмаз, который обеспечит целый ряд преимуществ в конструкции ФПА за счет рекордной диэлектрической прочности (до 10 МВ/см) и высокой подвижности носителей заряда (~2000см^2/в/с).

Однако у алмаза имеется один существенный недостаток — относительно большая ширина запрещенной зоны 5,46 эВ. Для создания фотоносителей требуется УФ излучение или многофотонное поглощение. Нелинейное поглощение кардинально ухудшит эффективность преобразования оптического излучения в терагерцовое (до уровня оптических выпрямителей и хуже) и, фактически, не позволит работать со 100 мкДж накачкой. Фемтосекундная УФ накачка в принципе возможна — первая алмазная ФПА была продемонстрирована ранее именно в этом режиме [2]. Однако, с точки зрения стоимости и надежности такого эмиттера, такое решение является крайне неэффективным. Именно поэтому алмаз не использовался в качестве ФПА вплоть до недавнего времени, когда было показано, что легирование азотом и бором позволяет получить достаточное для насыщенной ТГц эмиссии количество носителей при 400 нм и 800 нм накачке (вторая и первая гармоники Ti-sapp лазера, соответственно) [3, 4]. Критическим аспектом формирования ФПА является получение в массиве кристалла близкорасположенных проводящих электродов. На данный момент показана прин-

ципиальная работоспособность алмазных ФПА и практически реализован ряд монодипольных антенн, т.е. устройств с одной щелью, напряженность статического поля смещения в которых не превышает 20 кВ/см и ограничена пробоем по поверхности. Такие антенны не реализуют потенциала алмазной подложки для достижения пиковой мощности. Их параметры не превышают параметров антенн из узкозонных полупроводников. Увеличение пиковой мощности заключается в реализации мультипольных антенн, т. е. антенн, содержащих множество эмиттеров на большой площади. Многократный рост интенсивности ТГц излучения достигается за счет уменьшения расстояния между электродами в каждом диполе и, соответствующего увеличения интенсивности статического электрического поля. Для использования всего потенциала алмаза необходимо создавать проводящие структуры в объеме алмаза и работать на пределе порога пробоя, не превышая 10 МВ/см.

В работе продемонстрирована возможность инкапсуляции электродов по планарной технологии, которая объединяет ряд операций на поверхности подложки, позволяя получать структуру типа сандвич с различной структурой слоев. В минимальной конфигурации на поверхности алмаза создаются графитизированные лазером или осажденные в вакууме через маску металлические дорожки. На следующем этапе происходит заращивание поверхности слоем алмаза методом газофазного осаждения. Получаемый слой на алмазе растет эпитаксиально и сохраняет его электропрочностные характеристики. Эта технология удобна тем, что позволит создавать структурированные слои шаг за шагом, конструируя, например, маску для отсечения противофазных диполей или набор скрещенных электродов для управления поляризацией ТГц поля.

Благодарность

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00796.

Список источников

[1] *Grischkowsky D. et al.* Farinfrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // Journal of the Optical Society of America B. 1990. Vol. 7 (10). P. 2006–2015.

[2] *Yoneda H. et al.* High-power terahertz radiation emitter with a diamond photoconductive switch array // Applied Optics. 2001. Vol. 40. P. 6733–6736.

[3] *Chizhov P.A. et al.* Photoconductive terahertz generation in nitrogen-doped single-crystal diamond // Optics Letters. 2022. Vol. 47 (1). P. 86–89.

[4] *Кононенко В.В. и др.* Генерация терагерцевого излучения в легированном бором алмазе // Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 1. С. 74–78.

Diamond terahertz antenna

M.S. Komlenok, V.V. Kononenko, T.V. Kononenko, A.A. Ushakov, A.P. Bolshakov

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Diamond doping has made it possible to use commercially available IR femtosecond (FS) lasers for optical pumping of photoconductive antennas instead of complex UV FS lasers for generating photocarriers in pure diamond. However, the demonstrated power of the generated terahertz radiation is still far from the maximum accessible level. The main limiting factor is that the electrodes forming the electric field in the diamond substrate are located on the diamond surface, and the bias voltage level is limited by the electrical breakdown along the diamond surface (20 kV/cm). In this paper, we demonstrate the possibility of deepening conductive structures into the diamond substrate to significantly increase the electric field in the antenna.

Keywords: *diamond, photoconductive antenna, THZ radiation*

Газогирохромизм оксидированных нанопленок пермаллоя

Д.П. Куликова[1], К.Н. Афанасьев[1, 2], А.В. Барышев[1]

[1] Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, Россия
[2] Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия

В работе исследуются оптические и магнитооптические свойства термически отожженных нанопленок пермаллоя. Установлено, что магнитооптическая добротность образцов возрастает более чем на порядок в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне для оптимальной температуры отжига. Впервые экспериментально продемонстрировано изменение величин фарадеевского вращения и магнитного кругового дихроизма магнитного оксида — окисленного пермаллоя с платиновым катализатором — в водородосодержащей атмосфере. Магнитооптические свойства материала после воздействия H_2 не возвращаются в исходное состояние в воздухе ввиду образования гидроксидов. Дополнительный нагрев при 300 °C приводит к восстановлению чувствительности нанопленок к водороду. Показано, что наблюдаемый отклик является невзаимным магнитооптическим явлением газогирохромизма.

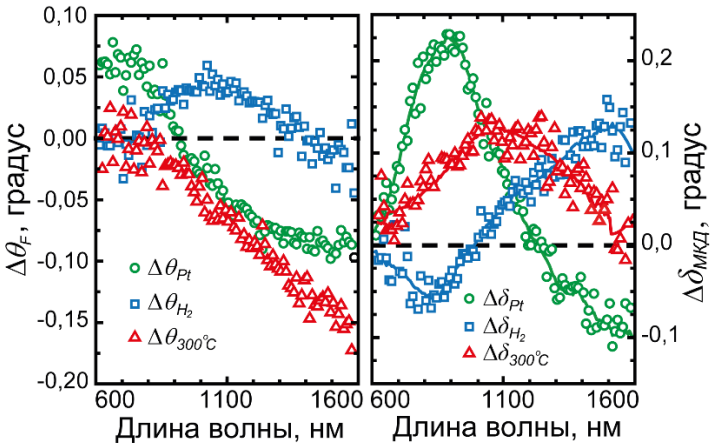
Ключевые слова: *пермаллой, нанопленки, эффект Фарадея, магнитный круговой дихроизм, водородосодержащая атмосфера, сенсор водорода*

В связи с поиском альтернативных источников энергии в настоящее время во всем мире активно развивается водородная энергетика. Данный факт обуславливает необходимость разработки сенсоров водорода, отвечающих требованиям к высокой чувствительности, селективности и безопасности [1]. Оптические датчики газов обладают рядом преимуществ — одним из них является возможность реализации удаленного мониторинга. В таких сенсорах в качестве чувствительного элемента используются газохромные материалы, диэлектрическая проницаемость которых изменяется при взаимодействии с целевым газом [2]. Таким образом, амплитуда электромагнитной волны, прошедшей через или отраженной от данного материала, также изменяется, что регистрируется детектором. Существует возможность использования в качестве полезного сигнала поляризационного состояния света. В данном контексте представляют интерес эффект Фарадея и магнитный круговой дихроизм (МКД) — поворот плоскости поляризации и появление эллиптичности, соответственно, у световой волны, прошедшей через магнитную среду. Ввиду невзаимности описанных явлений существует возможность усиления (накопления) эффекта в многопроходных схемах. До настоящей работы в литературе были описаны исследования магнитооптического отклика на водород структур, представляющих собой сплав или многослойные системы на основе магнитного (Co, Fe) и каталитического (Pt, Pd) металлов [3, 4], что связано с большими оптическими потерями. Для применений перспективно использование в качестве газочувствительных материалов магнитооптических оксидов, прозрачных в оптическом диапазоне. С точки зрения фундаментальной науки исследование влияния водорода на магнитную подсистему оксидов также представляет интерес. Настоящая работа посвящена исследованию трансформации оптических и магнитооптических свойств нанопленок пермаллоя как при их термическом отжиге в воздухе, так и при взаимодействии с водородом.

Образцы представляли собой нанопленки пермаллоя толщиной 40 нм на стеклянных подложках. Они были отожжены в воздухе в течение часа в диапазоне температур 300–475 °C. Установлено, что при увеличении температуры отжига возрастало пропускание и угол фарадеевского вращения (УФВ) нанопленок [5]: в ближней инфракрасной области спектра УФВ увеличивался более чем на порядок (с 0,03° до 0,52°). Важно отметить, что максимальное значение УФВ соответствовало пленке, отожженной при 425 °C (далее — $NiFeO_x$), а при дальнейшем увеличении температуры отжига происходило его стремительное уменьшение до нуля. Наблюдаемый рост магнитооптической добротности отожженных нанопленок пермаллоя обусловлен формированием оксидных фаз металлов с градиентным распределением по толщине и, в частности, магнитной фазы, где ионы Fe^{2+} располагаются в октаэдрических позициях в кристаллической решетке.

Так как образец $NiFeO_x$, отожженный при 425 °C, характеризовался наибольшим УФВ, на него был осажден слой каталитического металла — платины — толщиной 5 нм. Это привело к изменению как фарадеевского вращения, так и величины МКД (рисунок). Обнаружено, что при восстановлении $NiFeO_x$/Pt в водородосодержащей атмосфере (0,5 об. % H_2 в N_2) также произошла трансформация магнитооптических свойств [6]. Максимальное изменение величины УФВ составило $\Delta\theta_{H2}$ = 0,05 градуса на длине волны 1040 нм, а МКД — $\Delta\delta_{H2}$ = 0,13 градуса на длине волны 1500 нм. После взаимодействия с H_2 магнитооптические свойства нанопленок оставались стабильными в течение

месяцев, т. е. обратная реакция окисления образца в воздухе не происходила, что может быть связано с образованием гидроксидов, Fe–O–H связи в которых разрушаются с помощью высокотемпературного нагрева [7]. Был произведен отжиг восстановленной нанопленки $NiFeO_x$/Pt при 300 °C в течение 30 минут — это привело к уменьшению УФВ в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне и, наоборот, к росту МКД с максимумом на 1100 нм. Наблюдаемые особенности обусловлены увеличением степени окисления магнитных ионов в материале.



Разностные величины угла фарадеевского вращения (слева) и магнитного кругового дихроизма (справа), обусловленные осаждением слоя Pt на пленку $NiFeO_x$ ($\Delta\theta,\delta_{Pt}$), восстановлением двухслойной системы $NiFeO_x$/Pt ($\Delta\theta,\delta_{H2}$) и ее последующим отжигом при 300 °C ($\Delta\theta,\delta_{300°C}$).

С целью подтверждения влияния водорода на магнитный момент вещества магнитооптический отклик исходной нанопленки $NiFeO_x$/Pt и нанопленки, восстановленной в H_2, был измерен в многопроходной схеме, состоящей из двух зеркал, в которой реализуется трехкратное прохождение света через образец. Было установлено, что изменение УФВ, обусловленное влиянием водорода, увеличивается в 3 раза в таком режиме, что подтверждает невзаимную природу наблюдаемого явления — газогирохромизма.

Таким образом, в работе впервые продемонстрирован газогирохромный эффект в случае магнитного оксида, проявляющийся как в изменении угла фарадеевского вращения, так и величины магнитного кругового дихроизма. Детектирование водорода с использованием подобных материалов открывает новые возможности для совершенствования характеристик сенсоров и ставит новые вопросы в исследованиях в области физики магнитных материалов.

Список источников

[1] *Swager T.M. et al.* Critical sensing modalities for hydrogen: technical needs and status of the field to support a changing energy landscape // ACS Sensors. 2024. Vol. 9. № 5. С. 2205–2227.

[2] *Liu H. et al.* Gasochromic hydrogen sensors: fundamentals, recent advances, and perspectives // Sensors & Materials. 2023. Vol. 35. № 1. С. 39–73.

[3] *Chang P.-C. et al.* Visualizing hydrogen diffusion in magnetic film through magneto-optical Kerr effect // Communications Chemistry. 2019. Vol. 2. № 1. Art. no. 89.

[4] *Loung H.M. et al.* Ultra-fast and sensitive magneto-optical hydrogen sensors using a magnetic nano-cap array // Nano Energy. 2023. Vol. 109. Art. no. 108332.

[5] *Kulikova D.P. et al.* Transformation of magneto-optical figure of merit for permalloy nanofilms upon oxidation // Optical Materials. 2020. Vol. 107. Art. no. 110067.

[6] *Kulikova D.P. et al.* Faraday effect of oxidized permalloy nanofilms upon hydrogenation // Applied Surface Science. 2023. Vol. 613. Art. no. 155937.

[7] *Турова Н.Я.* Неорганическая химия в таблицах. М.: Высший химический колледж РАН, 1997. 115 с.

Gasogyrochromism of oxidized Permalloy nanofilms

D.P. Kulikova[1], K.N. Afanasyev[1, 2], A.V. Baryshev[1]

[1] *Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia*
[2] *Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia*

The optical and magneto-optical properties of thermally annealed Permalloy nanofilms are investigated. We have found that the magneto-optical figure of merit of the samples increases by more than an order of magnitude in the near-infrared spectral range for the optimal annealing temperature. For the first time, the influence of a hydrogen-rich atmosphere on the magnitudes of the Faraday rotation and magnetic circular dichroism in a magnetic oxide-oxidized Permalloy with a Pt catalystis experimentally demonstrated. It appears that, after exposure to H_2, the properties of the material do not return to their initial state in air due to the formation of hydroxides. Additional heating at 300 °C restores the sensitivity of the nanofilms to hydrogen. The observed gasogyrochromic effect is shown to be a non-reciprocal magneto-optical phenomenon.

Keywords: *Permalloy, nanofilms, Faraday effect, magnetic circular dichroism, hydrogen-rich atmosphere, hydrogen gas sensor*

Гибридный фоторезистивный материал на основе гидролитически устойчивых тиол-силоксановых олигомеров

Д.И. Деревянко[1], В.В. Шелковников[1, 2]

[1] *Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия*
[2] *Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

Путем золь-гель процесса получены тиол-силоксановые олигомеры. В результате фотополимеризации созданы пленки гибридного органо-неорганического полимера на основе тетраакрилатного мономера и тиол-силоксановых олигомеров при повышенной влажности окружающей атмосферы. При влажности окружающей атмосферы 40 % были получены микроструктуры с периодом d ≈ 1,4 мкм и толщиной T ≈ 1 мкм.

Ключевые слова: *гибридный фотополимерный материал, золь-гель технология дифракционные оптические элементы*

В современных условиях интенсивного развития биотехнологий, оптических систем коммуникации и обработки данных, дифракционной и волноводной оптики выдвигается ряд повышенных требований, как к компонентной базе, так и к оптическим материалам, из которых они изготовлены. На сегодняшний день активно разрабатывают и исследуют гибридные фотополимерные органически-неорганические материалы для изготовления микрооптических и дифракционных компонентов. Гибридные фотополимерные материалы имеют встроенные блоки органических и неорганических соединений, такая модификация структуры полимера позволяет в широком диапазоне изменять свойства формируемого материала, сочетая свойства неорганических (твердость, температурная и химическая стойкость) и органических (пластичность, гидрофобность) соединений, а также обеспечить малую усадку и термическую устойчивость отвержденных фотополимеров более 200 °C [1].

В [2] был получен ФГКМ на основе тетраакрилатного мономера (ТА) и тиол-силоксановых соединений (ТС). Однако синтезированные тиол-силоксановые соединения были неустойчивы к гидролитической конденсации, что накладывало ограничения на получение прозрачных пленок при влажности окружающей атмосферы более 30 % [3]. В данной работе ТС были синтезированы с помощью золь-гель технологии. Синтез ТС осуществляли по методике: гидроксильные группы (–OH) в ДФСД, которые частично заряжены отрицательно, облегчают нуклеофильную атаку на частичный заряд Si в ТМС и последующую процедуру перехода водорода в метоксигруппы (–OCH3), в результате образуется набор ТС-олигомеров и метанол в качестве побочного продукта (рис. 1). Данные соединения позволили получить прозрачные пленки при влажности окружающей атмосферы 40 % (рис. 2.).

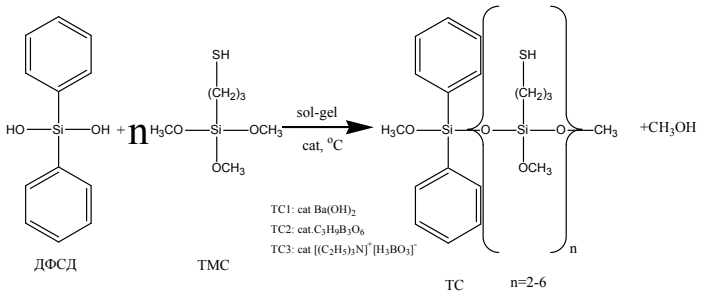


Рис. 1. Структурная формула амин-силоксанового соединения

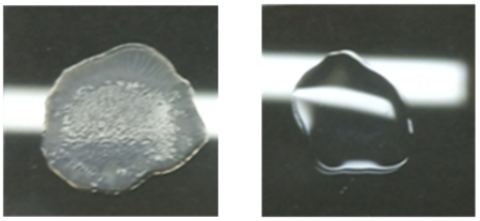


Рис. 2. Фотографии неотвержденных гибридных пленок при влажности более 30 %: а) ТС [3]; б) ТС синтезированный золь-гель технологией

На основе полученных соединений была создана гибридная фоторезистивная композиция [3] и по близкой методике, описанной в [4], при влажности окружающей атмосферы 40 %, с помощью голографической записи, были получены микроструктуры с периодом d ≈ 1,5 мкм и толщиной T ≈ 1 мкм (рис. 3).

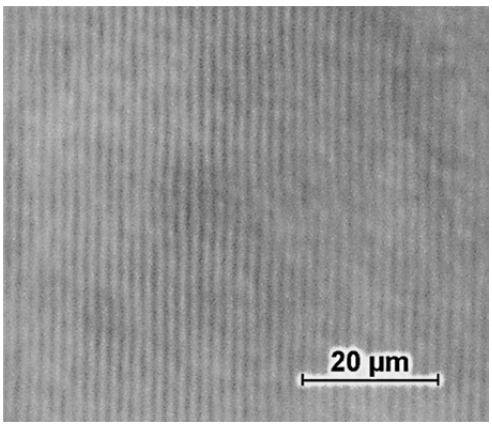


Рис. 3. Фотография голографической решетки

Список источников

[1] Micro resist technology GmbH. URL: https://www.microresist.de (accessed 30.05.2025).

[2] *Shelkovnikov V. et al.* Synthesis and thermomechanical properties of hybrid photopolymer films based on the thiol-siloxane and acrylate oligomers // Journal of Materials Science. 2015. Vol. 50. № 23. P. 7544–7556.

[3] *Деревянко Д.И. и др.* Гибридный фотополимерный материал на основе (8-акрилоил-1,4-дитиа-8-азаспиро[4.5]декан-2-ил)метил акрилата и тиол-силоксанового компонента для записи микроструктур: синтез, оптические и термомеханические свойства // Высокомолекулярные соединения. 2020. Т. 62. № 5. С. 382–394.

[4] *Миронников* Н.Г. и др. Исследование оптических и термооптических характеристик гибридного фотополимерного материала на основе тиол-силоксановых и акрилатных олигомеров // Автометрия. 2016. № 2. С. 88–96.

Hybrid photoresistive material based on hydrolytically stable thiol-siloxane oligomers

D.I. Derevianko[1], V.V. Shelkovnikov[1, 2]

[1] *N.N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*
[2] *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Thiol-siloxane oligomers were obtained by the sol-gel process. As a result of photopolymerization, films of a hybrid organo-inorganic polymer based on a tetraacrylate monomer and thiol-siloxane oligomers were created at elevated humidity of the surrounding atmosphere. At 40 % humidity of the surrounding atmosphere, microstructures with a period of d ≈ 1.4 μm and a thickness of T ≈ 1 μm were obtained.

Keywords: *hybrid photopolymer material, sol-gel technology, diffractive optical elements*

Органические фототранзисторы на основе полииндола и пирролидинофуллерена: структура и вольтамперные характеристики

Р.Б. Салихов, А.Д. Остальцова, И.Н. Муллагалиев, Т.Р. Салихов

Уфимский университет науки и технологий, кафедра электроники и физики наноструктур, Уфа, Россия

Исследованы оптоэлектронные свойства нового полимерного материала — поли[2-этил-3-метилиндола] — в сочетании с пирролидинофуллереном для создания органических фототранзисторов. Методом центрифугирования получены тонкие пленки толщиной 400–500 нм, на основе которых изготовлены полевые транзисторы с алюминиевыми электродами. Проведены измерения вольтамперных характеристик в темновом режиме и под воздействием УФ-излучения (350 нм), показавшие увеличение фототока на три порядка. Установлено, что разработанные структуры стабильно работают в воздушной среде, что упрощает их применение в органической электронике. Результаты демонстрируют перспективность использования данных материалов в оптронах и фотосенсорах

Ключевые слова: *полииндол, пирролидинофуллерен, органические фототранзисторы, подвижность носителей заряда, уф-фотоотклик, печатная электроника*

Развитие органической электроники открывает новые возможности для создания гибких, дешевых и энергоэффективных оптоэлектронных устройств. Особый интерес представляют полимерные материалы и производные фуллеренов, сочетающие высокую фоточувствительность с технологичностью обработки. В данной работе исследуется поли[2-этил-3-метилиндол] — перспективный проводящий полимер (рис. 1), способный формировать стабильные тонкие пленки, а также его комбинация с пирролидинофуллереном (рис. 1), улучшающим транспорт заряда [1–5].

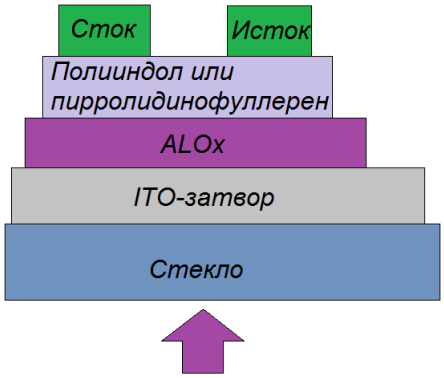


Рис. 1. Структура образца фототранзистора на основе полииндола или пирролидинофуллерена

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки фотоактивных материалов, не требующих инертной атмосферы, что критично для массового производства. Цель исследования — изучение фототранзисторов на основе этих материалов, включая их вольтамперные характеристики (рис. 2).

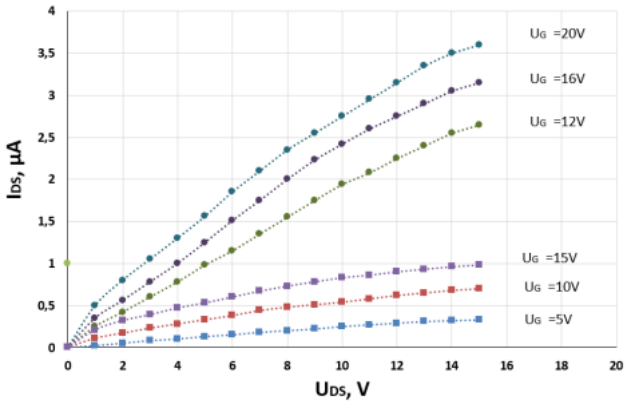


Рис. 2. Семейство выходных характеристик (для пирролидинофуллена — круглые точки, для полииндола — квадратные точки)

Показано, что предложенные структуры обладают высокой чувствительностью к УФ-излучению (350 нм) с резким ростом тока при облучении, а их изготовление совместимо с методами печатной электроники. Результаты работы могут быть использованы при создании органических фотодетекторов и сенсоров нового поколения [6–10].

Благодарность

Исследование финансировалось при поддержке государственного задания (научный код FZWU-2023-0002).

Список источников

[1] *Shirakawa H., Louis E.J., MacDiarmid A.G., Chiang C.K., Heeger A.J.* Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of polyacetylene, (CH)x // J. Chem. Soc., Chem. Comm. 1977. Vol. 16. P. 578–580.

[2] *Pathiranage T.M., Dissanayake D.S., Niermann C.N., Ren Y., Biewer M.C., Stefan M.C.* Role of polythiophenes as electroactive materials // J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem. 2017. Vol. 55. P. 3327–3346.

[3] *Sakthivel S., Boopathi A.* Structural and morphological characterizations of poly (p-phenylene vinylene) thin film by spin coating application of polymer LED // J. Pure Applied and Industrial Physics. 2016. Vol. 6, No. 3. P. 29–33.

[4] *Latypova L.R., Andriianova A.N., Salikhov S.M., Mullagaliev I.N., Salikhov R.B., Abdrakhmanov I.B., Mustafin A.G.* Synthesis and physicochemical properties of poly[2-(2-chloro-1-methylbut-2-en-1-yl)aniline] obtained with various dopants // Polymer International. 2020. Vol. 69. P. 804–812.

[5] *Latypova L.R., Andriianova A.N., Usmanova G.S., Salikhov R.B., Mustafin A.G.* Influence of copolymer composition on the properties of soluble poly(aniline-co-2-[2-chloro-1-methylbut-2-en-1-yl]aniline)s // Polymer International. 2023. Vol. 4. P. 440–450.

[6] *Salikhov R.B., Lachinov A.N., Rakhmeyev R.G.* Electrical properties of heterostructure Si/poly(diphenylenephthalide)/Cu // Journal of Applied Physics. 2007. Vol. 101, No. 5. Art. no. 053704.

[7] *Hassanien R., Al-Hinai M., Farha Al-Said S.A., Little R., Šiller L., Wright N.G., Houlton A., Horrocks B.R.* Preparation and characterization of conductive and photoluminescent DNA-templated polyindole nanowires // ACS Nano. 2010. Vol. 4. P. 2149–2159.

[8] *Xu J.K., Nie G.M., Zhang S.S., Han X.J., Hou J., Pu S.Z.* Electrosyntheses of freestanding polyindole films in boron trifluoride diethyl etherate // J. Polym. Sci. Polym. Chem. 2005. Vol. 43. P. 1444–1453.

[9] *Abthagir P.S., Saraswathi R.* Electronic properties of polyindole and polycarbazole Schottky diodes // Organic Electronics. 2004. Vol. 5. P. 299–308.

[10] *Sadretdinova Z.R., Akhmetov A.R., Salikhov R.B., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R.* 1,2,3-Triazolylfullerene-based n-type semiconductor materials for organic field-effect transistors // Mendeleev Communications. 2023. Vol. 33. No. 3. P. 320–322.

Organic phototransistors based on polyindole and pyrrolidinofullerene: characteristics and photoresponse kinetics

R.B. Salikhov, A.D. Ostaltsova, T.R. Salikhov

Ufa University of Science and Technology, Department of Electronics and Physics of Nanostructures, Ufa, Russia

The optoelectronic properties of a new polymer material, poly[2-ethyl-3-methylindole], were studied in combination with pyrrolidinofullerene to create organic phototransistors. Thin films 400–500 nm thick were obtained by centrifugation, on the basis of which field-effect transistors with aluminum electrodes were manufactured. The current-voltage characteristics were measured in the dark mode and under the influence of UV radiation (350 nm), which showed an increase in the photocurrent by three orders of magnitude. The mobility of charge carriers was determined and the kinetics of the photoresponse was studied. It was found that the developed structures operate stably in an air environment, which simplifies their use in organic electronics. The results demonstrate the promise of using these materials in optocouplers and photosensors.

Keywords: *polyindole, pyrrolidinofullerene, organic phototransistors, charge carrier mobility, UV photoresponse, printed electronics*

Материал «Диффен» за границами стандартных условий получения голограмм

О.В. Андреева, А.А. Парамонов, Н.В. Андреева, С.А. Сизова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Представлено экспериментальное исследование параметров мультиплексных голограмм, полученных на образцах полимерного материала «Диффен» (модификация регистрирующей среды на основе полиметилметакрилата с фенантренхиноном в качестве светочувствительного элемента, ФХ/ПММА), толщиной более 2 мм. Запись на 488 нм (стандарт) и 530 нм. Постэкспозиционный прогрев при 50 град. в течение 50 час (стандарт) и до 300 час.

Ключевые слова: *оптика, голография, регистрирующие среды, трехмерные мультиплексные голограммы*

Полимерный регистрирующий материал на основе органического красителя фенантренхинона (ФХ), внедренного в матрицу полиметилметакрилата (ПММА), был предложен в конце XX-го века [1]. Среда ФХ/ПММА сразу заняла ведущее место среди материалов, перспективных для создания архивной голографической памяти. В коллективе среда подверглась изучению и отработке технологического режима [1]. В результате был создан вариант среды ФХ/ПММА, «Диффен» (от слов ДИФфузионный и ФЕНантренхинон). Синтез материала был отработан для получения образцов такой твердости, чтобы за время постэкспозиционного прогрева (50 град. в течение 50 часов) неэкспонированные молекулы ФХ равномерно распределились внутри образца при $\lambda_{рег}$ = 488 нм и пространственной частоте более 100 мм$^{-1}$, при этом сохраняя интерференционную структуру в течение длительного времени (годы). Образцы изготавливались в лабораторных условиях и были востребованы в научно-исследовательских и учебных целях.

В данной работе приведены экспериментальные результаты, полученные на образцах большой толщины (2,5–3,0)мм, которые планировалось использовать для работ по созданию архивной голографической памяти (образцы были подготовлены, но проекты не получили поддержки). Поэтому объектом исследования стали мультиплексные голограммы, полученные методом углового мультиплексирования при записи последовательно на одном участке образца первой, второй и третьей голограммы с пространственной частотой 350 мм$^{-1}$. Запись производилась на длине волны, ($\lambda_{рег}$) 488 нм (голограмма М1) и $\lambda_{рег}$ = 532 нм (голограмма М2). Измерение параметров производилось излучением 655 нм.

На рис. 1 приведены спектры поглощения образцов толщиной 0,4 и 1,2 мм. В экспериментах использованы более толстые образцы, спектры поглощения которых обладают существенно большими значениями оптической плотности.

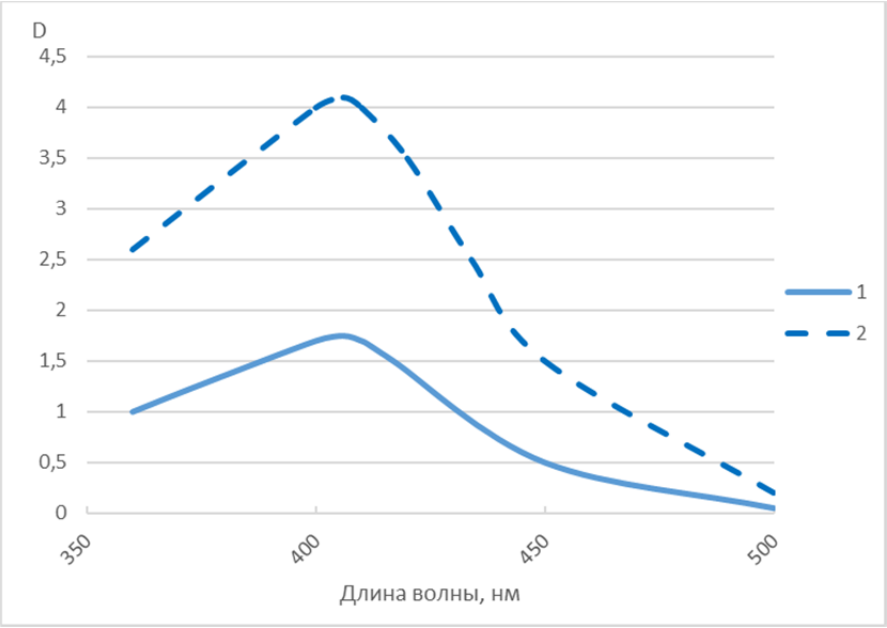


Рис. 1. Спектры поглощения образцов толщиной 0,4 мм (1) и 1,2 (2) мм в области спектральной чувствительности материала Диффен

Результаты, полученные на образце толщиной 2,9 мм при записи голограммы М1 представлены на рис. 2 и в табл. 1.

Таблица 1. Параметры одиночных голограмм (1, 2, 3), составляющих мультиплексную голограмму М1. $\lambda_{рег}$ = 488 нм. Толщина образца Т= 2,9 мм

Номер голограммы	Параметр	Значение
1	Н	1,2 дж/см^2
2	Н	1,1 дж/см^2
3	Н	1,0 дж/см^2
1	Δτ	37 %
2	Δτ	31 %
3	Δτ	22 %
1	ДЭ	58 %
2	ДЭ	70 %
3	ДЭ	70 %
1	Прогрев	250 час
2	Прогрев	250 час
3	Прогрев	250 час
1	Δθ	2,2±0,2 мрад
2	Δθ	1,85±0,2 мрад
3	Δθ	1,85±0,2 мрад

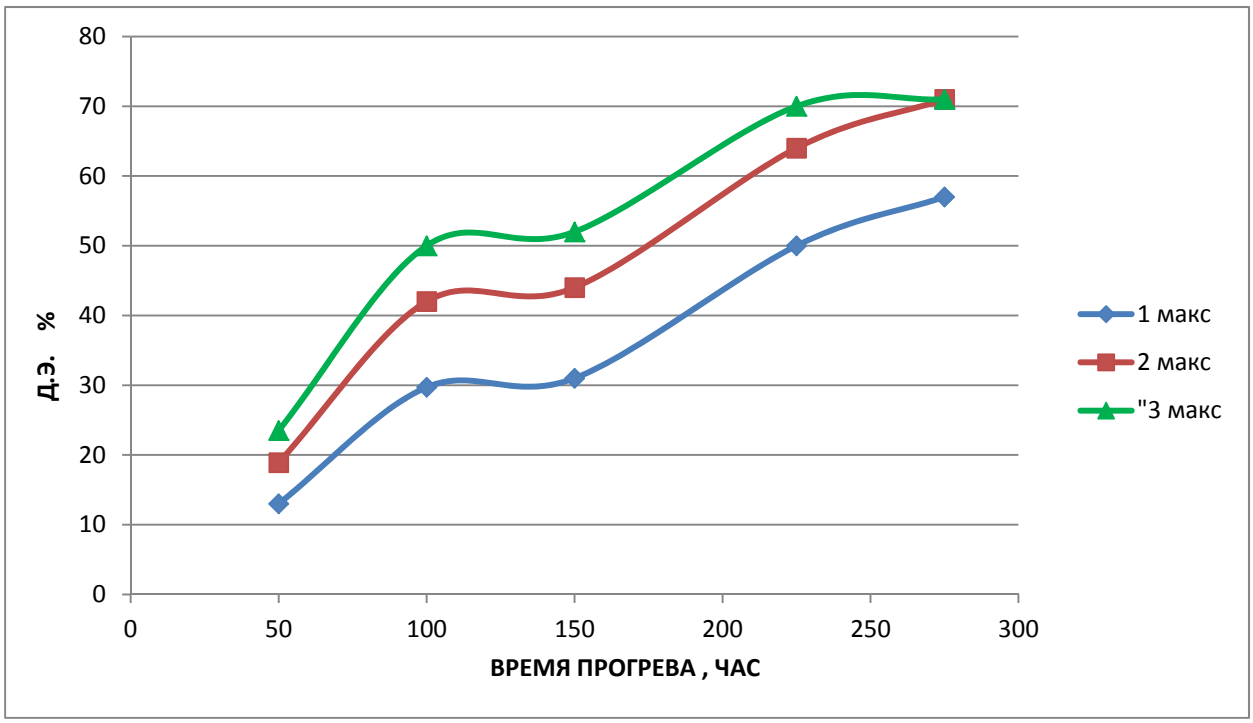


Рис. 2. Голограмма М1. Зависимость ДЭ от времени прогрева при 50 °С

Как показали проведенные эксперименты все полученные голограммы имеют «аподизированный контур» угловой селективности (контур не имеет «боковых лепестков») и его невозможно анализировать с помощью теории связанных волн из-за сильной неоднородности амплитуды модуляции голограммы по толщине, в отличие от образцов с меньшей толщиной [2]. При этом дифракционная эффективность (ДЭ) одиночных голограмм при стандартных условиях постэкспозиционного прогрева не превышает 25 %. Дальнейшее увеличение времени прогрева при той же температуре ведет к увеличению ДЭ. что связано с диффузией неэкспонированных молекул ФХ в объеме образца и все более равномерному распределению ФХ при практически неизменном конту-

ре угловой селективности, который сформирован решеткой из молекул фотопродукта (ФП). При этом ДЭ одиночных голограмм увеличивается при записи каждой последующей что наблюдается на всех образцах данного материала.

Как показывают спектры оптической плотности (рис. 1) чувствительность образцов ФХ/ПММА ограничена длинноволновой границей поглощения и находится в области $\lambda < 530$ нм (максимум поглощения при $\lambda = 406$ нм). Тем не менее идея использовать диапазон длин волн ~ 530 нм, хорошо обеспеченный лазерами различной модификации, для записи голограмм на материале ФХ/ПММА является очень привлекательной и мы осуществили эту идею. записав голограмму М2 на образце того же синтеза, что и М1. В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты проведенного эксперимента.

Таблица 2. Параметры одиночных голограмм (1, 2, 3), составляющих мультиплексную голограмму № М2. $\lambda_{рег}$ = 532 нм. Толщина образца Т= 2,75 мм

Номер голограммы	Параметр	Значение
1	Н	15 дж/см^2
2	Н	15 дж/см^2
3	Н	15 дж/см^2
1	Δτ	3,5 %
2	Δτ	–
3	Δτ	1,5 %
1	ДЭ	22 %
2	ДЭ	16 %
3	ДЭ	13 %
1	Прогрев	150 час
2	Прогрев	150 час
3	Прогрев	150 час
1	Δθ	1,9±0,2 мрад
2	Δθ	1,9±0,2 мрад
3	Δθ	1,8±0,2 мрад

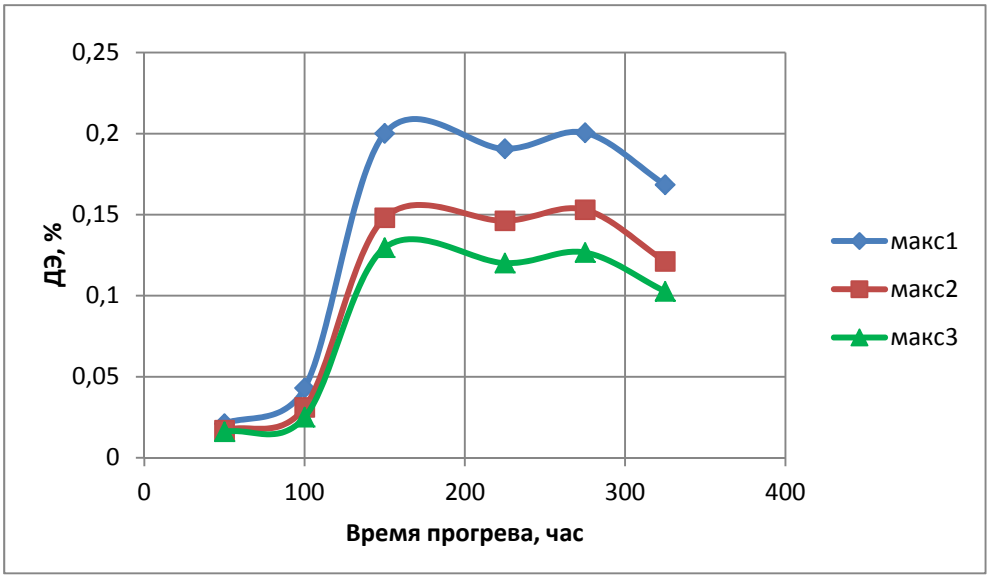


Рис. 3. Голограмма М2. Зависимость ДЭ от времени прогрева при 50 °С

Как и ожидалось, плотность мощности излучения при записи голограмм за границами основного спектра поглощения ФХ пришлось увеличить более чем на порядок и увеличить время постэкспозиционного прогрева — более 300 часов. Однако ДЭ не вышла за рамки 25 % и, достигая максимального значения при прогреве 150 часов, далее не увеличивалась. При этом с увеличением номера записи ДЭ снижалась, как это видно на рис. 3. Такое поведение указывает на то, что меха-

низмы записи голограмм М1 и М2 различны. На это же указывает и величина $\Delta\tau$ — изменение пропускания образца в процессе записи голограммы. $\Delta\tau = (\tau_2 - \tau_1)/\tau_1$, где τ_1 — пропускание образца до начала записи голограммы, τ_2 — после окончания. Пропускание образца во время записи голограммы на 530 нм в отличие от записи на 488 (см. табл. 1), изменяется незначительно, что говорит о том, что в данном случае формирование голограммы-решетки происходит не за счет преобразования ФХ в ФП, а за счет других механизмов. Возможно, что высокая плотность мощности излучения в данном случае формирует структуру голограммы за счет изменения структуры прозрачного полимера ПММА.

Заключение

Полимерный материал ФХ/ПММА и его модификация — материал Диффен — не теряют своей значимости и в XXI веке. Новые технологические вызовы могут возродить интерес к светочувствительным полимерным материалам и к использованию тех красивых научных идей, которые легли в основу этой отечественной разработки.

Список источников

[1] *Вениаминов А.В., Гончаров В.Ф., Попов А.П.* Усиление голограмм за счет диффузионной деструкции противофазных периодических структур // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 70. № 4. С. 864–869.

[2] *Андреева О.В. и др.* Объемные пропускающие голограммы в полимерной среде с фенантренхиноном // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 12. С. 27–33.

Material “Difphen” beyond standard conditions for obtaining holograms

O.V. Andreeva, A.A. Paramonov, N.V. Andreeva, S.A. Sizova

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Experimental research of the parameters of multiplex holograms obtained on samples of the polymer material “Diphfen” (modification of the recording medium based on polymethyl methacrylate with phenanthrenequinone as a light-sensitive element, PQ/PMMA), more than 2 mm thick, is presented. Recording at 488 nm (standard) and 530 nm. Post-exposure heating at 50 degrees for 50 hours (standard) and up to 300 hours. Post-exposure heating at 50 degrees for 50 hours (standard) and up to 300 hours.

Keywords: *optics, holography, recording media, three-dimensional multiplex holograms*

Фторфосфатные стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов свинца для лимитеров фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона

В.А. Асеев[1], Н.В. Никоноров[1], А.Н. Цыпкин[1], Е.В. Колобкова[1, 2], А.О. Исмагилов[1], Е.Н. Опарин[1]

[1] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия*

Обнаружено нелинейное пропускание во фторфосфатных (ФФ) стеклах с квантовыми точками (КТ) PbS и PbSe при воздействии импульсного фемтосекундного (100 фс) лазера ближнего ИК диапазона (1050 нм). Порог уменьшения (ограничения) мощности проходящего через образец лазерного излучения составил 1265 мВт для КТ PbS и 600 мВт для КТ PbSe. Образцы ФФ стекол с КТ PbS и PbSe практически не пропускали лазерное излучение при мощности 1530 мВт и 750 мВт, соответственно. Сделан вывод о том, что ФФ стекла с КТ PbS и PbSe можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств от импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности в ближнем ИК диапазоне.

Ключевые слова: *фторфосфатное стекло, квантовые точки сульфида свинца, квантовые точки селенида свинца, нелинейно-оптическое поглощение, нелинейно оптический лимитер*

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является защита фотоприемников от воздействия импульсного лазерного излучения в ближнем ИК диапазоне. Одним способов решения этой задачи является применение фильтров-ограничителей (лимитеров) лазерного излучения, в которых под действием лазерного излучения происходит ослабление пропускания фильтра за счет увеличения рассеяния или поглощения, происходящих в момент прохождения лазерного импульса через фильтр. Для создания таких фильтров-лимитеров используется разнообразные материалы: хромоформы на основе органических красителей, композитные среды с металлическими наночастицами, растворы фуллеренов, жидкости с углеродными частицами [1]. Несмотря на широкую номенклатуру этих материалов, а также низкий порог ограничения мощности/энергии лазерного излучения (10^{-5}–10^{-6} Дж), при котором пропускание материалов начинает уменьшаться, и высокую величину ослабления проходящего лазерного импульса (более 1000 раз), практическое применение их для задач защиты от импульсного лазерного излучения ограничено ввиду низких эксплуатационных характеристик. Эти материалы имеют низкую механическую, термическую и оптическую прочность, низкую химическую устойчивость. Кроме того, в результате воздействия лазерного излучения такие среды могут изменять свои свойства (необратимо деградировать или разрушаться), что не допускает их многократного использования, т. е. эти среды, как правило, ориентированы на одноразовое использование. В настоящей работе впервые проведены исследования нелинейного пропускания фторфосфатных (ФФ) стекол, легированных квантовыми точками (КТ) PbS и PbSe, для создания на их основе нелинейно-оптических фильтров-лимитеров импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности ближнего ИК диапазона.

Материалы и методы

В работе были синтезированы ФФ стекла, активированные PbS и PbSe. Получены прозрачные бесцветные стекла без кристаллической фазы. КТ были выращены в процессе термообработки при температуре 390–400 ^{o}C в течение 40 минут и имели полосы экситонного поглощения с максимумами 980 нм для PbS и 1090 нм для PbSe.

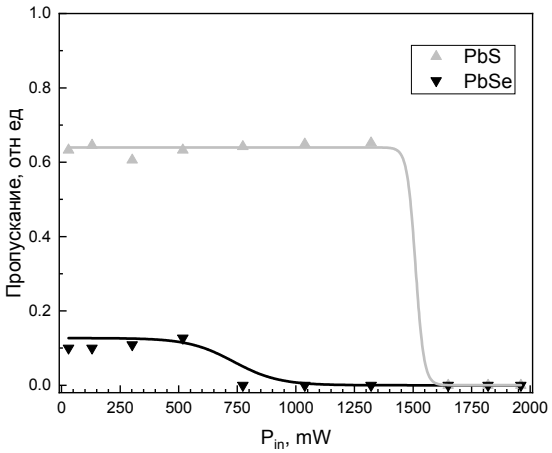
Для исследования нелинейного пропускания образцов использовался фемтосекундный лазер мощностью излучения до 2,0 Вт, длительностью импульса 100 фс, частотой повторения импульсов 70 МГц и длиной волны 1050 нм.

Результаты и обсуждение

Зависимости пропускания от мощности лазерного излучения на длине волны 1050 нм для ФФ стекол с КТ PbS и PbSe имеют сложный характер. Для обоих типов КТ можно выделить два диапазона (рисунок): 1) когда пропускание не зависит от мощности падающего излучения, т. е. выполняется линейный закон Бугера — Ламберта — Бера, 2) когда пропускание уменьшается при увеличении мощности, т. е. линейный закон не выполняется. Для образца с КТ PbS начальное пропускание составило 0,62, при этом оно не изменялось в пределах изменения мощности входного излучения 30–1265 мВт. При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения пропускание снижалось

и при мощности 1650 мВт составило меньше 0,01. Аналогичный характер наблюдался для образца с PbSe: начальное пропускание составило 0,1, при этом оно не изменялось в пределах изменения мощности входного излучения 30–520 мВт. При дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения пропускание снижалось и при мощности 720 мВт составляло уже меньше 0.01. Порог ограничения мощности проходящего лазерного излучения для образца с КТ PbS составил 1450 мВт, а для образца с КТ PbSe — 670 мВт.

Отклонение от линейного закона связано с нелинейными процессами ~~и~~ можно объяснить при помощи эффекта обратимого насыщаемого поглощения. В этом случае при низкой интенсивности падающего излучения КТ поглощают слабо. При увеличении интенсивности начинают заселяться возбужденные состояния, которые имеют большее сечение поглощения, чем основное состояние, что может приводить к падению пропускания.



Зависимость пропускания исследуемых образцов ФФ стекол с КТ PbS и PbSe
от мощности падающего на них фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1050 нм

Следует отметить следующие достоинства ФФ стекол с КТ PbS и PbSe по сравнению с известными средами, используемыми для фильтров-ограничителей: высокая механическая и термическая прочность ФФ стекла. Эксплуатационные характеристики ФФ стекла близки к характеристикам лазерных фосфатных стекол. ФФ стекло обладает высокой стойкостью к атмосферным воздействиям, не разрушается при воздействии на него лазерного импульсного излучения с высокими интенсивностями и допускает его многократное использование.

Заключение

В работе синтезированы ФФ стекла, легированные КТ PbS и PbSe размером ~ 3 нм. В этих стеклах обнаружено и исследовано нелинейное пропускание при воздействии импульсного фемтосекундного (100 фс) лазера ближнего ИК диапазона (1050 нм). Порог уменьшения (ограничения) мощности проходящего через образец лазерного излучения для образца с КТ PbS составил 1265 мВт, а при входной мощности ~ 1530 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. Порог ограничения мощности лазерного излучения для образца с КТ PbSe составил 600 мВт, а при входной мощности ~ 750 мВт этот образец практически не пропускал лазерное излучение. Сделан вывод о том, что ФФ стекла с КТ PbS и PbSe можно использовать в качестве фильтров-лимитеров для защиты фотоприемных устройств от импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности в ближнем ИК диапазоне.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект № 24-43-20020).

Список источников

[1] *Hollins R.C.* Materials for optical limiters // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 1999. Vol. 4. № 2. P. 189–196.

Fluorophosphate glasses with quantum dots of lead sulfides and selenides for limiters of femtosecond laser radiation in the near IR range

V.A. Aseev[1], N.V. Nikonorov[1], A.N. Tsypkin[1], E.V. Kolobkova[1,2], A.O. Ismagilov[1], E.N. Oparin[1]

[1] *ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*
[2] *St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint-Petersburg, Russia*

Nonlinear absorption in fluorophosphate glasses with PbS and PbSe quantum dots (QDs) under the action of a pulsed femtosecond (100 fs) laser in the near-IR range (1050 nm) was detected. The threshold for reducing (limiting) the power of laser radiation passing through the sample was 1265 mW for PbS QDs and 600 mW for PbSe QDs. Glass samples with PbS and PbSe QDs practically did not transmit laser radiation at a power of 1530 mW and 750 mW, respectively. It was concluded that fluorophosphate glasses with PbS and PbSe QDs can be used as limiting filters to protect photodetectors from pulsed femtosecond laser radiation in the near-IR range.

Keywords: *fluorophosphate glass, lead sulfide quantum dots, leads selenide quantum dots, nonlinear optical absorption, nonlinear optical limiter*

Оптическое устройство на основе MAX-фазы и способ определения остаточной MAX-фазы в максенах

А.В. Сюй, А.В. Арсенин, В.С. Волков

ООО «КСПАНСЕО», Москва, Россия

Оптическое устройство содержит прозрачное основание и фотоактивные частицы, образованные из MAX-фазы, имеющей химическую формулу $M_{n+1}AX_n$, где M — переходный металл; A — алюминий; X — углерод или азот; n = 1, 2 или 3. При этом фотоактивные частицы выполнены размером от 5 нм до 200 нм, а содержание остаточного алюминия в них по отношению к исходному содержанию в MAX-фазе составляет не менее 1 %. Способ определения остаточной MAX-фазы в максенах заключается в их облучении возбуждающим излучением и получении выходных спектральных характеристик. При этом в качестве возбуждающего излучения используют излучение с длиной воны в диапазоне от 350 нм до 650 нм и интенсивностью в диапазоне от 0,5 мВт/мкм^2 до 100 мВт/мкм^2, в качестве выходных спектральных характеристик измеряют интенсивность полосы излучения на 694 нм, а количество остаточной MAX-фазы в максенах определяют по интенсивности указанной полосы.

Ключевые слова: *MAX-фаза, максен, остаточный алюминий, спектральные характеристики*

MAX-фаза (MAX-phase) — это семейство слоистых соединений, которые представляют собой карбиды или нитриды, образованные из переходных металлов (ранних переходных металлов из группы III до VII периодической таблицы), элементов группы IIIA или IVA (например, алюминия, галлия, кремния, германия) и углерода или азота. Формула MAX-фазы имеет следующий общий вид: $M_{n+1}AX_n$, где M — переходные металлы, A — элемент группы IIIA или IVA, и X — углерод или азот. Материалы на основе MAX-фаз имеют уникальные свойства, такие как высокая тепло- и электропроводность, низкая плотность, пониженный модуль упругости, прочность, коррозионная стойкость, стойкость к высокотемпературному окислению и термическим ударам, а также легко подвергаются механической обработке и имеют высокую температуру плавления. Благодаря своим уникальным свойствам MAX-фазы перспективны для использования в различных приложениях.

Особое внимание уделяется материалам на основе алюминия, так как их легче травить для получения максенов (MXene) — нового семейства 2D-материалов. Максены синтезируют путем селективного вытравливания слоя A из MAX-фазы. После травления многослойные максены расслаиваются на тонкие флэйки, используемые в фильтрах, мембранах, солнечных батареях, биомедицине и покрытиях.

Некоторые максены демонстрируют уникальные оптические свойства, например, фотоиндуцированную флуоресценцию с узкополосным пиком на 694 нм [1]. Этот эффект может применяться для создания различных оптических устройств.

Актуальной задачей является контроль остаточной MAX-фазы в максенах. Традиционный метод — рентгенографический анализ [2]. Мерой чувствительности рентгеновского фазового анализа служит минимальное количество вещества в смеси, дающее достаточный для определения наличия в образце комплект ее характерных рефлексов, т. е. для разных фаз и разных смесей фаз чувствительность различна — она тем больше, чем выше «отражательная» способность атомных плоскостей фазы, присутствие которой надо обнаружить, и чем слабее фон дифрактограммы. Существенно и соотношение коэффициентов поглощения всей смеси и определяемой фазы. Вещества, сильно рассеивающие рентгеновское излучение, легко обнаружить в слабо рассеивающей смеси. Соединения же легких элементов в смеси с соединениями тяжелых элементов можно обнаружить лишь при их больших содержаниях.

Предлагается новый метод контроля остаточной MAX-фазы. Он основан на облучении максенов возбуждающим светом (350–650 нм) и измерении интенсивности спектральной полосы на 694 нм. Количество остаточной MAX-фазы определяется по интенсивности этой полосы.

Таким образом, технической проблемой является устранение указанных недостатков и создание относительно простого и эффективного метода контроля производных MAX-фазы, а также расширение арсенала технических средств, использующих материалы на ее основе.

Оптическое устройство может быть реализовано в нескольких вариантах. В первом варианте устройство выполнено в виде контактной линзы, в которую интегрированы источник питания и хотя бы один светодиод с длиной волны излучения 350–650 нм. Светодиод расположен на внутренней поверхности линзы и направлен к ее внешней стороне.

В другом варианте активные частицы наносятся на периферийную часть внешней поверхности линзы слоем толщиной 1–30 мкм, покрытым защитным слоем хитозана толщиной 1–30 мкм.

Третий вариант представляет собой лазерный модуль, содержащий источник излучения с длиной волны 350–650 нм и интенсивностью 0,5–100 мВт/мкм², а также кольцевой резонатор с показателем преломления ≥2,4. Между источником излучения и резонатором расположен слой частиц толщиной 1–30 мкм.

Четвертый вариант — температурный датчик, включающий источник излучения (350–650 нм, 0,5–100 мВт/мкм²), фотодиод с полосовым фильтром на 694 нм и подложку со слоем частиц толщиной 1–30 мкм, размещенным между светодиодом и фотодиодом.

Для определения остаточной MAX-фазы в максенах их облучают светом с длиной волны 350–650 нм и интенсивностью 0,5–100 мВт/мкм². Измеряют интенсивность спектральной полосы на 694 нм, по которой судят о количестве остаточной MAX-фазы.

Список источников

[1] *Сюй А.В. и др.* Фотолюминесцентные свойства максенов $Mo_2TiC_2T_x$ и $Mo_2Ti_2C_3T_x$ // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование: материалы XXI региональной науч. конф. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2023. https://doi.org/10.22250/9785934934195_97

[2] *Anasori B. et al.* Two-Dimensional, Ordered, Double Transition Metals Carbides (MXenes) // ACS Nano. 2015. Vol. 9. № 10. P. 9507–9516.

MAX-phase based optical device and method for determining residual MAX-phase in mxenes

A.V. Syuy, A.V. Arsenin, V.S. Volkov

OOO "KSPANSEO", Moscow, Russia

An optical device contains a transparent base and photoactive particles formed from MAX-phase having the chemical formula $M_{n+1}AX_n$, where M — transition metal; A — aluminum; X — carbon or nitrogen; n = 1, 2 or 3. In this case, the photoactive particles are made with a size from 5 nm to 200 nm, and the residual aluminum content therein relative to the initial content in the MAX-phase is at least 1 %. The method of determining the residual MAX-phase in mxenes consists in irradiating them with excitation radiation and obtaining the output spectral characteristics. At the same time, as excitation radiation, radiation with a wavelength in the range from 350 nm to 650 nm and intensity in the range from 0.5 mW/μm² to 100 mW/μm² is used; as output spectral characteristics, the intensity of the radiation band at 694 nm is measured, and the amount of residual MAX-phase in mxenes is determined by the intensity of this band.

Keywords: *MAX-phase, mxene, residual aluminum, spectral characteristics*

Перенос энергии электронного возбуждения между молекулами органических красителей и бактериородопсином

Ю.Д. Лантух

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Белок бактериородопсин способствует процессу бесхлорофиллного фотосинтеза в клетках галофильных архебактерий и является природным органическим фотохромом. Пленочные формы бактериородопсина (БР) во многом сохраняют рекордные параметры фотохромного цикла белка. В нашей работе представлены результаты экспериментов по разработке модели оптически управляемого транспаранта на основе фотохромизма пленочных образцов БР. Молекулы органических красителей акридинового ряда были иммобилизованы в пленки БР и служили донором энергии. При лазерном возбуждении донора, но вне полосы поглощения акцептора — БР, наблюдалось обратимое исчезновение полосы поглощения белка в видимой области. Данный эффект можно отнести к управляемому фотохромизму БР за счет процесса FRET. Возвращение системы в исходное состояние происходит самопроизвольно или принудительно путем подсветки на длине волны 405 нм.

Ключевые слова: *бактериородопсин, фотохромный цикл, перенос энергии, управляемый транспарант*

Молекулы бактериородопсина (БР) встроены в клеточные мембраны галофильных бактерий и осуществляют бесхлорофиллный фотосинтез в клетках таких бактерий, т. е. являются простейшими биологическими преобразователями световой энергии.

Структура, свойства и возможности модификации БР всесторонне исследованы [1, 2].

Замечательные физико-химические свойства бактериородопсина, в частности его фотохромные свойства, могут быть использованы для разработки различного рода практических устройств. Чаще всего исследуются применения в устройствах записи и обработки оптической информации, создания электрохимических ячеек, сенсоров физических величин [3].

В ответ на поглощение кванта света бактериородопсин BR(548) (форма А) обесцвечивается, вступая в цикл фотохимических превращений. При этом происходит обратимая изомеризация ретиналя BR(548) с последующим образованием формы В(412). Этот процесс обратим, и в темноте протекает в обратном направлении [1].

Целью настоящей работы являлась демонстрация модели управляемого оптического транспаранта на основе фотохромизма пленочной формы БР с использованием процесса безызлучательного переноса энергии (FRET). Объектом исследования служили образцы пленок Биохром с содержащими БР пурпурными мембранами галофильных бактерий в желатиновой матрице, в которые был иммобилизован органический краситель акридиновый оранжевый (АО) из водного раствора. Спектры поглощения в видимой области «чистой» пленки Биохром, АО в пленке поливинилового спирта (ПВС) и смешанной системы Биохром-АО представлены на рис. 1. Регистрация спектров проводилась на оптоволоконном спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes).

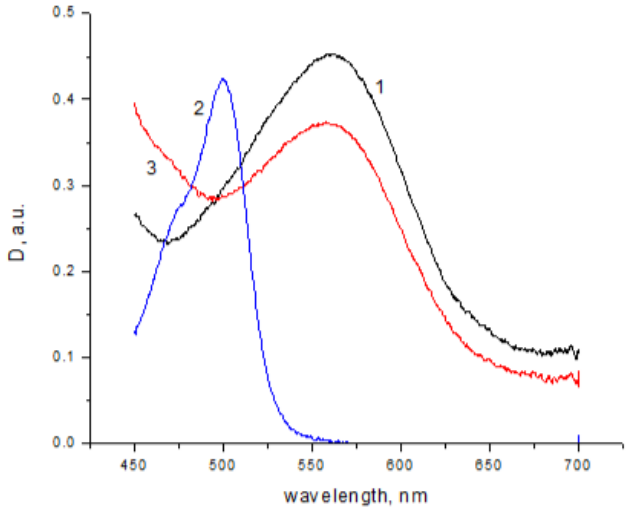


Рис. 1. Спектры поглощения бактериородопсина в пленке Биохром — 1, акридинового оранжевого в пленке ПВС — 2 и комплекса Биохром-АО — 3

Оптическое управление пропусканием БР в области основной полосы поглощения 500–600 нм осуществлялось путем переноса энергии электронного возбуждения с молекул донора энергии — акридинового оранжевого. АО, спектр поглощения которого представлен на рис. 1 кривая 2, возбуждался излучением DPSS лазера KLM-473 на длине волны 473 нм. Излучение этой длины волны не вызывало само по себе изменений в спектре акцептора — БР, но в комплексе с АО запускало фотохромный цикл БР, т. е. исчезновение поглощения в области 500–600 нм.

Серия спектров поглощения пленки Биохром-АО, полученных при облучении образца с интервалом 1 с представлена на рис. 2. Мощность излучения на длине волны 473 нм составляла 15 мВт, диаметр области облучения — 1 мм.

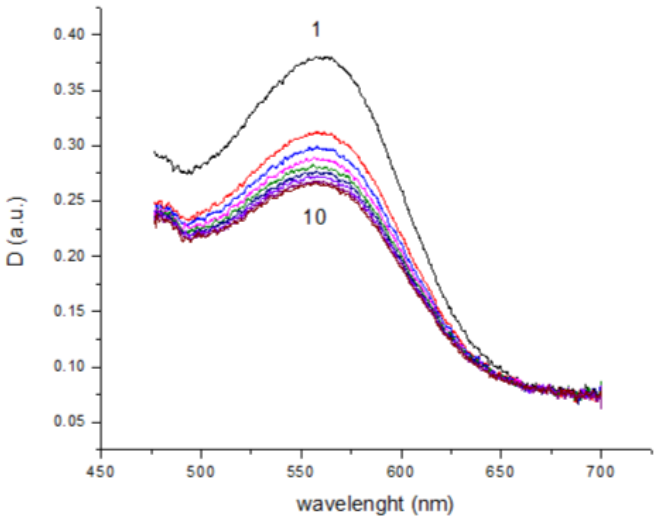


Рис. 2. Динамика обесцвечивания пленки Биохром-АО при облучении лазером с длиной волны 473 нм: 1 — исходный спектр,10 — конечный. Каждый последующий спектр регистрировался с интервалом 1 с

Кинетическая кривая просветления образца на длине волны максимума спектра поглощения БР (λ=560 нм) при облучении лазером KLM-473 представлена на рис. 3.

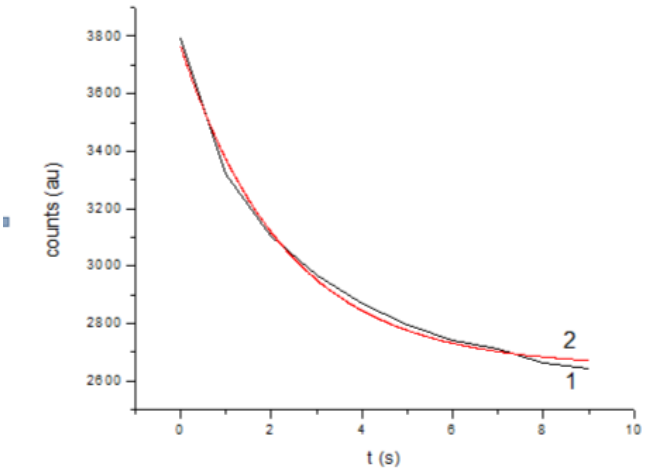


Рис. 3. Кинетическая кривая просветления пленки Биохром-АО при облучении на длине волны 473 нм — 1; экспоненциальная аппроксимация кривой просветления — 2

Из рисунка видно, что характерное время просветления образца составляет секунды. Эффективность перехода БР из формы А в форму В в нашем случае составила 38 %. В [2] отмечается, что КПД преобразования А–В зависит от состава смеси и достигает 90–100 %.

Возвращение системы в исходное состояние происходит самопроизвольно или принудительно путем подсветки на длине волны 405 нм. Самопроизвольный процесс восстановления исходной формы БР составляет около 40 с. Искусственный перевод системы из В в А-форму низкоинтенсивным излучением 405 нм происходит практически мгновенно.

Таким образом, в работе показано, что запуск фотохромного цикла БР можно осуществлять сенсибилизированно с использованием переноса энергии от стороннего донора (краситель акридиновый оранжевый), возбуждаемого вне полосы поглощения белка. На этой основе продемонстрирована модель оптически управляемого транспаранта.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России, проект № FSGU-2023-0003.

Список источников

[1] *Дружко А.Б.* Бактериородопсин: фундаментальные аспекты и возможности для практического применения. М.: РАН, 2022. 92 с.

[2] *Всеволодов Н.Н.* Биопигменты — фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука, 1988. 224 с.

[3] *Лантух Ю.Д.* Влияние температуры на фотохромные свойства пленок бактериородопсина // HOLOEXPO 2024: 21-я Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 304–305.

Transfer of electron excitation energy between organic dye molecules and bacteriorhodopsin

Yu.D. Lantukh

Orenburg State University, Orenburg, Russia

The protein bacteriorhodopsin promotes the process of a chlorophyll-free photosynthesis in the cells of halophilic archaebacteria and is a natural organic photochrome. Film forms of bacteriorhodopsin (BR) largely retain the record parameters of the protein photochromic cycle. In our work, we present the results of experiments on the development of a model of an optically controlled transparency based on the photochromism of BR film samples. Molecules of the acridine dyes were immobilized in BR films and served as an energy donor. Upon laser excitation of the donor, but outside the absorption band of the acceptor (BR), a reversible disappearance of the protein absorption band in the visible region was observed. This effect can be attributed to the controlled photochromism of BR due to the FRET process. The return of the system to the initial state occurs spontaneously or forcibly by illumination at a wavelength of 405 nm.

***Keywords**: bacteriorhodopsin, photochromic cycle, energy transfer, controlled transparency*

Оптические особенности голограмм китайских магических зеркал

Д.Д. Шаров[1], С.К. Стафеев[1, 2], Н.Г. Анисимова[2], Ю.А. Вавилова[2]

[1] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

В работе рассматриваются оптические особенности голограмм китайских магических зеркал. Была осуществлена запись аналоговой монохромной голограммы одного из таких зеркал по схеме Ю.Н. Денисюка. В процессе воспроизведения голограммы был обнаружен интересный эффект: скрытый узор, невидимый человеческому глазу на отражающей поверхности зеркала, четко проявился в голографическом изображении. Это свидетельствует о том, что микродеформации зеркала, ответственные за эффект «магии», были зафиксированы голографическим методом. Полученные результаты подтверждают высокую чувствительность голографии к микроструктурам и открывают перспективы ее использования для исследования исторических артефактов с аналогичными скрытыми характеристиками.

Ключевые слова: *художественная голография, микродеформация, монохромная голограмма*

Введение

Современные технологии визуализации, такие как дополненная реальность (AR) и голография, открывают новые горизонты в изучении как современных, так и исторических визуальных феноменов. Одним из наиболее загадочных артефактов, демонстрирующих сложные оптические эффекты, остаются так называемые «магические зеркала» древнего Китая, история которых уходит корнями в эпоху династии Ханьх [1]. Эти зеркала, способные при определенном освещении проецировать на экран скрытые изображения, долгое время считались мистическими объектами, пока физика и материаловедение не подошли к разгадке их принципа действия. Тем не менее, микроскопические особенности их поверхности по-прежнему представляют интерес не только для историков и реставраторов, но и для исследователей в области нейровизуализации и оптики. Такое зеркало наша группа демонстрировала в Шанхайском музее науки и технологий в 2019 году, на интерактивной голографической выставке [2]. Тогда оно было освещено как стандартным осветителем, так и рассеянным лазерным светом зеленого спектра. На рис. 1 можно наблюдать данную инсталляцию.

Рис. 1. Отражение рельефа китайского магического зеркала: слева — отражение от лазерного источника, справа — отражение стандартного осветителя

В настоящей статье предпринята попытка изучить голографическое проявление скрытого рельефа китайского магического зеркала посредством записи аналоговой монохромной голограммы по схеме Ю. Н. Денисюка. Особое внимание уделяется вопросу рассмотрения голограммы как предмета, способного хранить в себе информацию о поверхности рельефа. Такая роль голографии делает ее весьма важным предметом в музейной практике, в частности — сохранении визуального облика предмета [3]. Выявленный в ходе эксперимента эффект — проявление «невидимого» узора на голографическом изображении — иллюстрирует потенциал голографии как инструмента высокочувствительного анализа и открывает перспективу ее применения в исследовании артефактов с микроуровнем скрытой структуры.

Результаты

Для выявления скрытых оптических характеристик китайского магического зеркала была произведена запись аналоговой голограммы по методу Ю.Н. Денисюка. Съемка осуществлялась в геометрии встречных пучков: объектное и опорное излучение пересекались в светочувствительном слое с образованием стоячей волны. Зеркало при этом размещалось под углом к горизонтальной поверхности, что позволило минимизировать паразитные отражения и оптимизировать условия воспроизведения. Более подробные иллюстрации приведены на рис. 2.

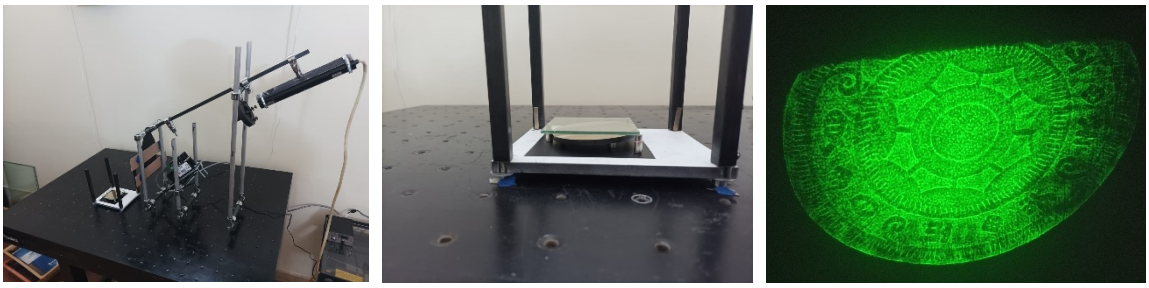


Рис. 2. Фотография голографической установки (слева), расположение зеркала под фотопластиной (по центру), полученная восстановленная голограмма зеркала (справа)

В качестве голографического материала использовались фотопластинки «Славич» ПФГ-03М формата 75×75 мм. В качестве источника излучения применялся зеленый лазер Oxxius Simply Light (длина волны 532 нм), обеспечивающий стабильное когерентное свечение, необходимое для точной записи.

Обработка фотопластинок проводилась в классическом химическом проявителе ГП-2, после чего материал последовательно промывался и сушился в растворах этилового спирта с возрастающей концентрацией (50 %, 75 %, 100 %) для предотвращения деформации эмульсии и сохранения голографической структуры.

Воспроизведение голограммы осуществлялось тем же лазером (532 нм, мощность 80 мВт). В результате восстановления наблюдалось четкое проявление скрытого узора, ранее невидимого на отражающей поверхности самого зеркала, что свидетельствует о наличии микродеформаций, зафиксированных в голографической записи.

Выводы

В результате проведенного исследования была успешно записана и воспроизведена аналоговая монохромная голограмма китайского магического зеркала. Полученные голографические изображения продемонстрировали наличие скрытого микрорельефа на зеркальной поверхности, который не проявляется при обычном визуальном осмотре, но четко выявляется в голограмме благодаря высокой чувствительности метода к микроструктурам. Наблюдаемый эффект подтверждает, что голография является мощным инструментом для неразрушающего исследования оптических и структурных особенностей исторических артефактов с микроуровневыми характеристиками. Данные результаты демонстрируют актуальность и перспективы применения голографических технологий в археологии и реставрации для выявления скрытых деталей, музейной практике.

Список источников

[1] *Lee C.K.* Bronze mirrors of ancient China: a technical and cultural study // Archaeometry. 1997. Vol. 39, № 1. P. 123–135.

[2] *Stafeev S., Sarakinos A., Bobritskaya E., Lembessis A., Sharov D., Ipatova T.* “Images of Light” with magic, art & science: Re-educating the public in holography, light and vision // Science Education and Museums. 2019. Vol. 5. № 2. P. 132–145.

[3] *Курбатова Е.И., Схулухия Н.И., Бобрицкая Е.И., Анисимова Н.Г., Шаров Д.Д., Стафеев С.К.* Голограмма как музейный предмет: от современных выставочных практик к понятию музеальности // Музей. 2021. № 12. С. 34–39.

Optical features of holograms of Chinese magic mirrors

D.D. Sharov[1], S.K. Stafeev[1, 2], N.G. Anisimova[2], Yu.A. Vavilova[2]

[1] *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*
[2] *ITMO University, Saint Petersburg, Russia*

This work explores the optical features of holograms of Chinese magic mirrors. An analog monochromatic hologram of one such mirror was recorded using the Y.N. Denisyuk scheme. During the hologram reconstruction, an intriguing effect was observed: a hidden pattern, invisible to the naked eye on the mirror's reflective surface, clearly appeared in the holographic image. This indicates that the micro-deformations responsible for the "magic" effect of the mirror were captured by the holographic method. The results confirm the high sensitivity of holography to microstructures and suggest its potential for studying historical artifacts with similarly hidden features.

Keywords: *artistic holography, micro-deformation, monochromatic hologram*

Ag и Mn-содержащие фотокаталитические наноматериалы системы $ZnO-ZnAl_2O_4$ для экологических приложений

С.К. Евстропьев[1, 2, 3], А.А. Шелеманов[2], Г.С. Полищук[1], Д.А. Гаврилова[1, 3], Н.В. Никоноров[2], К.В. Дукельский[1]

[1] *АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, Россия*

В работе полимерно-солевым методом синтезированы фотокаталитические нанокомпозиты системы $ZnO-ZnAl_2O_4$, модифицированные ионами серебра или марганца. Проведено исследование кристаллической структуры и морфологии материалов и изучены их способность к фотогенерации химически активных форм кислорода, спектрально-люминесцентные, фотокаталитические и бактерицидные свойства. Установлено, что внедрение модифицирующих ионов серебра и марганца в структуру оксидных нанокристаллов приводит к деформации их кристаллической решетки и формированию структурных дефектов, оказывающих существенное влияние на свойства материалов. Показана перспективность материалов для очистки и обеззараживания воздуха и водных сред.

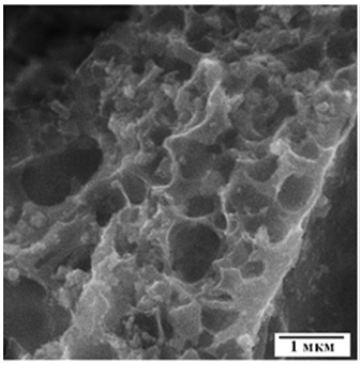
Ключевые слова: *фотокатализ, наноматериалы, полимерно-солевой синтез*

Фотокаталитические материалы на основе оксида цинка интенсивно разрабатываются для различных практических приложений (очистка и обеззараживание воздуха и воды, медицина) [1]. Оксид цинка является широкозонным полупроводником (ширина запрещенной зоны 3,37 эВ [2]) и для повышения фотокаталитической активности материалов на основе оксида цинка и возможности использования для их возбуждения видимого излучения в их состав вводятся различные модифицирующие добавки [2, 3]. Так, в [3] было показано, что высокую фотокаталитическую активность демонстрируют оксидные композиты системы $ZnO-ZnAl_2O_4$.

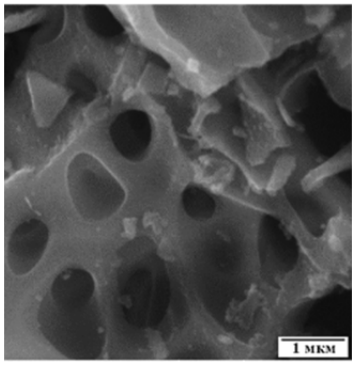
Целью настоящей работы являлся синтез $ZnO-ZnAl_2O_4$ композитов, модифицированных ионами серебра или марганца, и изучение их спектрально-люминесцентных и фотокаталитических свойств.

Для синтеза композитов был использован полимерно-солевой метод [3]. В качестве исходных материалов были использованы водные растворы нитратов металлов и растворимый органический полимер поливинилпирролидон (ПВП). После смешения растворов и последующей сушки композиционного раствора, сформированные гели подвергались термообработке при 680 ^oC в течение 2 часов. Методом рентгенофазового анализа были показано, что полученные оксидные композиты состоят из гексагональных нанокристаллов ZnO, имеющих размер 30÷40 нм и нанокристаллов гафнита размером 30 нм. Установлено, что добавки ионов серебра и марганца приводят к деформации кристаллической решетки кристаллов ZnO и формированию в них структурных дефектов, модифицирующих оптические свойства материалов.

На рисунке приведены электронно-микроскопические снимки композитов. Видно, что композиты имеют пористую структуру, что может быть обусловлено обильным газовыделением продуктов разложения солей и ПВП на стадии термообработки при синтезе композитов [3].



а)



б)

Электронно-микроскопический снимки композитов: а) $Mn-ZnO/ZnAl_2O_4$; б) $Ag-ZnO/ZnAl_2O_4$

В спектрах фотолюминесценции композитов наблюдаются полосы эмиссии в видимой части спектра с λ_{max} = 425, 460 и 530 нм, характерными для структурных дефектов.

Список источников

[1] *Araújo E.S. et al.* A review on the use of metal oxide-based nanocomposites for remediation of organics-contaminated water via photocatalysis: fundamentals, bibliometric study and recent advances // Toxics. 2023. Vol. 11. Art. no. 658. https://doi.org/10.3390/toxics11080658.

[2] *Senol S.D. et al.* Band gap engineering of Mg doped ZnO nanorods prepared by a hydrothermal method // Crystal Research & Technology. 2019. Vol. 54 (3). Art. no. 1800233. https://doi.org/10.1022/crat.201800233

[3] *Tincu A. et al.* Controlled chemical transformation and crystallization design for the formation of multifunctional Cu-doped ZnO/$ZnAl_2O_4$ composites // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. 2022. Vol. 33. P. 398–406. https://doi.org/10.1007/s10904-022-02507-6

Ag and Mn-containing photocatalytic nanomaterials of the ZnO-$ZnAl_2O_4$ system for environmental applications

S.K. Evstropiev[1, 2, 3], A.A. Shelemanov[2], G.S. Polischuk[1], D.A. Gavrilova[1, 3], N.V. Nikonorov[2], K.V. Dukelskii[1]

[1] *JSC "Research and Production Corporation of S.I. Vavilov State Optical Institute", Saint-Petersburg, Russia*
[2] *ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*
[3] *Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint-Petersburg, Russia*

In this work, photocatalytic nanocomposites of the ZnO-$ZnAl_2O_4$ system modified with silver or manganese ions were synthesized using the polymer-salt method. The crystal structure and morphology of the materials were studied, and their ability to photogenerate chemically active forms of oxygen, spectral-luminescent, photocatalytic and bactericidal properties were investigated. It was found that the introduction of modifying silver and manganese ions into the structure of oxide nanocrystals leads to deformation of their crystal lattice and the formation of structural defects that have a significant effect on the properties of the materials. The prospects of the materials for cleaning and disinfecting air and water environments were shown.

Keywords: *photocatalysis, nanomaterials, polymer-salt synthesis*

Влияние фото-термо-индуцированной кристаллизации на ионный обмен в фото-термо-рефрактивном стекле

В.А. Попова, Н.В. Никоноров, Е.М. Сгибнев, В.В. Песняков

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

При объединении двух технологий (фото-термо-индуцированной кристаллизации — ФТИК и низкотемпературного ионного обмена — НИО) в фото-термо-рефрактивном (ФТР) стекле возникает вопрос о возможном влиянии ФТИК (закристаллизованной области) на последующий процесс НИО. Т. е. может ли выступать закристаллизованная область ФТР стекла в качестве маски, блокирующей НИО, или наоборот, которая может увеличивать скорость диффузии, или не влиять на процесс диффузии. Для ответа на этот вопрос был проведен НИО Na–Ag и Na–K. Исследования методом волноводной спектроскопии и анализ угловой селективности брэгговских решеток показали следующие результаты. Закристаллизованная область ФТР стекла слабо влияет на ионный обмен, т. е. волноводные структуры практически с одинаковыми параметрами образуются как в закристаллизованной, так и в незакристаллизованной области.

Ключевые слова: *фото-термо-рефрактивное стекло, фото-термо-индуцированная кристаллизация, брэгговская решетка, ионный обмен, планарный волновод*

Введение

Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло позволяет объединить технологию записи объемных брэгговских решеток (ОБР) и технологию низкотемпературного ионного обмена (НИО). Было показано [1], что НИО может быть проведен после записи ОБР без искажения характеристик (периода и угла наклона) брэгговских решеток. Однако на данный момент характер влияния фото-термо-индуцированной кристаллизации (ФТИК), вследствие которой образуется ОБР, на протекание НИО не был установлен. В данной работе проведено исследование влияния ФТИК на процесс НИО Na^+–Ag^+ и Na^+–K^+ двумя подходами. В первом использовался метод волноводной спектроскопии — проводился НИО в закристаллизованную и незакристаллизованную области стекла, в результате которого создавались Ag^+ и K^+ ионообменные волноводы, после этого измерялось распределение эффективных показателей преломления волноводных мод по глубине волновода и проводилось их сравнение. Во втором подходе проводилась запись ОБР за счет ФТИК и последующий НИО. В эксперименте анализировался контур угловой селективности ОБР до и после проведения НИО.

Методы исследования

ФТР стекло синтезировано в НИЦ оптического материаловедения Университета ИТМО. Стекло имеет матрицу Na_2O–Al_2O_3–ZnO–SiO_2–NaF–NaBr–KBr с добавлением CeO_2 (0,01 мол%), Sb_2O_3 (0,05 мол%), Ag_2O (0,15 мол%). Синтез проводился в платиновом тигле при температуре 1500 °C, гомогенизация осуществлялась с помощью платиновой мешалки. После синтеза стекло подверглось отжигу при температуре 490 °C. Рабочие поверхности пластины стекла были отшлифованы и отполированы до оптического качества.

Температура НИО Na^+–Ag^+ составляла 320 °C, и длительность процесса варьировалась от 5 до 45 мин. Использовался смешанный расплав солей нитрата серебра (5 мол%) и нитрата натрия (95 мол%). Температура НИО Na^+–K^+ составляла 400 °C, длительность процесса — 3 часа. Использовался расплав чистого нитрата калия.

Эффективные показатели преломления мод волновода были измерены при помощи призмы в качестве элемента ввода излучения в волновод. Значение эффективного показателя преломления моды с индексом m рассчитывается по формуле:

$$n_m = n_{\text{пр}} \times \sin\left(\varepsilon \pm asin\left(\frac{\sin(\alpha_m)}{n_{\text{пр}}}\right)\right),$$

где $n_{пр}$ — показатель преломления призмы ввода, ε — угол при основании призмы ввода, α_m — угол между нормалью к входной грани призмы и падающим на эту грань лазерным лучом в положении, когда наблюдается волноводная мода с индексом m.

Запись ОБР происходила с помощью ультрафиолетового He–Cd лазера Kimmon с длиной волны излучения 325 нм. ОБР записаны перпендикулярно к поверхности пластины стекла с помощью зеркала Ллойда. Для волноводной спектроскопии половина образца ФТР стекла была облучена УФ, без

записи ОБР. Все образцы стекла подвергались термообработке при 505 °С и шлифовке-полировке с двух сторон перед НИО.

Контур угловой селективности ОБР был измерен с помощью точного поворотного стола с шагом 0,002°, для каждого угла падения лазерного луча (532 нм) фиксировалось значение интенсивности проходящего через ОБР светового потока в окрестности угла Брэгга. Контур был нормирован таким образом, чтобы интенсивность проходящего света в отсутствие дифракции равнялась единице.

Результаты

На рис. 1 приведены эффективные показатели преломления волноводных мод для серебряного и калиевого волновода в присутствии и отсутствии ФТИК.

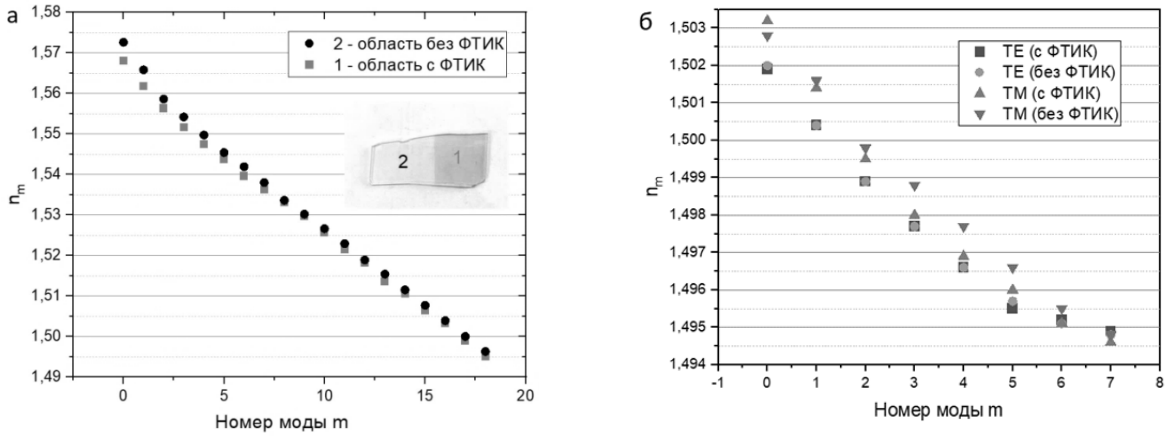


Рис. 1. Эффективные показатели преломления волноводных мод для НИО Na^+–Ag^+ (а) и Na^+–K^+ (б). TE и TM — поляризации излучения для K^+ волновода

На рис. 2 изображено сравнение контуров угловой селективности ОБР до и после проведения НИО.

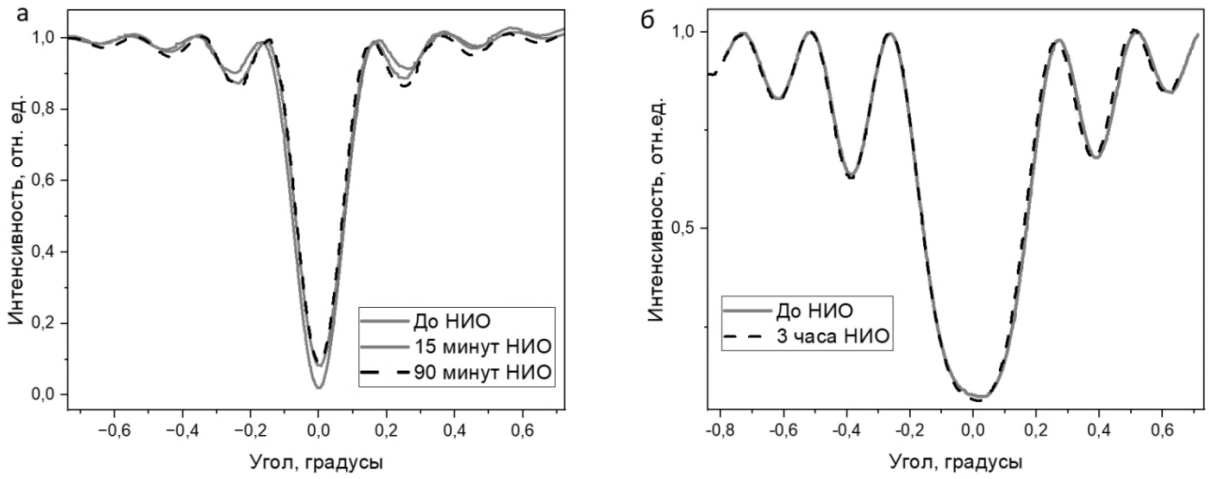


Рис. 2. Контуры угловой селективности ОБР до и после проведения НИО Na^+–Ag^+ (а), Na^+–K^+ (б)

Заключение

Проведен НИО Na^+–Ag^+ и Na^+–K^+–Ag^+ в закристаллизованную и незакристаллизованную области ФТР стекла. Исследования методом волноводной спектроскопии и анализ угловой селективности брэгговских решеток показали следующие результаты. Закристаллизованная область ФТР стекла слабо влияет на ионный обмен, т. е. волноводные структуры практически с одинаковыми параметрами образуются как в закристаллизованной, так и в незакристаллизованной области. Контур угловой селективности ОБР в ФТР стекле практически не меняется до и после НИО Na^+–Ag^+ и Na^+–K^+–Ag^+.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-43-20020).

Список источников

[1] *Попова В.А., Марасанов Д.В., Никоноров Н.В.* Объединение технологий ионного обмена и фото-термо-индуцированной кристаллизации ФТР стекла для создания волноводных структур и дифракционных элементов ввода-вывода излучения // ХОЛОЭКСПО 2024: XXI Междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям: сб. тез. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 300–303.

The influence of photo-thermo-induced crystallization on ion exchange in photo-thermo-refractive glass

V.A. Popova, N.V. Nikonorov, E.M. Sgibnev, V.V. Pesnyakov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

When combining two technologies (photo-thermo-induced crystallization — PTIC and low-temperature ion exchange — LTIE) in photo-thermo-refractive (PTR) glass, a question arises about the possible influence of PTIC (crystallized region) on the subsequent LTIE process. That is, can the crystallized region of PTR glass act as a mask blocking LTIE, or vice versa, which can increase the diffusion rate, or not affect the diffusion process. To answer this question, LTIE of Na–Ag and Na–K was carried out. Studies using the waveguide spectroscopy method and analysis of the angular selectivity of Bragg gratings showed the following results. The crystallized region of PTR glass weakly affects ion exchange, that is, waveguide structures with almost identical parameters are formed both in the crystallized and non-crystallized region.

Keywords: *photo-thermo-refractive glass, photo-thermo-induced crystallization, Bragg grating, ion exchange, planar waveguide*

Синтез и свойства наночастиц диселенида вольфрама, полученных методами фемтосекундной лазерной абляции и фрагментации в жидкости

Д. Дюбо[1], А. Ушков[1], Н. Белозерова[1], А. Сюй[1,2], С. Новиков[1], А.Д. Большаков[1,3,4,5], А. Арсенин[1,2,5], В. Волков[2], Г.И. Целиков[2]

[1] *МФТИ, Физтех, Москва, Россия*
[2] *Центр исследований передовых технологий XPANCEO, Дубай, ОАЭ*
[3] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[4] *Академический университет им. В.М. Алферова РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[5] *Ереванский государственный университет, Ереван, Армения*

Проведен сравнительный анализ методов фемтосекундной лазерной абляции (PLAL) и фрагментации (PLFL) в жидкости для синтеза наночастиц WSe_2. Показано, что при PLAL образуются полидисперсные частицы диаметром 5–150 нм, сохраняющие кристаллическую структуру исходного материала, тогда как при длительной PLFL наряду с WSe_2 формируются аморфные частицы селена. Синтезированные наночастицы демонстрируют высокую фототермическую конверсию света (превышающую таковую у кремниевых наночастиц) и эффективное SERS-усиление: SERS-сигнал на наночастицах WSe_2 почти в 10 раз превышает аналогичный на их флейках.

Ключевые слова: *фемтосекундная лазерная абляция, диселенид вольфрама, наночастицы, фототермический эффект, неплазмонный sers, прикладная фотоника*

Введение

Диселенид вольфрама (WSe_2) — слоистый ван-дер-ваальсовый материал из семейства дихалькогенидов переходных металлов, обладающий высоким показателем преломления и ярко выраженными экситонными переходами в видимом диапазоне [1, 2]. Эти свойства делают WSe_2 перспективным для нанофотоники и биомедицинских приложений (например, фототермической терапии в окне прозрачности биотканей около 750 нм) [3]. Методы синтеза в жидкой среде — фемтосекундные лазерная абляция (Pulsed Laser Ablation in Liquid, PLAL) и лазерная фрагментация (Pulsed Laser Fragmentation in Liquid, PLFL) – позволяют получать стабильные коллоидные растворы наночастиц WSe_2 без посторонних примесей и реагентов [4, 5]. В настоящей работе проведен сравнительный анализ этих подходов для синтеза наночастиц WSe_2. Несмотря на схожесть принципов, выявлены существенные различия в свойствах получаемых наноматериалов.

Методы и результаты

Метод PLAL из макроскопического кристалла WSe_2 в воде генерирует сферические наночастицы диаметром порядка нескольких десятков нанометров с широким распределением по размерам (диапазон 5-150 нм). Просвечивающая электронная микроскопия показывает, что частицы имеют близкую к сферической форму, сохраняют стехиометрию исходного кристалла WSe_2 и являются поликристаллическими. Картины электронной дифракции (SAED) имеют кольца, подтверждающие поликристаллическую структуру наночастиц WSe_2.

В отличие от этого, при PLFL — облучении суспензии микрочешуек WSe_2 ультракороткими импульсами — наблюдаются как сферические частицы, так и фрагменты флейков WSe_2, которые в процессе синтеза в конечном итоге тоже переходят в наночастицы. Полученные таким образом сферические частицы характеризуются более аморфной структурой и меньшим средним размером. Кроме того, при длительном фрагментировании наряду с наночастицами WSe_2 образуются наночастицы чистого селена, что указывает на частичное разложение материала при этом методе.

Оба типа полученных наночастиц активно поглощают свет в видимой и ближней ИК-области благодаря экситонному резонансу WSe_2 около 750 нм. Это обуславливает высокий фототермический отклик: при облучении коллоидов лазером в области NIR-I наночастицы разогреваются с эффективностью около 50 %, что в несколько раз выше, чем у объемного WSe_2 или стандартных кремниевых наночастиц. Например, измеренный коэффициент фототермического преобразования η достигает 0,55 при возбуждении на 750 нм. Из полученных коллоидов можно формировать покрытия для создания ГКР-подложек. Демонстрируется способность усиливать рамановский сигнал: с их помощью детектированы молекулы красителей (родамин 6G, кристаллический фиолетовый) при концентрациях до 10^{-7} М.

Эффект поверхностно усиленного комбинационного рассеяния в случае WSe_2 носит неплазмонный (химический) характер, и его величина существенно зависит от морфологии наноструктур,

причем подложка на основе сферических наночастиц WSe_2 дает на порядок лучшее усиление рамановского сигнала по сравнению с субстратом из кристаллических наночешуек WSe_2.

Заключение

Таким образом, физические методы PLAL и PLFL обеспечивают синтез химически чистых наночастиц из ван-дер-Ваальсового материала WSe_2 с контролируемой морфологией и степенью кристалличности, что отражается на их оптических свойствах. Увеличение эффективной поверхности материала в форме наночастиц, а также увеличение концентрации вакансий селена на их поверхности позволило усилить неплазмонный механизм ГКР, что продемонстрировано на ряде красителей. Показано, что поликристаллические наночастицы WSe_2 сохраняют оптические свойства исходного слоистого кристалла, в частности, экситонный резонанс на длине волны 750 нм. Это позволило усилить фототермический отклик частиц в биологической области прозрачности NIR-I. Таким образом, лазерные методы синтеза наночастиц из ван-дер-Ваальсовых материалов открывают путь к созданию неплазмонных наноматериалов для прикладной фотоники: ГКР-сенсоров и тераностики.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-72-10039).

Список источников

[1] *Ermolaev G.A. et al.* Giant optical anisotropy in transition metal dichalcogenides for next-generation // Nature communications. 2021. Vol. 12. № 1. Art. no. 854. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21139-x

[2] *Ermolaev G.A. et al.* Van der Waals materials for subdiffractional light // Photonics. MDPI. 2022. Vol. 9. № 10. Art. no. 744. https://doi.org/10.3390/photonics9100744

[3] *Tselikov G.I. et al.* Transition metal dichalcogenide nanospheres for high-refractive-index nanophotonics and biomedical theranostics // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2022. Vol. 119. № 39. Art. no. e2208830119. https://doi.org/10.1073/pnas.2208830119

[4] *Chernikov A.S. et al.* Tunable optical properties of transition metal dichalcogenide nanoparticles synthesized by femtosecond laser ablation and fragmentation // Journal of Materials Chemistry C. 2023. Vol. 11. № 10. P. 3493–3503. https://doi.org/10.1039/D2TC05235K

[5] *Ye F. et al.* Defect-Rich MoSe2 2H/1T Hybrid Nanoparticles Prepared from Femtosecond Laser Ablation in Liquid and Their Enhanced Photothermal Conversion Efficiencies // Advanced Materials. 2023. Vol. 35. № 30. Art. no. 2301129. https://doi.org/10.1002/adma.202301129

Synthesis and properties of tungsten diselenide nanoparticles produced by femtosecond laser ablation and fragmentation in liquid

D. Dyubo[1], A. Ushkov[1], N. Belozerova[1], A. Syuy[1,2], S. Novikov[1], A.D. Bolshakov[1, 3, 4, 5], A. Arsenin[1, 2, 5], V. Volkov[2], G. I. Tselikov[2]

[1] *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia*
[2] *XPANCEO Center for Advanced Technologies, Dubai, UAE*
[3] *St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*
[4] *Alferov University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia*
[5] *Yerevan State University, Yerevan, Armenia*

A comparative analysis of femtosecond pulsed laser ablation (PLAL) and pulsed laser fragmentation in liquid (PLFL) was performed for the synthesis of WSe_2 nanoparticles. PLAL generates polydisperse particles 5–150 nm in diameter that preserve the crystalline structure of the parent material, whereas prolonged PLFL produces amorphous selenium nanoparticles alongside WSe_2. The synthesized nanoparticles demonstrate high photothermal conversion efficiency surpassing that of silicon nanoparticles and an effective surface-enhanced Raman scattering (SERS) response: the SERS signal from WSe_2 nanoparticles is almost an order of magnitude higher than that from their flake counterparts.

***Keywords**: femtosecond laser ablation; tungsten diselenide; nanoparticles; photothermal effect; non-plasmonic sers; applied photonics*

Секция 11
Биофотоника

Оптические когерентные методы в диагностике сахарного диабета и его осложнений

В.В. Тучин[1, 2, 3], Ю.И. Сурков[1], А.А. Харченко[1], И.А. Серебрякова[1], П.А. Тимошина[1, 2], Д.К. Тучина[1, 2], Э.А. Генина[1, 2]

[1] Институт физики и Научный медицинский центр, Саратовский государственный университет, Саратов, Россия
[2] Междисциплинарная лаборатория биофотоники, Томский государственный университета, Томск, Россия
[3] Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия

Сахарный диабет (СД) одно из социально значимых заболеваний, которое характерно для всех возрастных категорий населения и поражает общество с нарастающей силой. У таких пациентов повышенный уровень свободной глюкозы в крови и в интерстициальной жидкости вызывает неферментативную реакцию Майяра с аминогруппами белковых молекул, что, в конечном итоге ведет к образованию долгоживущих необратимых конечных продуктов гликирования (КПГ) которые образуют дополнительные поперечные сшивки в соединительных тканях и связываются с клеточными рецепторами с образованием активных форм кислорода. Оба механизма влияют на нормальную физиологическую функцию всех органов человека. Накопление КПГ в тканях приводит к жизненно важным осложнениям, таким как ретинопатия, нефропатия, нейропатия, мышечная недостаточность и сердечнососудистые заболевания, вызываемые изменением клеточных функций, ухудшением проницаемости биологических мембран, нарушением обмена веществ и соответственно функционирования тканей и органов.

Ключевые слова: *ОКТ, статистика спеклов, спекл-контрастная визуализация, сахарный диабет, гликирование белков, оптическое просветление, оптические просветляющие агенты*

В работе предлагается использовать метод оптического просветления для определения состояния различных тканей и органов при диабете по измерениям скорости диффузии оптических просветляющих агентов (ОПА). Поскольку проницаемость ткани для ОПА и потоков воды во многом определяется структурой ткани, которая значительно изменяется в процессе ее гликирования, изменение скорости диффузии молекул в ткани может быть использовано в качестве биомаркера степени гликирования ткани. В качестве оптических методов мониторинга диффузии и воздействия ОПА на ткани в работе используется спектрофотометрия, оптическая когерентная томография (ОКТ), статистика спеклов с пространственно-временным корреляционным анализом и спекл-контрастная визуализация кровотока лабораторных животных. Надежно установлено, что скорость диффузии ОПА, измеренная различными методами, существенно отличается для здоровых и гликированных тканей. Такое различие может служить маркером степени гликированности белков тканей. Обнаружены также существенные различная реакции кровотока на воздействие ОПА в СД и контрольной группах лабораторных животных, что обусловлено нарушением механизмов эндотелий зависимой вазодилатации при СД. Таким образом, ОПА могут быть также использованы в качестве маркеров состояния сосудистой системы при развитии СД. Полученные данные необходимы при разработке эффективных протоколов лечения диабетиков с учетом замедленной диффузии фармацевтических препаратов в гликированных тканях.

Optical coherence methods in diagnostics of diabetes mellitus and its complications

V.V. Tuchin[1, 2, 3], Yu.I. Surkov[1], A.A. Kharchenko[1], I.A. Serebryakova[1], P.A. Timoshina[1, 2], D.K. Tuchina[1, 2], E.A. Genina[1, 2]

[1] Institute of Physics and Science Medical Center, Saratov State University, Saratov, Russia
[2] Interdisciplinary Laboratory of Biophotonics, Tomsk State University, Tomsk, Russia
[3] Institute of Precision Mechanics and Control, Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

Diabetes mellitus (DM) is one of the socially significant diseases that is characteristic of all age categories of the population and affects society with increasing force. In such patients, an increased level of free glucose in the blood and in the interstitial fluid causes a non-enzymatic Maillard reaction with amino groups of protein molecules, which ultimately leads to the formation of long-lived irreversible advanced glycation end products (AGEs) that form additional cross-links in connective tissues and bind to cellular receptors to form reactive oxygen species. Both mechanisms affect the normal physiological function of all human organs. The accumulation of AGEs in tissues leads to vital complications such as retinopathy, nephropathy, neuropathy, muscle failure and cardiovascular diseases caused by changes in cellular functions, deterioration in the permeability of biological membranes, metabolic disorders and, accordingly, the functioning of tissues and organs.

Keywords: *OCT, speckle statistics, speckle contrast imaging, diabetes mellitus, protein glycation, optical clearing, optical clearing agents*

The paper proposes to use the optical clearing method to determine the state of various tissues and organs in diabetes by measuring the diffusion rate of optical clearing agents (OCA). Since tissue permeability for OCA and water flows is largely determined by the tissue structure, which changes significantly during its glycation, a change in the diffusion rate of molecules in the tissue can be used as a biomarker of the degree of tissue glycation. Spectrophotometry, optical coherence tomography (OCT), speckle statistics with spatio-temporal correlation analysis, and speckle-contrast imaging of blood flow in laboratory animals are used as optical methods for monitoring diffusion and the effect of OCA on tissue. It has been reliably established that the diffusion rate of OCA measured by various methods differs significantly for healthy and glycated tissues. Such a difference can serve as a marker of the degree of glycation of tissue proteins. Significant differences in blood flow responses to the effects of OCA in the DM and control groups of laboratory animals were also found, which is due to the disruption of endothelium-dependent vasodilation mechanisms in DM. Thus, OCA can also be used as markers of the vascular system state during the development of DM. The data obtained are necessary for developing effective treatment protocols for diabetics, taking into account the slow diffusion of pharmaceuticals in glycated tissues.

Конфокальный голографический сканирующий микроскоп на базе Olympus и его применение в биомедицинской оптике

Ю.Н. Захаров

Гарвардский университет, Бостон, США

Конфокальный голографический сканирующий микроскоп реализован на базе микроскопа Olympus FV-1000 путем замены блока фильтров возбуждения и регистрации флуоресценции на голографический модуль. Цифровое восстановление волнового фронта позволяет проводить количественную фазовую визуализацию и картографирование показателя преломления биологических клеток с численной перефокусировкой по всему объему образца. Предлагаемый подход исключает необходимость механического сканирования вдоль оптической оси и обеспечивает расширенные возможности трехмерной микроскопии. Проведена калибровка системы на тестовых объектах (полистирольные микросферы), а также продемонстрировано применение метода для анализа клеток аденокарциномы пищеварительного тракта.

Ключевые слова: *биомедицинская оптика, голографическая микроскопия, клиническая диагностика*

Голографическая микроскопия на основе цифрового восстановления волнового фронта активно развивается как инструмент количественного оптического зондирования биологических образцов. Ранее нами была предложена первая в своем роде система сканирующей голографической микроскопии на базе микроскопа Zeiss LSM-510 [1]. Насколько нам известно, это была первая опубликованная работа, в которой конфокальный лазерный сканирующий микроскоп был дополнен голографическим каналом. Позднее подобные подходы были развиты другими исследователями [2–4].

Разработка первой версии системы выявила проблемы точной реконструкции волнового фронта, связанные с искажением волнового фронта, обусловленным оптическими и механическими компонентами конфокального тракта. Для их преодоления были предложены алгоритмы коррекции, прошедшие теоретическое и экспериментальное обоснование [5–7]. Это позволило получить изображения и количественные фазовые потртеты культур клеток и тканей [8].

Новая модификация конфокальной голографической сканирующей микроскопии (КГСМ) реализована с использованием стандартной платформы Olympus. Разработана сменная вставка (модуль), позволяющая превратить систему в полнофункциональный голографический микроскоп (рис. 1).

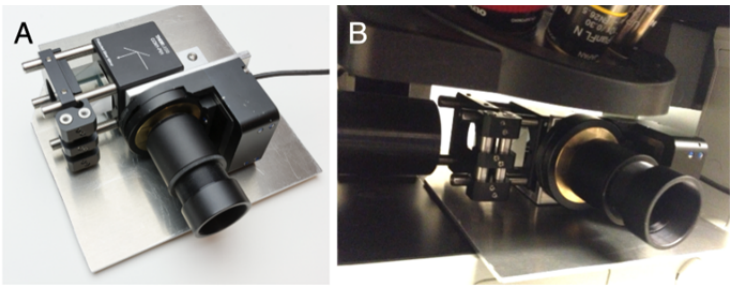


Рис. 1. Съемный модуль системы КГСМ (A); установленный модуль в конфокальном микроскопе (B)

Конфигурация с общим оптическим путем позволяет применять классические алгоритмы цифровой голографии [9], адаптированные под архитектуру системы. Это дает возможность восстанавливать как амплитуду, так и фазу комплексного волнового фронта на различных глубинах путем численной перефокусировки внутри объема образца.

Для оценки пространственного разрешения и точности фазовой реконструкции использовались микросферы из полистирола (диаметр 3 мкм), погруженные в иммерсионное масло. Пример полученного фазового портрета приведен на рис. 2.

Благодаря известному значению показателя преломления ($n \approx 1{,}59$) была получена количественная оценка толщины оптического среза, вносящего вклад в фазовый сдвиг, что подтвердило пригодность системы для вычисления показателя преломления структур биологических объектов.

Система совмещает возможности флуоресцентной конфокальной микроскопии, спектроскопии поглощения и рассеяния в конфокальной конфигурации (CLASS) [10], а также голографии. Она была применена для исследования различных биологических образцов. Например, на рис. 3 представлены данные, полученные с использованием КГСМ при исследовании клетки OE33 — клеточной линии

аденокарциномы пищевода. В восстановленных фазовых изображениях и соответствующих картах показателя преломления наблюдаются значимые различия между цитоплазмой (n = 1,36–1,37) и ядерными структурами (n = 1,41–1,42).

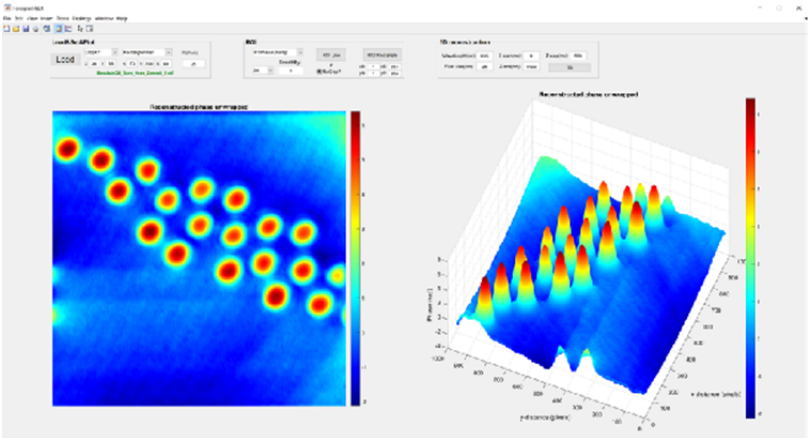


Рис. 2. Фазовый портрет микросфер диаметром 3 мкм в иммерсионном масле, полученный методом КГСМ

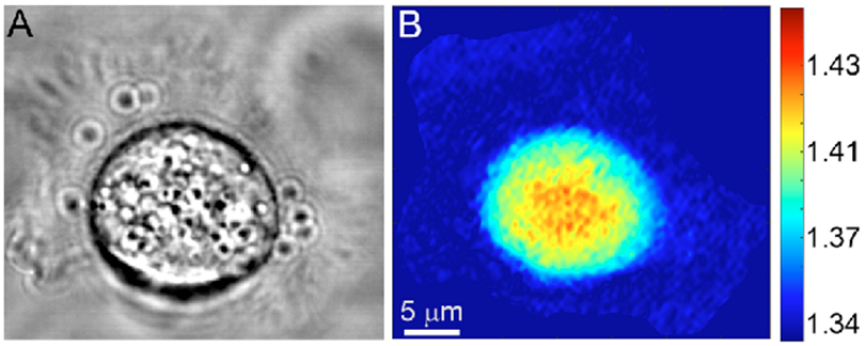


Рис. 3. Клетка OE33: изображение в отраженном свете (A); соответствующая карта показателя преломления (B)

Предложена и реализована новая система конфокальной голографической сканирующей микроскопии, демонстрирующая высокую точность фазовой реконструкции и пригодность для количественной биомедицинской диагностики. Система применима к широкому классу задач, включая клеточную диагностику и изучение динамики внутриклеточных процессов.

Список источников

[1] *Zakharov Yu.N. et al.* Holographic technique for 3d optical microscopy // Speckle2010: speckle fields forever. Technical Program. Abstracts selection. SC – Brazil: Florianopolis, 2010.

[2] *Goy A.S., Psaltis D.* Digital confocal microscope // Opt. Express. 2012. Vol. 20. P. 22720–22727.

[3] *Liu C. et al.* Quantitative phase-contrast confocal microscope // Opt. Express. 2014. Vol. 22. P. 17830–39.

[4] *Schnell M. et al.* Synthetic optical holography for rapid nanoimaging // Nature Comm. 2014. Vol. 5 (1). Art. no. 3499.

[5] *Zakharov Y. et al.* Holographic scanning microscopy - novel approach to digital holography and laser scanning microscopy // Imaging and Applied Optics 2014. OSA Technical Digest. 2014. Paper DW5B.1.

[6] *Zakharov Yu. et al.* Possibilities of holographic techniques in laser scanning microscopy // SPIE Conference Proceeding. 2015. Vol. 9540. Art. no. 95400P.

[7] *Muravyeva M. et al.* Holographic scanning microscope: simulation of hologram recording and wavefront reconstruction // SPIE Conference Proceeding. 2015. Vol. 10944. Art. no. 109440K.

[8] *Zakharov I. et al.* Laser Scanning Microscope Based Digital Holography for biomedical application // Optica Imaging Congress. Technical Digest Series. 2023. Paper HTu5C.4.

[9] *Latychevskaia T. et al.* Practical algorithms for simulation and reconstruction of digital in-line holograms // Appl. Opt. 2015. Vol. 54 (9). Art. no. 2424.

[10] *Itzcan I. et al.* Confocal confocal light absorption and scattering spectroscopic microscopy monitors organelles in live cells with no exogenous labels // Proc. Nat, Acad. Sci. USA. 2007. Vol. 104. Art. no. 17255.

Confocal holographic scanning microscope on the base of Olympus and its application for biomedical optics

Iu.N. Zakharov

Harvard University, Boston, USA

A confocal holographic scanning microscope is developed by integrating a holographic module into a commercial Olympus confocal scanning microscope. Digital wavefront reconstruction enables quantitative phase imaging and refractive index mapping of living cells, with numerical refocusing across the sample volume. The approach eliminates mechanical scanning for axial sectioning, offering enhanced three-dimensional imaging performance.

Keywords: *biomedical optics, holographic microscopy, clinical diagnostics*

Резонансные наноструктуры для нанофотонных биосенсоров

Д.А. Зуев

Физический факультет, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Резонансные нанофотонные структуры являются перспективными системами для создания простых и эффективных оптических биосенсоров. В качестве примера таких систем, в докладе будут рассмотрены гибридные наноструктуры для термически-индуцированных преобразований органических соединений и их отслеживания в реальном времени при помощи резонансно-усиленного сигнала рамановского рассеяния, хиральные наносистемы для высокочувствительного определения маркеров нейродегенеративных заболеваний, а также колориметрические системы на основе резонансных цепочек наночастиц для экспресс-детектирования вирусов. Отдельное внимание будет уделено бифункциональным нанофотонным платформам, сочетающих возможности как детектирования малых концентраций органических соединений в воде, так и их нейтрализации под действием солнечного света.

Ключевые слова: *резонансные наноструктуры, нанофотоника, биосенсоры*

Резонансные нанофотонные структуры являются перспективными системами для создания простых и эффективных оптических биосенсоров благодаря своей способности эффективно управлять светом на наноразмерном уровне. Усиление взаимодействия света с различными аналитами при помощи таких наноструктур позволяет достигать высокой чувствительности при обнаружении широкого спектра биомолекул (например, ДНК, экзосомы, вирусы, бактерии) [1]. Кроме того, возможность изготовления нанофотонных структур из различных материалов (например, плазмонные металлы, полупроводники с большим значением показателя преломления), интеграции с другими наноматериалами, а также функционализации позволяют создавать компактные и высокочувствительные оптические сенсорные системы.

В качестве примера таких систем, в докладе будут рассмотрены гибридные наноструктуры для термически-индуцированных преобразований органических соединений и их отслеживания в реальном времени при помощи резонансно-усиленного сигнала рамановского рассеяния [2]. Продемонстрировано, что резонансное взаимодействие света с такой наносистемой позволяет отслеживать термически индуцированные молекулярные события (например, разворачивание молекулы альбумина) в реальном времени с помощью усиленного комбинационного рассеяния как от наночастицы, так и от анализируемых молекул. Потенциал применения хиральных нанофотонных систем для биодетектирования будет представлен на примере обнаружения белка TDP-43, клинически значимого для нейродегенеративных заболеваний, на уровне фемтомолей при помощи массива наноструктур, обладающих трехмерной хиральной геометрией с функциональной наноархитектурой ядро-оболочка [3]. Отдельное внимание в докладе будет уделено применению колориметрических систем на основе резонансных цепочек полимерных наночастиц для экспресс-детектирования бактерий и вирусов [4, 5], а также бифункциональным нанофотонным платформам, сочетающих возможности как детектирования малых концентраций органических соединений в воде, так и их нейтрализации под действием солнечного света [6].

Таким образом, в докладе показан потенциал использования резонансных нанофотонных систем в оптических биосенсорах. Такие нанофотонные системы открывают новые горизонты для диагностики заболеваний, мониторинга биохимических процессов и разработки портативных аналитических инструментов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Федеральной программы поддержки академического лидерства «Приоритет 2030».

Список источников

[1] *Altug H. et al.* Advances and applications of nanophotonic biosensors // Nature nanotechnology. 2022. Vol. 17. № 1. P. 5–16. https://doi.org/10.1038/s41565-021-01045-5

[2] *Milichko V.A. et al.* Metal-dielectric nanocavity for real-time tracing molecular events with temperature feedback // Laser & Photonics Reviews. 2018. Vol. 12. № 1. Art. no. 1700227. https://doi.org/10.1002/lpor.201700227

[3] *Manoccio M. et al.* Femtomolar biodetection by a compact core-shell 3D chiral metamaterial // Nano Letters. 2021. Vol. 21. № 14. P. 6179–6187. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c01791

[4] *Zhang Z. et al.* Printed nanochain-based colorimetric assay for quantitative virus detection // Angewandte Chemie. 2021. Vol. 133. № 45. P. 24436–24442. https://doi.org/10.1002/anie.202109985

[5] *Zhang Z. et al.* Rapid identification and monitoring of multiple bacterial infections using printed nanoarrays // Advanced Materials. 2023. Vol. 35. № 12. Art. no. 2211363. https://doi.org/10.1002/adma.202211363

[6] *Khubezhov S.A. et al.* Fast and scalable fabrication of Ag/TiO2 nanostructured substrates for enhanced plasmonic sensing and photocatalytic applications // Applied Surface Science. 2024. Vol. 670. Art. no. 160669. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160669

Resonant nanostructures for nanophotonic biosensors

D.A. Zuev

Faculty of Physics, ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Resonant nanophotonic structures are promising systems for creating simple and efficient optical biosensors. As an example of such systems, the report considers hybrid nanostructures for thermally induced transformations of organic compounds and their tracking in real time via resonantly enhanced Raman signal, chiral nanosystems for highly sensitive detection of neurodegenerative diseases biomarkers, as well as colorimetric systems based on resonant nanochains for rapid viruses detection. Special attention is given to bifunctional nanophotonic platforms that can both detect small concentrations of organic compounds in water and neutralize them under sunlight.

Keywords: *resonant nanostructures, nanophotonics, biosensors*

Acknowledgement.

This research was supported by Priority 2030 Federal Academic Leadership Program.

Гибридные плазмонные наноалмазы для оптического нагрева и контроля температуры в биологических объектах

М.В. Зюзин, Е.Н. Герасимова, Л.В. Михайлова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Фототермическая терапия — это перспективный способ терапии злокачественных новообразований, который заключается в поглощении световой энергии наночастицами и преобразовании ее в тепло, что позволяет уничтожать злокачественные новообразования путем гипертермии. Ключевым аспектом эффективности фототермической терапии является точный контроль температуры, который позволяет минимизировать повреждение здоровых тканей и снизить число побочных эффектов. В данной работе представлен простой способ синтеза гибридных плазмонных наноалмазов, либо полностью покрытых золотой оболочкой (NV-Au), либо модифицированных наночастицами золота (NV-SiO_2-Au). Интеграция наноалмазов с золотыми наночастицами позволила осуществлять оптический нагрев с одновременным измерением температуры на наномасштабе посредством регистрации смещения оптически-детектируемого магнитного резонанса.

Ключевые слова: *нанотермометрия, флуоресцентные наноалмазы, оптически-детектируемый магнитный резонанс*

Введение

Фототермическая терапия с использованием наночастиц широко изучается в настоящее время как перспективный способ лечения онкологических заболеваний [1]. Этот метод основан на способности наночастиц поглощать световую энергию от лазерного излучения и превращать ее в тепло, что может быть использовано для уничтожения новообразований путем гипертермии. Однако чрезмерный нагрев влияет на такие клеточные функции как деление клеток, механизмы клеточной гибели (апоптоз или некроз), экспрессия генов роста и метаболизм [2]. Поэтому контроль температуры во время оптической гипертермии предотвращает возможные побочные эффекты и улучшает эффективность лечения.

Для измерения температуры в биологических объектах часто применяются флуоресцентные методы, основанные на температуро-чувствительном оптическом отклике наноматериалов, например, квантовых точек или красителей. Однако эти методы страдают от фотообесцвечивания и чувствительны к условиям окружающей среды. Эти недостатки можно обойти при использовании наноалмазов с азот-замешенными вакансиями (NV-центрами). NV-центры в алмазах чувствительны к внешней температуре. Ее изменение приводит к деформации кристаллической решетки наноалмаза и в результате чего частота парамагнитного резонанса электрона (ЭПР) NV-центра смещается. Для определения значения частоты ЭПР применяется методика оптически-детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) [3, 4]. Таким образом по смещению спектрального положения провала в интенсивности ОДМР можно определить локальную температуру на наномасштабе, в том числе в клетках и тканях.

Однако наноалмазы сами по себе не способны эффективно греться. Поэтому для осуществления оптической гипертермии с одновременным измерением температуры необходимо совместить нанотермеметр и нагревательный элемент в одной системе. Именно поэтому в этой работе мы предлагаем простые методы синтеза гибридных плазмонных наноалмазов с различной геометрией: (i) наноалмазы, полностью покрытые золотой оболочкой (NV–Au), и (ii) наноалмазы, модифицированные золотыми наночастицами (NV–SiO_2–Au), наряду с (iii) NV–SiO_2 и (iv) NV, выступающими в качестве контрольных образцов. Таким образом было показано, как материалы, состоящие из наноалмазов и золота, могут быть использованы для оптического нагрева с одновременным контролем температуры.

Материалы и методы

Все наноматериалы были изготовлена на основе коммерчески доступных наноалмазов. NV-центры были модифицированы оболочкой из диоксида кремния (NV–SiO_2) при помощи метода Штобера. NV–Au были получены с помощью одностадийной процедуры с использованием восстановления Au(III) до металлического Au в присутствии гидроксиламина при pH 8,5. NV–SiO_2–Au были синтезированы путем формирования золотых наночастиц, выращенных из семян, на покрытых диоксидом кремния наноалмазах при восстановлении с использовании $NaBH_4$.

Морфология полученных образцов исследовалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа LIBRA 200 FE HR, Carl Zeiss, с ускоряющим напряжением 200 кВ.

Измерения температуры проводились с использованием ОДМР при непрерывном микроволновом возбуждении. При возбуждении NV-центра лазером длиной волны 532 нм возникала фотолюминесценция. Если частота микроволнового поля совпадала с резонансной, интенсивность фотолюминесценции уменьшалась, потому что релаксация электрона происходила через безызлучательный синглетный переход, и, таким образом, наблюдался провал в интенсивности в спектре ОДМР. По спектральному сдвигу провала в ОДМР можно рассчитать локальную температуру.

Результаты и обсуждение

Коммерчески доступные наноалмазы были покрыты золотом с использованием различных методов для получения либо плотной оболочки (NV–Au), либо наноразмерных золотых частиц (NV–SiO_2–Au), прикрепленных к поверхности наноалмазов. Чистые наноалмазы (NV) и наноалмазы, покрытые оболочкой из диоксида кремния (NV–SiO_2) были использованы в качестве контроля. В результате было получено четыре различных типа наноструктур. Важно отметить, что оболочка из диоксида кремния предотвращает взаимодействие поверхности наноалмазов со средой, а также экранирует от внешних зарядов, что может влиять на сигнал контраста оптически-детектируемого магнитного резонанса, используемого для измерения температуры [5, 6]. Все полученные образцы на основе NV были визуализированы с использованием ПЭМ, что показано на рис. 1.

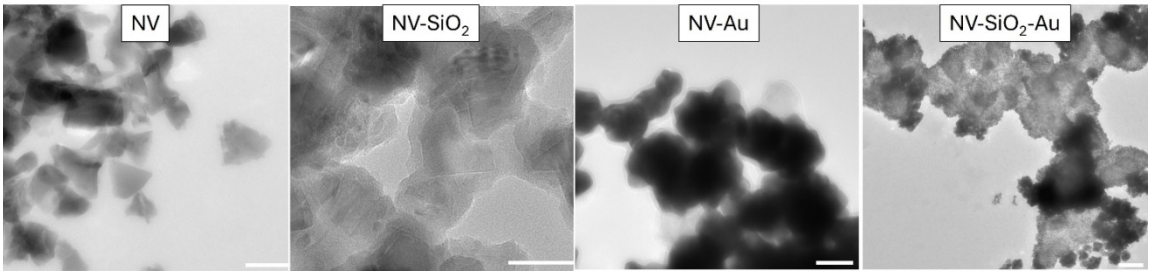


Рис. 1. Репрезентативные ПЭМ-снимки морфологии наноматериалов на основе наноалмазов. Масштабная линейка равна 50 нм

Затем способность к оптическому нагреву была протестирована для всех образцов (NV, NV–SiO_2, NV–Au и NV–SiO_2–Au) на стекле, в клетках *in vitro* и в срезах тканей *ex vivo*. При термометрии *in vitro* образцы NV, NV–SiO_2 и NV–SiO_2–Au инкубировались с клетками B16-F10 на протяжении ночи. Однако измерение температуры с помощью образца NV–Au в клетках оказалось невозможным, поскольку золотое покрытие, вероятно, вызывало миграцию заряда из наноструктур в клетки, что приводило к спиновой деполяризации. Для термометрии *ex vivo* образцы NV–SiO_2 и NV–SiO_2–Au были интратуморально введены лабораторным мышам. Через 24 часа опухоли были извлечены и нарезаны на слайсы, после чего спектры ОДМР срезов ткани, содержащих NV–SiO_2 и NV–SiO_2–Au, были измерены на различных плотностях мощности. Полученные результаты показали, что наибольший оптический нагрев на стекле наблюдалось у NV–SiO2–Au (275 ± 1,76 °C), за которым следовал NV–Au (255 ± 1,7 °C), тогда как нагрев в живых клетках был значительно ниже. Как и ожидалось, «чистые» наноалмазы и наноалмазы с покрытием из диоксида кремния не грелись при применяемых плотностях мощности лазера из-за отсутствия потерь материала в видимом диапазоне длин волн.

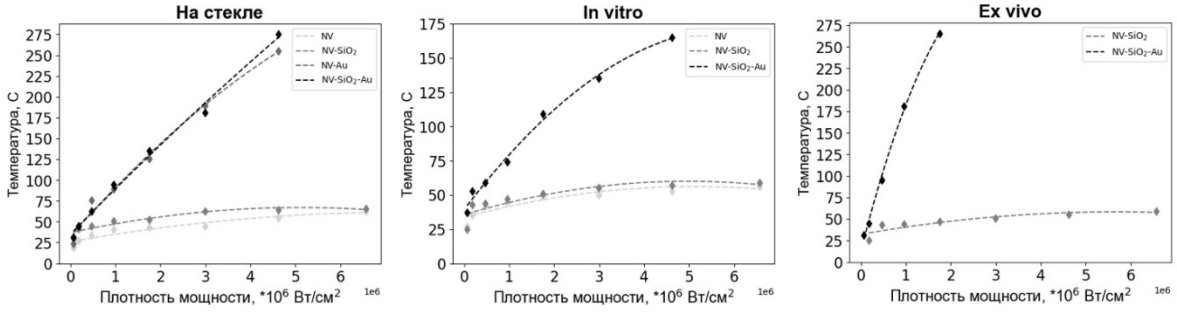


Рис. 2. Зависимость нагрева от приложенной плотности мощности лазера для измерений на стекле, внутри клеток (*in vitro*) и в срезах тканей опухоли (*ex vivo*)

Заключение

В данной работе представлены методики синтеза плазмонных наноалмазов, либо полностью покрытых слоем золота, либо модифицированных золотыми наночастицами. Также были всесторонне изучены нагревательные способности разработанных наноалмазов в различных средах: на стекле, в клетках *in vitro* и в срезах тканей опухолей *ex vivo*. Результаты исследования в дальнейшем могут быть полезны для реализации фототермической терапии с одновременным измерением температуры.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект FSER-2025-0011).

Список источников

[1] *Mikhailova L. et al.* A comparative study of plasmonic nanoparticles for targeted photothermal therapy of melanoma tumors using various irradiation modes // Light Advanced Manufacturing. 2025. Vol. 6. Art. no. 5.

[2] *Peltek O.O. et al.* Fluorescence-based thermometry for precise estimation of nanoparticle laser-induced heating in cancerous cells at nanoscale // Nanophotonics. De Gruyter Open Ltd., 2022. Vol. 11, № 18. P. 4323–4335.

[3] *Choi J. et al.* Probing and manipulating embryogenesis via nanoscale thermometry and temperature control // Proc Natl Acad Sci USA. National Academy of Sciences, 2020. Vol. 117, № 26. P. 14636–14641.

[4] *Kucsko G. et al.* Nanometre-scale thermometry in a living cell // Nature. 2013. Vol. 500, № 7460. P. 54–58.

[5] *Gerasimova E.N. et al.* Real-Time Temperature Monitoring of Photoinduced Cargo Release inside Living Cells Using Hybrid Capsules Decorated with Gold Nanoparticles and Fluorescent Nanodiamonds // ACS Appl Mater Interfaces. American Chemical Society, 2021. Vol. 13, № 31. P. 36737–36746.

[6] *Gerasimova E.N. et al.* Hybrid plasmonic nanodiamonds for thermometry and local photothermal therapy of melanoma: A comparative study // Nanophotonics. Walter de Gruyter GmbH, 2024. P. 1–15.

Hybrid plasmonic nanomaterials for optical heating and temperature monitoring in biological objects

M.V. Zyuzin, E.N. Gerasimova, L.V. Mikhailova

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

Photothermal therapy is a promising approach for the treatment of malignant neoplasms, which is based on the absorption of light energy by nanoparticles and its conversion into heat, enabling the destruction of malignant neoplasms through hyperthermia. A key aspect of the effectiveness of photothermal therapy is precise temperature control, which minimizes damage to healthy tissues and reduces the number of side effects. In this work, a simple method is presented for the synthesis of hybrid plasmonic nanodiamonds, either fully coated with a gold shell (NV–Au) or modified with gold nanoparticles (NV–SiO_2–Au). The integration of nanodiamonds with gold nanoparticles enables optical heating with simultaneous nanoscale temperature measurement by detecting the shift of optically detected magnetic resonance.

Keywords: *nanothermometry, fluorescent nanodiamonds, optically detected magnetic resonance*

Оптотермические пинцеты для биомедицинских применений

А.М. Майорова[1], С.П. Котова[1], Н.Н. Лосевский[1], С.А. Самагин[1], В.К. Урюпина[1, 2], Н.А. Горбунов[1, 3]

[1] *Самарский филиал ФИАН, Самара, Россия*
[2] *Самарский университет, Самара, Россия*
[3] *Медицинский университет «Реавиз», Самара, Россия*

В докладе внимание акцентируется на особенностях оптотермических пинцетов, актуальных для биомедицинских применений. В частности, демонстрируются возможности понижения температуры в области оптотермического манипулирования за счет работы в охлаждаемой кювете. Рассматриваются различные конфигурации лазерных ловушек для равномерного позиционирования микрообъектов с последующей фиксацией. Ловушки в виде массивов точек, колец и замкнутых контуров формируются с использованием жидкокристаллического пространственного модулятора света. Соответствующие фазовые маски рассчитывались на основе оптики спиральных пучков. Массивы ловушек формировались с помощью мозаичных фазовых элементов. Эксперименты проводились с различными микрообъектами, включая модифицированные полимерные микросферы с нанесенными антигенами.

Ключевые слова: *оптотермическое манипулирование, температура охлаждения, полимерные микросферы, антигены*

Актуальность и преимущества оптических пинцетах при работе с биологическими объектами отмечаются в первых работах А. Эшкина по оптическому манипулированию [1]. В последнее десятилетие наряду с оптическими пинцетами активно развивается техника оптотермического (термооптического) манипулирования [2, 3]. В оптотермических ловушках остросфокусированное световое поле не только формирует оптическую силу, но и создает в среде градиент температуры и соответственно конвекционные потоки. Микро- и нанообъекты в таких ловушках захватываются и переносятся потоками жидкости, что и определяет преимущества оптотермических пинцетов: можно захватывать объекты с относительно больших расстояний, управлять объектами разных размеров (от нм до сотен мкм), разной формы, поглощающими и прозрачными, что особенно важно для манипулирования биообъектами, с учетом их многообразия. В работах [3, 4] нами были предложены структурированные оптотермические ловушки с расширенными функциональными возможностями. Целью настоящей работы является демонстрация возможностей оптических и оптотермических ловушек для решения некоторых биомедицинских задач.

Во-первых, оптические и оптотермические пинцеты используются для манипулирования полимерными микросферами с нанесенными антигенами щитовидной железы и почек. Такие микросферы вызывают большой практический интерес в качестве основы тест-систем для быстрой и эффективной диагностики различных заболеваний, выявления инфекций и вирусов, применяются в различных методах анализа, а также в качестве биосенсоров [5]. Проведены эксперименты по выстраиванию полимерных микросфер с различными антигенами вдоль оптических ловушек в виде замкнутых контуров. Наблюдается разный характер движения микрочастиц к оптотермической ловушке в зависимости наличия и вида антигена. Микрочастицы с привитыми антигенами почек были зафиксированы вдоль границы ловушки в виде окружности либо квадрата. Мощность излучения для захвата и переноса микрочастиц составляла 20–30 мВт. Для фиксации использовался 2,5 % раствор альбумина. Фиксация происходила при увеличении мощности до 60 мВт.

Также измерены скорости отрыва микрочастиц в различных растворах. В схеме оптического пинцета использовался DPSS лазер с длиной волны излучения 532 нм и максимальной выходной мощностью 30 мВт. Скорости и соответственно отрывные силы различаются в зависимости от нанесенных биомаркеров (см. таблицу), что, скорее всего, связано с изменением адгезивных свойств микрочастиц при нанесении биомаркеров различного типа. В перспективе эти результаты могут быть использованы для сортировки микрообъектов одного размера, но с разными химико-физическими свойствами.

Экспериментальные значения скорости отрыва и силы оптической ловушки

Исследуемые микрообъекты	**Максимальная скорость в момент отрыва, мкм/с**	**Отрывная сила, фН**
Микросферы латекса 2 мкм	39,4 ± 10,6	742,2 ± 147,8
Микросферы латекса 2 мкм с антигенами щитовидной железы	20,3 ± 5,5	382,0 ± 101,4
Микросферы латекса 2 мкм с антигенами почек	44,9 ± 9,9	845,8 ± 192,3

Были продолжены эксперименты по равномерному выстраиванию микрообъектов массивом точечных лазерных ловушек, сформированными секторными и мозаичными дифракционными оптическими элементами [6, 7]. Представляется, что разрабатываемый метод бесконтактной транспортировки и позиционирования объектов микронных и субмикронных размеров может быть интересен с точки зрения разработки новых способов выделения и культивирования микроорганизмов, для задач тканевой инженерии. Эксперименты проводились с микрочастицами латекса и клетками дрожжей. Вязкость раствора изменялась за счет изменения концентрации альбумина. Показано, что точность позиционирования микрочастиц в массивы ловушек зависит от параметров ловушки, концентрации микрочастиц и их размеров, а также параметров раствора.

Другим направлением исследований стали работы по понижению температуры в оптотермической ловушке за счет работы в специальной охлаждаемой кювете. Была изготовлена охлаждаемая рабочая кювета с прозрачным дном для оптического пинцета на базе микроскопа XSP-104. Диаметр рабочей области кюветы — 30 мм, глубина — 10 мм, стенки выполнены из алюминия, дно изготовлено из стекла К-8. Охлаждение жидкости внутри кюветы производится за счет прокачки дистиллированной воды с температурой 6–7 °С (из термостата) через пластиковую водяную «рубашку», окружающую рабочую область кюветы. Отбор тепла от жидкости в кювете происходит через алюминиевые стенки. Контроль интегральной температуры жидкости внутри кюветы осуществляется за счет термопарного датчика, погруженного в жидкость в рабочей зоне кюветы. Результаты модельных и натурных экспериментов (с микрочастицами латекса) в точечной и кольцевой оптотермических ловушках, выполненные при мощностях лазерного излучения 46 мВт и 15 мВт, продемонстрировали возможность понижения температуры в области оптотермического манипулирования до 25–35 °С (вместо 40–50 °С для обычной кюветы). Такие температуры актуальны для работы с биообъектами.

Список источников

[1] *Ashkin A. et al.* Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams // Nature. 1987. Vol. 330. P. 769–771.

[2] *Kollipara P.S. et al.* Optical manipulation heats up: Present and future of optothermal manipulation // ACS nano. 2023. Vol. 17. № 8. P. 7051–7063.

[3] *Kotova S.P. et al.* Manipulation of microparticles using combined optical traps // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2021. Vol. 268. Art. no. 107641.

[4] *Котова С.П. и др.* Структурированные оптотермические ловушки // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Vol. 86. № 2. Art. no. 107641.

[5] *Zhai M. et al.* Polymer microspheres and their application in cancer diagnosis and treatment // International journal of molecular sciences. 2024. Vol. 25. № 12. Art. no. 6556.

[6] *Mayorova A.M. et al.* Capabilities of Optothermal Traps for the Spatial Ordering of Microscopic Objects // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. Vol. 88. № 12. P. 1869–1874.

[7] *Котова С.П. и др.* Оптотермические ловушки на основе мозаичных фазовых масок // Квантовая электроника. 2024. Т. 56. № 6. С. 355–361.

Optothermal tweezers for biomedical applications

A.M. Mayorova[1], S.P. Kotova[2], N.N. Losevsky[1], S.A. Samagin[1], V.K. Uryupina[1, 2], N.A. Gorbunov[1, 3]

[1] *Samara branch of the P.N. Lebedev Physical Institute, Samara, Russia*
[2] *Samara University, Samara, Russia*
[3] *Reaviz Medical University, Samara, Russia*

The report focuses on the features of optothermal tweezers for biomedical applications. In particular, we demonstrate the capabilities to lower the temperature in the area of laser manipulation by working in a cooled cuvette. Various configurations of laser traps are considered for uniform positioning of micro-objects with subsequent fixation. Traps in the shape of rings, closed contours, arrays of dots were formed using a liquid crystal spatial light modulator. The corresponding phase masks were calculated based on the optics of spiral beams. Arrays of traps were formed using mosaic phase elements. Experiments were conducted with various microobjects, including modified polymer microspheres with applied antigens.

Keywords: *optothermal manipulation, cooling temperature, polymer microspheres, antigens*

Особенности отклика клеток на фотодинамическое воздействие с протопорфирином IX

А.В. Белашов[1], А.А. Жихорева[1], И.А. Горбунова[1], М.Э. Сасин[1], Д.М. Бельтюкова[1], Д.А. Горбенко[2], М.В. Белашов[2], И.В. Семенова[1], О.С. Васютинский[1]

[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

В докладе представлены результаты исследования фотофизических свойств фотосенсибилизатора протопорфирин IX (PpIX) в растворах с альбумином, и механизмов гибели клеток при фотодинамическом воздействии с эндогенно генерируемым PpIX. Эксперименты проводились методами время-разрешенной спектроскопии и голографической микроскопии и томографии. Проведено исследование аффинности PpIX к альбумину и эффективность генерации синглетного кислорода при связывании PpIX с альбумином. Показано заметное различие в реакции клеток на фотодинамическое воздействие при их культивировании в среде при наличии и отсутствии альбумина.

Ключевые слова: *протопорфирин IX, альбумин, синглетный кислород, фотодинамическое воздействие, механизмы клеточной гибели*

Введение

Протопорфирин IX (PpIX), непосредственный предшественник гема, цитохрома и хлорофилла, является незаменимой молекулой для различных живых организмов, от бактерий до человека. PpIX также является эффективным эндогенным фотосенсибилизатором, широко используемым в фотодинамической терапии и диагностике. Предшественником PpIX в биосинтезе гема является 5-аминолевулиновая кислота (5-ALA). Дополнительное введение 5-ALA позволяет повысить формирование PpIX в клетках и, таким образом, усилить его фототоксичность. PpIX ($C_{34}H_{34}N_4O_4$, 562 г/моль) синтезируется в матриксе митохондрий, затем его избыток, не задействованный в формировании гема, выводится в цитоплазму, где распределяется между разными органеллами, а затем выводится из клеток. В кровотоке он, вероятно, связывается с транспортными белками, в частности, с сывороточными альбуминами. Понимание взаимодействия PpIX с альбуминами важно для анализа путей его доставки к таргетным тканям, а также ввиду интереса к потенциальному прямому введению экзогенного PpIX путем внутривенных инъекций.

Фотофизические и фотохимические свойства PpIX, как и других фотосенсибилизаторов порфиринового ряда, сильно зависят от микроокружения, окружающего тетрапиррольное кольцо, а связывание с белками может вызывать изменения этих свойств и влиять на генерацию активных форм кислорода. На взаимодействие между молекулами PpIX и альбумина также могут влиять изменения свойств окружающей среды, в частности, кислотности и полярности, что связано с изменениями зарядовых состояний молекул, их конформаций и/или агрегации. Известно, что в растворе PpIX присутствует в трех формах, которые находятся в равновесии: мономеры и агрегаты двух типов, характеризующиеся разной упаковкой молекул: H (face-to-face) и J (head-to-tail). Несмотря на то, что при нормальном pH 7,3 PpIX имеет отрицательный заряд, и общий заряд BSA также отрицательный, PpIX демонстрирует аффинность к BSA; и в растворах с BSA устанавливается равновесие между свободными мономерами и агрегатами PpIX, а также между мономерами свободными и связанными с BSA, и между агрегатами свободными и связанными с BSA.

В докладе представлен анализ фотофизических свойств PpIX в растворах с бычьим сывороточным альбумином (BSA) с использованием время-разрешенной поляризационной флуоресцентной спектроскопии, а также анализ эффективности генерации синглетного кислорода (SO) в растворах PpIX с альбумином. Проведено исследование реакции живых клеток на фотодинамическое воздействие (ФДВ) с эндогенно генерируемым PpIX при их культивировании в среде при наличии и отсутствии альбумина.

Материалы и методы

Экспериментальные растворы приготавливали на основе PBS. BSA (Amresco, США) добавляли к PBS в разных концентрациях от 7,5 до 180 мкМ. PpIX (Sigma Aldrich) добавляли к растворам в одной и той же концентрации 29 мкМ.

Время-разрешенные сигналы поляризованной флуоресценции PpIX регистрировались с помощью экспериментальной установки, подробно описанной в нашей предыдущей публикации [1]. Двухфотонное возбуждение молекул PpIX осуществлялось на длине волны 810 нм Ti:Sa лазером MaiTai (Spectra Physics) с длительностью импульса 100 фс и частотой повторения импульсов

80,4 МГц. Режим двухфотонного возбуждения был выбран для достижения более высокой анизотропии флуоресценции по сравнению с однофотонным режимом. Ортогонально поляризованные компоненты сигнала флуоресценции $I_{\parallel}$ и $I_{\perp}$ разделялись призмой Глана, выделялись с помощью фильтров SP700 и BP633/30 и регистрировались двумя сверхбыстрыми фотодетекторами SPAD SPD-050-CTC. Накопление данных проводилось в течение нескольких сотен секунд, что позволяло достичь хорошего качества сигналов и обеспечить надежную глобальную подгонку поляризованных компонент флуоресценции.

В экспериментах по детектированию фосфоресценции синглетного кислорода молекулы PpIX возбуждались импульсным полупроводниковым лазером на длине волны 405 нм. Для получения время-разрешенных сигналов фосфоресценции синглетного кислорода использовался полупроводниковый лазер с длительностью импульса 100 нс и частотой повторения импульсов 40 кГц. Спектральное выделение сигналов люминесценции осуществлялось монохроматором МДР-12 (ЛОМО), детектирование фосфоресценции синглетного кислорода проводилось в полосе 1270–1284 нм. Регистрация проводилась в режиме счета фотонов с использованием ИК-фотоумножителя H10330B-45 (Hamamatsu), чувствительного в спектральном диапазоне 960–1400 нм, время накопления сигнала составляло 1000 секунд.

Исследование динамики 5-ALA-индуцированного накопления PpIX в клетках проводилось на клеточной линии HeLa. Клетки культивировали в чашках Петри на стеклах в среде DMEM, содержащей 10 % эмбриональной бычьей сыворотки и 1 % пенициллина/стрептомицина в атмосфере 5 % CO_2, 50 % влажности при 37°C. Эксперименты проводили через 48 часов после посева клеток при достижении 60−70 % монослоя. Далее культуральную среду заменяли на среду, содержащую 5-ALA в разной концентрации от 0 до 175 мкг/мл, и клетки инкубировали от 1 до 4 часов. Затем клетки промывали PBS и исследовали на конфокальном флуоресцентном микроскопе Olympus FV3000. Флуоресценцию PpIX возбуждали на длине волны 405 нм и детектировали в диапазоне длин волн 610−650 нм. Для исследования отклика клеток на ФДВ с PpIX после 4-часовой инкубации в DMEM с 5-ALA в концентрации 100 мкг/мл клетки промывали PBS и облучали лазером на длине волны 405 нм в течение 5 минут при разной плотности мощности излучения в диапазоне от 3 до 50 мВт/см^2. Через 2 часа после ФДВ клетки фиксировали 3 % раствором формалина (Sigma, США) и исследовали с помощью лабораторного цифрового голографического микроскопа или голографического томографического микроскопа 3D Cell Explorer (Nanolive).

Результаты и обсуждение

На рис. 1, (a) представлены примеры зарегистрированных ортогонально поляризованных сигналов флуоресценции PpIX в чистом PBS. Фитинг сигналов одноэкспоненциальной функцией дал эффективное время жизни флуоресценции 6 нс и анизотропию флуоресценции 0,25. Время вращательной диффузии свободного PpIX составило 300 пс. Добавление BSA к PBS в концентрации 180 мкМ привело как к увеличению интенсивности флуоресценции PpIX, так и к увеличению вклада медленной компоненты затухания анизотропии флуоресценции (время вращательной диффузии более 20 нс), что можно отнести к комплексам PpIX с молекулами BSA, поскольку молекулярная масса BSA на два порядка выше, чем у PpIX. Примеры разрешенных по времени сигналов флуоресценции с ортогональными поляризациями и время-разрешенный сигнал анизотропии флуоресценции, полученный для раствора PpIX с BSA, показаны на рис. 1, (b). Глобальный фитинг сигналов флуоресценции проводился на основе двухкомпонентной модели. Время жизни флуоресценции и анизотропия флуоресценции связанных молекул PpIX были определены как 8 нс и 0,15, соответственно. При увеличении концентрацией BSA наблюдалось увеличение фракции связанных молекул PpIX (рис. 1, (c)). Заметим, что аффинность PpIX к BSA оказалась ниже, чем у других молекул на основе порфирина, хлорина e6 и Радахлорина, к BSA и HSA, достигавшая 0,9 при высоких концентрациях альбумина [2].

На рис. 2 представлены время-разрешенные сигналы фосфоресценции синглетного кислорода в растворе PpIX в чистом PBS и в PBS, содержащем BSA в концентрации 30 мкМ, примерно равной концентрации PpIX. Как видно, наличие альбумина привело к увеличению интенсивности сигнала, смещению максимума в сторону большего времени и подъем хвоста сигнала. Фитинг сигнала в чистом PBS стандартной двух-экспоненциальной функцией дал типичные значения времен генерации и дезактивации фосфоресценции синглетного кислорода в водных растворах: 2,5 мкс и 3,1 мкс соответственно. Сигналы, зарегистрированные в растворах с BSA, фитировались в соответствии с моделью, предложенной нами в [3] и учитывающей вклады фосфоресценции синглетного кислорода, создаваемой свободными и связанными с альбумином молекулами PpIX, а также фосфоресценции

триплетного состояния молекул PpIX, связанных с альбумином. Характерные времена фосфоресценции синглетного кислорода составили при этом 3 мкс и более 20 мкс.

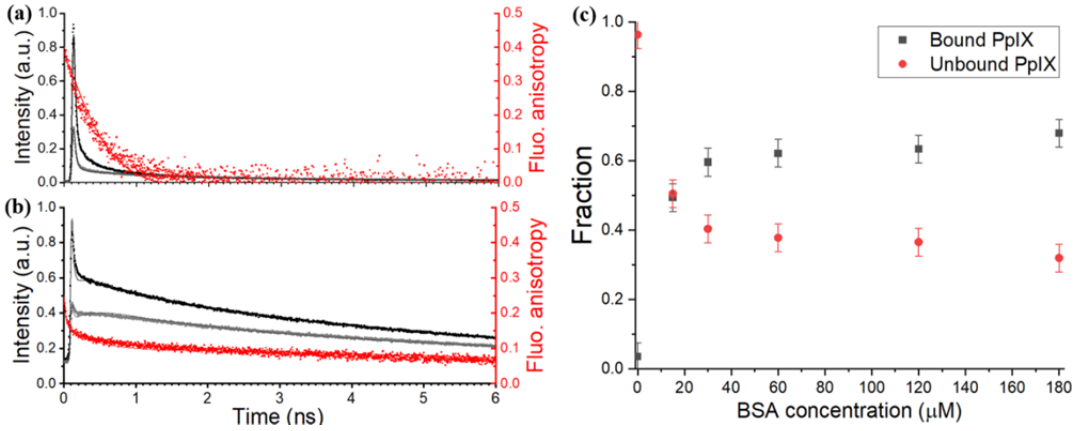
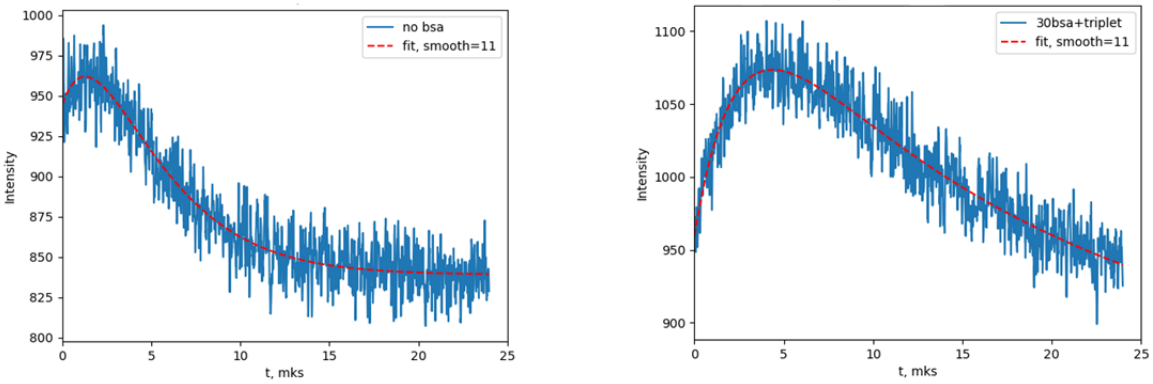


Рис. 1. Ортогонально поляризованные компоненты время-разрешенного сигнала флуоресценции PpIX (черная и серая кривые) и анизотропия флуоресценции (красная кривая) для (a) раствора PpIX в чистом PBS, (b) раствора PpIX в PBS с 180 мкМ BSA. (c) Зависимость фракций связанного и свободного PpIX от концентрации BSA в растворе



(a) (b)

Рис. 2. Время-разрешенные сигналы фосфоресценции синглетного кислорода в растворах PpIX без BSA (a) и содержащих BSA в концентрации 30 мкМ (б)

Интересно, что вклад сигнала фосфоресценции синглетного кислорода, продуцируемого молекулами PpIX, связанными с альбумином, в общий сигнал фосфоресценции преобладает над двумя другими сигналами. Это может быть связано с дезагрегацией агрегатов PpIX в комплексах с молекулами альбумина. Отметим также, что согласно данным, представленным на рис. 1(c), даже при высоких концентрациях BSA в растворе не достигается полного связывания PpIX и некоторая доля фосфоресценции синглетного кислорода, продуцируемой свободным PpIX, наблюдается при всех концентрациях BSA.

При исследовании накопления PpIX в клетках линии HeLa было показано, что максимальная интенсивность флуоресценции PpIX достигается при 3-часовой инкубации с 5-ALA в концентрации 100 мкг/мл. Это приводило к 43 %-ному увеличению сигнала флуоресценции PpIX в клетках [4]. Дальнейшее увеличение концентрации 5-ALA и/или времени инкубации не приводило к какому-либо значимому увеличению интенсивности флуоресценции PpIX.

Облучение фотосенсибилизированных клеток HeLa показало существенную зависимость реакции клеток от дозы облучения. Как видно из рисунка 3, при малых дозах облучения (3–10 мВт/см^2) происходит увеличение среднего фазового набега и отсутствуют статистически значимые изменения сухой массы клеток. Как было показано нами ранее [5], такие изменения характерны для гибели клеток путем апоптоза, который сопровождается дегидратацией и ошариванием клетки при сохранении целостности ее мембраны. При высоких дозах облучения (25 и 50 мВт/см^2) наблюдается ста-

тистически значимое уменьшение среднего фазового набега и сухой массы клеток по сравнению с контрольными образцами. Такие изменения этих параметров характерны для гибели клеток путем некроза, в ходе которого происходит разрыв мембраны и вытекание внутриклеточной среды наружу. При этом, если клетки инкубировались с 5-ALA в культуральной среде без добавления сыворотки, гибель клеток наступала при меньших дозах облучения.

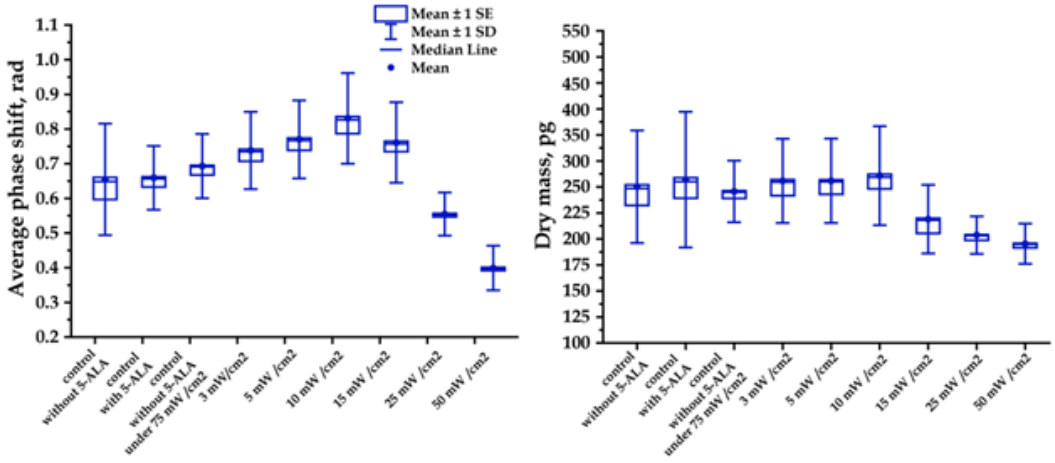


Рис. 3. Зависимость среднего фазового набега и сухой массы в популяциях клеток HeLa после фотодинамического воздействия с PpIX при разных дозах облучения

Полученные результаты продемонстрировали существенные различия во взаимодействии PpIX и других фотосенсибилизаторов порфиринового ряда, хлорина e6 и Радахлорина, с BSA. Показано, что PpIX имеет меньшую аффинность к BSA. Наблюдаемое увеличение сигнала люминесценции в спектральном диапазоне, соответствующем фосфоресценции синглетного кислорода, можно объяснить дезагрегацией димеров PpIX при связывании с альбумином и генерацией синглетного кислорода связанными молекулами PpIX, а также увеличением сигнала фосфоресценции от возбужденного триплетного состояния PpIX. Значительное изменение времени вращательной диффузии при связывании молекул PpIX с альбумином позволяет предположить, что данный подход может быть эффективно использован для оценки фракций свободного и связанного PpIX и для дальнейших выводов об эффективности генерации синглетного кислорода в растворах и, возможно, в живых клетках. Были определены оптимальная концентрация 5-ALA и время инкубации клеток in vitro, приводящие к наиболее эффективной генерации протопорфирина IX и определены дозы облучения, приводящие к гибели клеток путем апоптоза и некроза.

Благодарность

Авторы благодарят коллег из института Цитологии РАН Т.Н. Беляеву, А.В. Салову, И.К. Литвинова и Е.С. Корнилову, за клеточные образцы и полезные обсуждения.

Список источников

[1] *Gorbunova I.A.et al.* Fluorescence anisotropy in Radachlorin and chlorin e6 in water-methanol solutions under one-and two-photon excitation // Photonics. 2022. Vol. 10. № 9.

[2] *Belashov A.V. et al.* Photophysical, rotational and translational properties of Radachlorin photosensitizer upon binding to serum albumins // Biochimica et Biophysica Acta – General Subjects. 2024. Vol. 1868. Art. no. 130546.

[3] *Beltukova D.M. et al.* Time-resolved phosphorescence analysis of singlet oxygen generation and Radachlorin/Ce6 triplet state quenching in solutions with albumin // Chemical Physics Letters. 2025. Vol. 861. Art. no. 141826.

[4] *Горбенко Д.А. и др.* Динамика накопления протопорфирина IX, индуцированного 5-аминолевулиновой кислотой в трех клеточных линиях разного происхождения» // Журнал технической физики. 2012. Т. 91. Вып. 1. Р. 162–166.

[5] *Belashov A.V. et al.* Quantitative assessment of changes in cellular morphology at photodynamic treatment in vitro by means of digital holographic microscopy // Biomedical Optics Express. 2019. Vol. 10. № 10. P. 4975–4986.

Specific aspects of cell response to photodynamic treatment with protoporphyrin IX

A.V. Belashov[1], A.A. Zhikhoreva[1], I.A. Gorbunova[1], M.E. Sasin[1], D.M. Beltukova[1], D.A. Gorbenko[2], M.V. Belashov[2], I.V. Semenova[1], O.S. Vasyutinskii[1]

[1] *Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia*
[2] *ITMO University, Saint-Petersburg, Russia*

In this report we present experimental study of the mechanisms of cell death under photodynamic treatment (PDT) with the endogenously generated photosensitizer protoporphyrin IX (PpIX). Experiments were performed using holographic tomography. A noticeable difference in the response of cells to PDT has been observed at their cultivation in the serum-free and serum-containing culture media. The affinity of PpIX to albumin and the efficiency of singlet oxygen generation at PpIX binding to albumin were investigated.

Keywords: *protoporphyrin IX, albumin, singlet oxygen, photodynamic treatment, cell death pathways*

Мультимодальный подход к фототерапии рака

Э.А. Генина[1], А.Б. Бучарская[2], В.Д. Генин[1], Н.А. Наволокин[2], Н.А. Шушунова[2], О. Иноземцева[1], Д.В. Сафронов[2], Б.Н. Хлебцов[3], В.В. Тучин[1, 4, 5]

[1] *Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*
[2] *Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского Минздрава России, Саратов, Россия*
[3] *Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия*
[4] *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
[5] *Институт проблем точной механики и управления РАН, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов, Россия*

Разработаны технологии комбинированной терапии модельного рака, включающие лазерную плазмонную фототермическую терапию и фотодинамическую терапию. В качестве сенсибилизаторов использовались золотые наностержни, растворы Фотосенса и индоцианинового зеленого. Для облучения использовались диодные лазеры (662 и 808 нм). Результаты морфологического исследования опухолей через 72 часа и 21 день после воздействия показали максимальную некротизацию опухоли при комбинированном воздействии.

Ключевые слова: *лазерная плазмонная фототермическая терапия, золотые наностержни, фотодинамическая терапия, модельная опухоль*

Введение

Эффективность фототерапии как метода лечения рака подтверждена многочисленными исследованиями [1, 2]. Основным преимуществом фототерапии перед хирургическим удалением, химиотерапией и лучевой терапией является, с одной стороны, селективность и таргетность, а с другой, отсутствие инвазивности и серьезных побочных эффектов. Фототерапевтические методы включают фотодинамическую терапию (ФДТ) и фототермическую терапию (ФТТ). Однако использование ФДТ и ФТТ как монотерапии не всегда достаточно эффективно. В последние годы разрабатываются двухлучевые и однолучевые ФДТ/ФТТ подходы и комбинирование фототерапии с химиотерапией, иммунной терапией и другими методами [3, 4].

Целью данной работы является разработка мультимодального подхода к терапии рака, включающего лазерную плазмонную ФТТ и ФДТ.

Материалы и методы

Для проведения ФТТ использовались золотые наностержни (ЗНС). Среднее отношение длина/диаметр ЗНС составляло 4,03 ± 0,72, что обеспечило максимум поглощения суспензии вблизи 800 нм. Концентрация ЗНС в суспензии составляла 400 мкг/мл.

В качестве фотосенсибилизаторов использовались растворы индоцианинового зеленого (ИЗ) и Фотосенса (ФС). Максимумы поглощения растворов составляли 790 нм (ИЗ) и 670 нм (ФС).

Исследования проводились *in vivo* на лабораторных животных. Штамм холангиокарциномы РС-1 прививался крысам линии Wistar в область лопатки.

При достижении опухолью достаточного размера животные случайным образом были разделены на группы: без воздействия, ФТТ, ФДТ-ИЗ, ФДТ-ФС и комбинированного воздействия ФТТ/ФДТ-ИЗ и ФТТ/ФДТ-ФС.

Облучение проводилось чрескожно. В зависимости от используемого сенсибилизатора источником излучения на длине волны 808 нм служил диодный лазер LS-2-N-808-10000 («Лазерные системы», Россия, 2,3 Вт/см^2) и на длине волны 662 нм — лазерный медицинский аппарат Латус-Т («Аткус», Россия, 0,5 Вт/см^2). Температура нагрева области облучения контролировалась тепловизором IRI4010 (IRYSYS, Великобритания).

До и после облучения измерялись спектры диффузного отражения области над опухолью с помощью спектрометров USB4000-Vis-NIR и NIRQuest («Ocean Optics», США, 400–2100 нм).

Через 72 часа и 21 день после процедур животные выводились из эксперимента. Опухоли измерялись и помещались в раствор формалина для последующего морфологического исследования.

Результаты

При проведении ФДТ температура локального нагрева опухолей повышалась не выше 37±2 °С. При проведении ФТТ и ФТТ/ФДТ за счет нагрева ЗНС отмечали выраженный подъем температуры, вплоть до 48–50 °С.

После проведения ФТТ отмечалось значительное торможение роста опухолей – до 90%, при морфологическом исследовании тканей в области лазерного воздействия наблюдались сохранные опухолевые клетки только под капсулой опухоли. При проведении комбинированной терапии ФТТ/ФДТ-ИЗ через 21 день наблюдалось исчезновение всех опухолевых очагов, при морфологическом исследовании опухолевых клеток в области воздействия не обнаружилось.

Спектральные измерения выявили изменение содержания воды и гемоглобина при проведении процедур.

Заключение

Разработанный протокол комбинированной ФТТ/ФДТ вызывает более выраженное повреждение опухолевой ткани, чем при монотерапии.

Благодарность

Работа поддержана грантом РНФ № 23-14-00287.

Список источников

[1] *Kim M. et al.* Plasmonic photothermal nanoparticles for biomedical applications // Advanced Science. 2019. Vol. 6. № 17. Art. no. 1900471. https://doi.org/10.1002/advs.201900471

[2] *Bucharskaya A. et al.* Photothermal and photodynamic therapy of tumors with plasmonic nanoparticles: challenges and prospects // Materials. 2022. Vol. 15. № 4. Art. no. 1606. https://doi.org/10.3390/MA15041606.

[3] *Kim G.L. et al.* Dual effect of chemo-PDT with tumor targeting nanoparticles containing iRGD peptide // Pharmaceutics. 2023. Vol. 15. Art. no. 614. https://doi.org/10.3390/Pharmaceutics15020614

[4] *Guo S. et al.* Combined photothermal and photodynamic therapy for cancer treatment using a multifunctional graphene oxide // Pharmaceutics. 2022. Vol. 14. Art. no. 1365. https://doi.org/10.3390/ pharmaceutics14071365

Multimodal approach to cancer phototherapy

E.A. Genina[1], A.B. Bucharskaya[2], V.D. Genin[1], N.A. Navolokin[2], N.A. Shushunova[2], O. Inozemtseva[1], D.V. Safronov[2], B.N. Khlebtsov[3], V.V. Tuchin[1,4,5]

[1] *Saratov State University, Saratov, Russia*
[2] *Saratov State Medical University, Saratov, Russia*
[3] *Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms of the RAS, FRC "Saratov Scientific Center of the RAS", Saratov, Russia*
[4] *Tomsk State University, Tomsk, Russia*
[5] *Institute of Precision Mechanics and Control Problems of the RAS, FRC "Saratov Scientific Center of the RAS", Saratov, Russia*

Technologies of combined therapy of model cancer, including laser plasmon photothermal therapy and photodynamic therapy were developed. Gold nanorods, solutions of Photosens and Indocyanine Green were used as sensitizers. Diode lasers (660 and 808 nm) were used for irradiation. The results of morphological examination of the tumors 72 hours and 21 days after exposure showed maximum tumor necrosis with combined exposure.

Keywords: *laser plasmon photothermal therapy, gold nanorods, photodynamic therapy, model tumor*

Исследование оптического просветления *in-vivo* в условиях развития экспериментального диабета 1 типа методами ОКТ и спекл-визуализации

П.А. Тимошина[1, 2, 3], Ковалев А.Д.[1], Сыров М.В.[1], Ю. И. Сурков[1, 3], В. В. Тучин[1, 2, 3]

[1] *Институт физики, Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*
[2] *Лаборатория лазерной молекулярной визуализации и машинного обучения, Томский государственный университет, Томск, Россия*
[3] *Лаборатория биомедицинской фотоакустики, Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*

Используя комбинацию диагностических методов, включая лазерную спекл-контрастную визуализацию и оптическую когерентную томографию, в исследовании изучается возможность дифференциации тканей здоровых крыс и крыс с экспериментальным диабетом 1 типа на основе характера динамических и структурных изменений, которые происходят при местном применении оптических просветляющих агентов. Кроме того, были оценены эффективность магнитно-резонансных контрастных и рентгеноконтрастных агентов в целях снижения рассеяния.

Ключевые слова: *оптика, спекл-визуализация, оптическое просветление*

Введение

Патогенетические механизмы, лежащие в основе микрососудистых осложнений при сахарном диабете, включают химические реакции между сахарами и белками, что приводит к образованию необратимых сшитых производных белков, называемых конечными продуктами гликирования (AGE). Эти производные оказывают различные эффекты на структуру биологических тканей, такие как модификация (например, утолщение) коллагена и эндотелия [1, 2]. Достижения в совершенствовании существующих неинвазивных оптических методов диагностики и разработке новых критериев оценки влияния диабета на ткани и сосудистые системы весьма востребованы. Используя комбинацию диагностических методов, включающую лазерную спекл-контрастную визуализацию (ЛСКВ) и оптическую когерентную томографию (ОКТ) и метода оптического просветления (ОП) [1, 3], в настоящем исследовании изучалась возможность дифференциации тканей здоровых ушей крыс и ушей крыс в условиях развития аллоксанового диабета 1 типа (АД1Т) на основе характера динамических и структурных изменений, которые происходят при местном применении магнитно-резонансных (Гадовист®, Магневист®), рентген контрастного агентов (Аккупак-300®).

Материалы и методы

В экспериментах в качестве оптических просветляющих агентов (ОПА) использовались магнитно-резонансные агенты Магневист® (активное вещество гадопентетат димеглюмина 938,02 мг/моль, 0,5 ммоль/мл, Bayer HealthCare Pharmaceuticals, Германия), Гадовист® (активное вещество гадобутрол, мол. масса 604,72 мг/моль, 1,0 ммоль/мл, Bayer HealthCare Pharmaceuticals, Германия). Как Гадовист® (1,0 ммоль $мл^{-1}$), так и Магневист® (0,5 ммоль $мл^{-1}$) использовались в рекомендуемых производителем (неразбавленных) концентрациях; серийное разбавление не проводилось. Также рентген контрастный агент Аккупак-300® (действующее вещество Йогексол, 647 мг/мл, GE Healthcare Buchler GmbH & Co.KG, Германия).

Исследования на животных одобрены этическим комитетом Саратовского государственного медицинского университета (протокол № 5 от 5 ноября 2024 г.). Микроциркуляцию крови визуализировали на 24 белых крысах породы Вистар массой 200–350 г. В качестве области исследования рассматривали уши лабораторных крыс. Лабораторных животных разделили на контрольную группу (КГ) и диабетическую группу (АД1Т). Развитие модельного АД1Т у крыс (18 особей) вызывали однократной внутримышечной инъекцией аллоксана (Acros Organic, Бельгия), растворенного в физиологическом растворе. Средние значения уровня свободной глюкозы в крови крыс, взятой из хвостовой вены, измеренные натощак с помощью глюкометра Accu-Chek Performa (Roche Diagnostics, Германия) до введения аллоксана, через 2 недели после инъекции в день эксперимента составили 74±5 и 380±86 мг/дл соответственно.

Краткосрочные эффекты воздействия на микрогемодинамику в ушах лабораторных крыс при местном нанесении ОПА анализировали с помощью ЛСКВ. Спекл-изображения сосудов исследуемой области уха лабораторных крыс регистрировали до и после нанесения агентов на исследуемую область в течение 15 мин с момента первой аппликации.

В методе ЛСКВ проводится оценка контраста усредняемых по времени динамических спеклов в зависимости от времени усреднения спекл-модулированных изображений. Расчет пространственного контраста (LSC) производился по регистрируемому изображению спекл-поля по области, раз-

мер которой составил 7×7 пикселей [4]. Контраст спекл-изображений (LSC) рассчитывается как отношение стандартного отклонения флуктуаций интенсивности для многих пикселей в выбранной области в разное время и средней интенсивности пикселей, усредненной для всех пикселей области. Расчет контраста спекл-изображений производился с различных областей — динамической области сосудов ($LSC_{dynamic}$) залегающих в тканях ушей и со статических областей уха без сосудов (LSC_{static}). В экспериментальной установке в качестве детектора использовалась КМОП-камера (серия Thorlabs CS235MU Kiralux, матрица 1920×1200 пикселей (2,3 МП), размер пикселя 5,86×5,86 мкм; 12 бит/пиксель) со временем экспозиции 10–15 мс и объективом с увеличением 4х. Лазерный луч от He–Ne лазера HNL210L (Thorlabs) с длиной волны 633 нм направлялся по оптоволокну на коллимирующее зеркало и далее на исследуемый объект, расположенный на специальном стеклянном столике, чтобы проводить запись спекл-изображений в проходящем свете через исследуемую область.

При ОКТ-визуализации ухо лабораторной крысы помещали на специализированную подложку под ОКТ-систему. Перед нанесением агентов получали два ОКТ-изображения с интервалом в 1 минуту между ними. Затем агенты местно наносили на исследуемую область уха. ОКТ-мониторинг возобновляли сразу после нанесения, и ОКТ-изображения получали каждую минуту в течение 15 минут. Для ОКТ-мониторинга использовался спектральный томограф GAN930V2-BU (Thorlabs, США), работающий на центральной длине волны 930 нм с осевым разрешением 5,34 мкм в воздухе. Для анализа оптических изменений в тканях ушей, оценивался коэффициент рассеяния кожи уха с разрешением по глубине. Программное обеспечение для анализа ОКТ-изображений и реконструкции коэффициента рассеяния было разработано на языке Python. Для расчета коэффициента рассеяния использовалась формула, предложная в работе [5]. После реконструкции всего набора изображений коэффициента рассеяния, проводился анализ эффективности ОП (OC_{eff}) по формуле:

$$OC_{eff} = \frac{\mu_{S0} - \mu_{Sfinal}}{\mu_{S0}} \times 100\ \%, \quad (1)$$

где μ_{S0} и μ_{Sfinal} — значения коэффициента рассеяния до и после 15 мин применения исследуемых агентов, соответственно.

Результаты

Анализ полученных данных (рис. 1) по рентгеноконтрастным и магнитно-резонансным оптическим просветляющим агентам показал, что наиболее эффективным агентом оказался раствор Аккупакк-300®, который показал снижение коэффициента рассеяния на исследуемом участке кожи уха лабораторной крысы на 35 % для контрольной группы и на 22 % для группы с АД1Т. Агент Магневист® показал результат 25 % уменьшения коэффициента рассеяния для контрольный группы и 21 % для диабетической группы лабораторных крыс. Гадовист® же, показал эффективность ОП — 28 % для контрольной группы и 16 % для группы с развивающимся диабетом 1 типа.

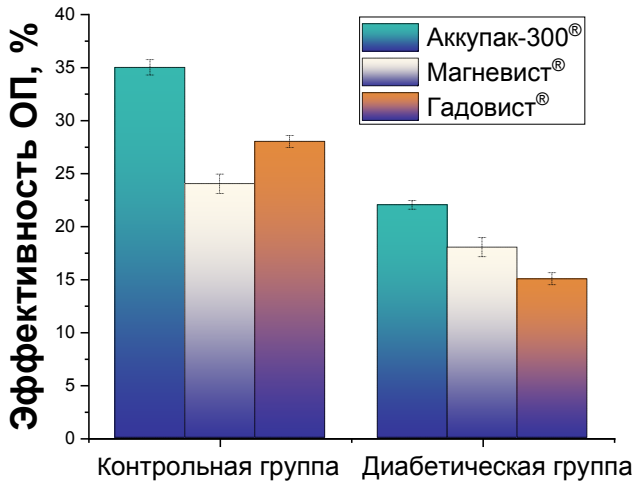
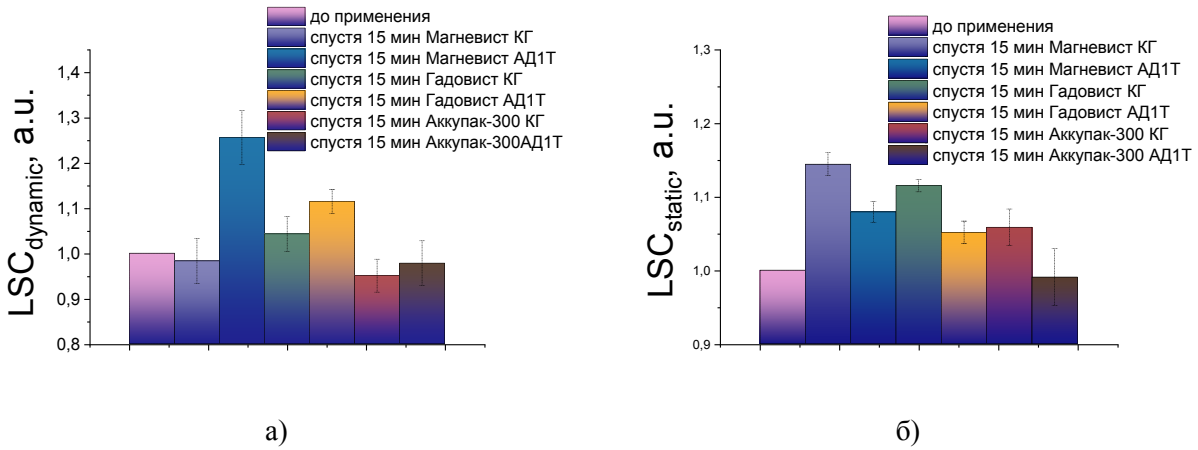


Рис. 1. Эффективность оптического просветления для контрольной группы (КГ) и группы с развивающимся аллоксановым диабетом 1 типа (АД1Т)

Рис. 2 демонстрирует изменение контраста спеклов динамической области сосудов (а) и статической области вне сосудов (б) уха лабораторных крыс обеих групп до применения и на 15 минуте применения ОПА.



а) б)

Рис. 2. Контраст спеклов динамической области сосудов (а) и статической области вне сосудов (б) уха лабораторных крыс обеих групп до применения и на 15 минуте применения ОПА

Методами ОКТ и ЛСКВ выявлены различия в измеренных параметрах между группами при местном нанесении различных ОПА на уши лабораторных крыс, что свидетельствует о влиянии развития АД1Т.

Заключение

Полученные результаты показывают, что совместное использование ОКТ и ЛСКВ обеспечивает более полное понимание как структурных, так и функциональных изменений в тканях. Такое сочетание методов открывает новые перспективы для комплексного изучения патологических процессов, особенно в контексте развития сахарного диабета.

Благодарность

Проведенные исследования поддержаны грантом Российского Научного Фонда № 23-14-00287.

Список источников

[1] *Oliveira L., Pinheiro M., Tuchina D., Timoshina P., Carvalho M., Oliveira L.* Light in evaluation of molecular diffusion in tissues: Discrimination of pathologies // Adv Drug Deliv Rev. 2024. № 212. Art. no. 115420.

[2] *Xia Q., Li D., Yu T., Zhu J., Zhu D.* In vivo skin optical clearing for improving imaging and light-induced therapy: a review // Journal of biomedical optics. 2022. № 28. Art. no. 060901.

[3] *Tuchina D. K., Shi R., Bashkatov A.N., Genina E.A., Zhu D., Luo Q., Tuchin V.V.* Ex vivo optical measurements of glucose diffusion kinetics in native and diabetic mouse skin // Journal of Biophotonics. 2015. Vol. 8. № 4.

[4] *Surkov Y., Timoshina P., Serebryakova I., Stavtcev D., Kozlov I., Piavchenko G., Meglinski I., Konovalov A., Telyshev D., Kuznetcov S., Genina E., Tuchin V.* Laser speckle contrast imaging with principal component and entropy analysis: a novel approach for depth-independent blood flow assessment // Front Optoelectronics. 2025. Vol. 18. № 1.

[5] *Zhang J., Chen Z.* Deep Learning in Optical Coherence Tomography: A Comprehensive Review // IEEE Transactions on Medical Imaging. 2023. Vol. 42. № 5. P. 1176–1191.

In-vivo optical clearing study in conditions of experimental type 1 diabetes using OCT and speckle imaging methods

P.A. Timoshina[1, 2, 3], A.D. Kovalev[1], M.V. Syrov[1], Y.I. Surkov[1, 3], V.V. Tuchin[1, 2, 3]

[1] *Institution of Physics, Saratov State University, Saratov, Russia*
[2] *Laboratory of Laser Molecular Imaging and Machine Learning, Tomsk State University, Tomsk, Russia*
[3] *Laboratory of Biomedical Photoacoustic, Saratov State University, Saratov, Russia*

Using a combination of diagnostic methods, including laser speckle contrast imaging and optical coherence tomography, the study examined the possibility of differentiating tissues and organs in healthy rats and rats with type 1 experimental diabetes based on the nature of dynamic and structural changes that occur when optical clearing agents are applied topically. In addition, we evaluated the effectiveness of magnetic resonance contrast agents and radiopaque contrast agents to reduce scattering.

Keywords: *optics, speckle imaging, optical clearing*

Исследование процесса гликирования коллагена методом многоволновой рефрактометрии

Е.Н. Лазарева[1], В.В. Тучин[1, 2, 3]

[1] Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия
[3] Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия

Данная работа посвящена изучению процесса гликирования растворов коллагена методом многоволновой рефрактометрии. Измерялась действительная часть показателя преломления раствора коллагена при различных концентрациях глюкозы (от 0 до 1000 мг/дл с шагом 100 мг/дл) от нескольких часов до пяти недель инкубации. Показатель преломления измерялся на многоволновом рефрактометре Аббе на длинах волн 486, 589, 800 и 1300 нм. Теоретические значения показателей преломления были рассчитаны при предположении, что взаимодействия между молекулами коллагена и глюкозы не происходит. Результаты показали, что при длительной инкубации показатель преломления растворов коллагена в присутствии глюкозы увеличивается, что может свидетельствовать о формировании гликированного комплекса и протекании процесса гликирования.

Ключевые слова: *гликирование белков, коллаген, показатель преломления*

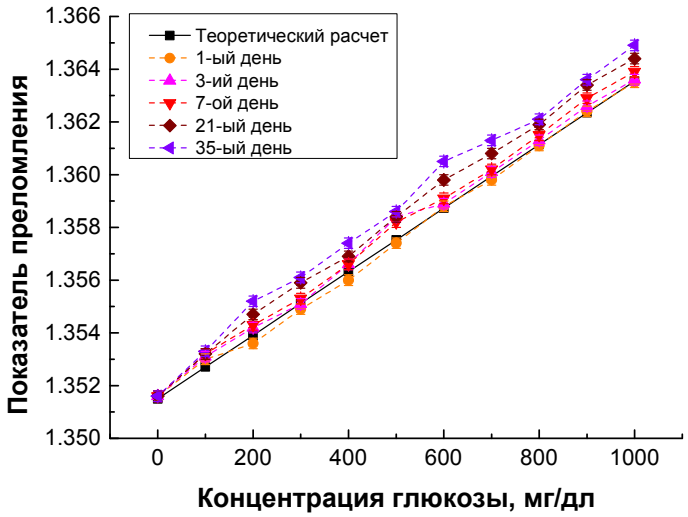
Гликирование коллагена, процесс неферментативного присоединения сахаров к коллагену, является важным фактором старения и развития различных заболеваний. Этот процесс приводит к образованию поперечных сшивок между молекулами коллагена, делая его более жестким и менее способным к растяжению и сжатию, а также к образованию конечных продуктов гликирования (КПГ), что негативно сказывается на состоянии кожи, сосудов и других тканей, где коллаген играет ключевую роль и является основным структурным компонентом [1, 2].

Большинство современных методов по выявлению сахарного диабета и контроля степени его компенсации, связаны с определением содержания глюкозы в крови натощак. Однако в научных исследованиях было установлено, что более достоверная корреляция между наличием сосудистых осложнений при диабете и степенью их прогрессирования наблюдается не с показателями гликемии перед приемом пищи, а с уровнем гликированных белков или КПГ. Таким образом, актуальной и важной задачей является поиск новых, быстрых и более точных методов измерения всех фракций гликированных белков [3]. Оптические методы занимают особое место и широко применяются в области медицинской диагностики и терапии. Для измерения и контроля уровня глюкозы в крови могут использоваться различные неинвазивные методы, такие как ИК-спектроскопия, комбинационная спектроскопия, оптическая когерентная томография, фотоакустические методы и др. Многие из исследований демонстрируют возможность применения оптических методов, в том числе рефрактометрических, для определения гликированных белков [4, 5].

В данной работе для измерений показателя преломления использовали многоволновой рефрактометр Аббе DR-M2/1550 (Атаго, Япония). Для выбора длины волны использовались узкополосные интерференционные фильтры 480 (±2) нм, 589 (±2) нм, 800 (±8) нм и 1300 (±25) нм. При измерении показателя преломления температура была стабильной (+24) и поддерживалась циркуляционным термостатом. Эксперименты проводились с использованием раствора коллагена (40 г/л), к которому было добавлено разное количество D-глюкозы (от 0 до 1000 мг/дл с шагом 100 мг/дл). Данные концентрации глюкозы соответствуют физиологическому стандарту. Растворы хранились в вакуумных кюветах в холодильнике. Показатель преломления рассчитывался как среднее значение по 3 измерениям для каждого из 3 образцов измеряемого раствора.

Для примера на рисунке показана зависимость показателя преломления раствора коллагена от добавленной концентрации глюкозы при длительной инкубации на длине волны 589 нм.

Динамика теоретического показателя преломления растворов, предполагающих невзаимодействующие молекулы коллагена и глюкозы, изменяется линейно от 1,3515 до 1,3636. Экспериментальный показатель преломления растворов коллагена при различных концентрациях глюкозы линейна после разведения и хорошо согласуется с теоретической. Но после 35 дней инкубации коллагена с глюкозой показатель преломления увеличился для основных растворов с различной концентрацией глюкозы, однако показатель преломления раствора коллагена без глюкозы остался постоянным. Увеличение показателя преломления можно объяснить взаимодействием молекул глюкозы и коллагена, когда возникают различные формы гликированного коллагена с новой молекулярной структурой и оптическими свойствами [5].



Зависимость показателя преломления раствора коллагена от добавленной концентрации глюкозы при длительной инкубации на длине волны 589 нм

Представленные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, в том числе особенностей изменения показателя преломления и других оптических параметров белков при различных концентрациях глюкозы и при различных уровнях гликемии.

Благодарность

Исследование было поддержано грантом РНФ №. 23-14-00287, https://rscf.ru/project/23-14-00287/.

Список источников

[1] *Quansah E. et al.* Investigating biochemical and structural changes of glycated collagen using multimodal multiphoton imaging, Raman spectroscopy, and atomic force microscopy // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2023. Vol. 415. № 25. P. 6257–6267.

[2] *Diamantides N. et al.* Pre-glycation impairs gelation of high concentration collagen solutions // Journal of Biomedical Materials Research Part A. 2022. Vol. 110. №12. P. 1953–1963.

[3] *Smolyanskaya O.A. et al.* Multimodal optical diagnostics of glycated biological tissues // Biochemistry (Moscow). 2019. Vol. 84. P. 124–143.

[4] *Alsamad F. et al.* In depth investigation of collagen non-enzymatic glycation by Raman spectroscopy // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2021. Vol. 251. Art. no. 119382.

[5] *Lazareva E.N. et al.* Optical properties of glycated and non-glycated hemoglobin–Raman/fluorescence spectroscopy and refractometry // Journal of Biomedical Photonics & Engineering. 2022. Vol. 8. № 2. Art. no. 020303.

Study of the collagen glycation process by multiwave refractometry

E.N. Lazareva[1], V.V. Tuchin[1, 2, 3]

[1] *Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov, Russia*
[2] *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*
[3] *Institute of Problems of Exact Mechanics and Management of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia*

This work is devoted to the study of the glycation process of collagen solutions by the method of multiwave refractometry. The real part of the refractive index of the collagen solution was measured at different glucose concentrations (from 0 to 1000 mg/dl with a step of 100 mg/dl) from several hours to five weeks of incubation. The refractive index was measured on a multiwave Abbe refractometer at wavelengths of 486, 589, 800 and 1300 nm. Theoretical values of the refractive indices were calculated under the assumption that there is no interaction between collagen and glucose molecules. The results showed that with prolonged incubation, the refractive index of collagen solutions in the presence of glucose increases, which may indicate the formation of a glycated complex and the glycation process.

Keywords: *glycated proteins, collagen, refractive indicator*

Лазерная спекл-контрастная визуализация с анализом главных компонент: новый подход к оценке кровотока, не зависящей от глубины

Ю.И. Сурков, И.А. Серебрякова, А.П. Фащевский, П.А. Тимошина, Э.А. Генина, В.В. Тучин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Представлен метод лазерной спекл-контрастной томографии на основе анализа главных компонент, обеспечивающий одновременное и независимое картирование глубины залегания сосудов и скорости кровотока. Исходный спекл-сигнал разделяется на статичную и динамическую составляющие. Первая линейно коррелирует с относительной глубиной залегания сосудов и инвариантна к скорости потока, вторая описывает скорость и не зависит от глубины. На оптических фантомах с модельным капилляром показана тесная корреляция реконструированных глубинных карт с результатом ультразвуковой томографии. Разработанный метод не требует модернизации оптической схемы классической лазерной спекл-контрастной визуализации. Потенциальные приложения включают картирование опухолевой перфузии и интраоперационный контроль мозгового кровотока с глубинным разрешением.

Ключевые слова: *лазерная спекл-контрастная визуализация, анализ главных компонент, скорость кровотока*

Лазерная спекл-контрастная визуализация (ЛСКВ) — доступный бесконтактный метод картирования микроциркуляции [1, 2], однако ее плоское 2D-изображение смешивает сигналы разных слоев. Из-за этого контраст спекл-паттерна зависит одновременно от скорости кровотока, глубины залегания сосудов и рассеяния статической ткани, что затрудняет количественную оценку [3, 4]. Перспективным методом решения данной проблемы является разложение спекл-сигнала на статическую и динамическую компоненты. Недавние работы показали, что метод фильтрации на основе анализа главных компонент (АГК) минимизирует глубинную зависимость динамического контраста [4, 5]. Это открывает путь к квазитомографическому формату ЛСКВ, в котором глубинная информация извлекается программно. Такой подход может быть востребован при оценке функциональной глубины залегания сосудов и для задач глубинного перфузионного мониторинга.

В настоящей работе развивается идея разделения исходного спекл-сигнала на статическую и динамическую компоненты и предложен новый метод лазерной спекл-контрастной томографии сосудистой сети на основе АГК (АГК-ЛСКТ). Для приготовления оптического фантома полидиметилсилоксан + TiO_2 (в концентрации 0,70 мг/мл) заливался в подготовленную форму (25×22×5 мм) с встроенным S-образным эластомерным капилляром (с внутренним и внешним диаметром 0,5 и 0,9 мм) на глубине 0,4–4,5 мм. После подготовки оптический фантом помещался на стеклянный прозрачный столик под систему ЛСКВ и подключался к инфузионному насосу. Через встроенный капилляр прокачивался 3 % водный раствор интралипида. Подача осуществлялась шприцевым насосом SN-50F6 (KranZ, Китай), линейная скорость в сосуде составляла 1, 5, 10, 20 и 50 мм/с.

Для освещения образца использовался диодный лазер $\lambda = 830$ нм (LaserLand, Китай). Изображения регистрировались монохромной КМОП-камерой (ToupTek, Китай). Экспозиция составляла 3 мс, частота кадров 110 кадров/с. ЛСКВ система была настроена для регистрации прошедшего излучения. Для каждого эксперимента с различной скоростью потока записывался видеоролик длиной $N = 75$ кадров. Для каждого видеоряда применялся метод АГК-фильтрации, описанный в работах [4, 5]. В результате по данным набора спекл-изображений (I_{full}), были получены наборы статической (I_{static}) и динамической ($I_{dynamic}$) компонент. С помощью скользящего кубического окна ($7 \times 7 \times N$) рассчитывались карты среднего — μ, и карты стандартного отклонения — σ, для I_{full}, I_{static} и $I_{dynamic}$. Затем карты полного спекл-контраста (FSC) и статического спекл-контраста (SSC), определяемые отношением карт стандартных отклонений к соответствующим картам средних значений. Коэффициент динамической активности (DAC) рассчитывался как отношение карты стандартного отклонения $I_{dynamic}$ к среднему I_{full}. Для получения 3D реконструкции сосуда глубина залегания определялась значением SSC. Для анализа расположения ветвей и сопоставления с данными УЗИ томографии были построены проекции: вид сверху и сбоку.

Карты FSC, SSC и DAC для оптического фантома показаны на рис. 1 для различных скоростей. С ростом скорости значение FSC внутри сосуда закономерно падает, а при большем заглублении оно повышается вследствие множественного рассеяния. Значения SSC практически не меняются при переходе от 1 до 50 мм/с, отражая статический фон и кодируя глубину. DAC, напротив, уменьшается при увеличении скорости, но остается однородным вдоль сосуда. Таким образом, SSC предоставляет глубинную информацию, а DAC чувствителен к скорости перфузии и практически инвариантен к глубине залегания.

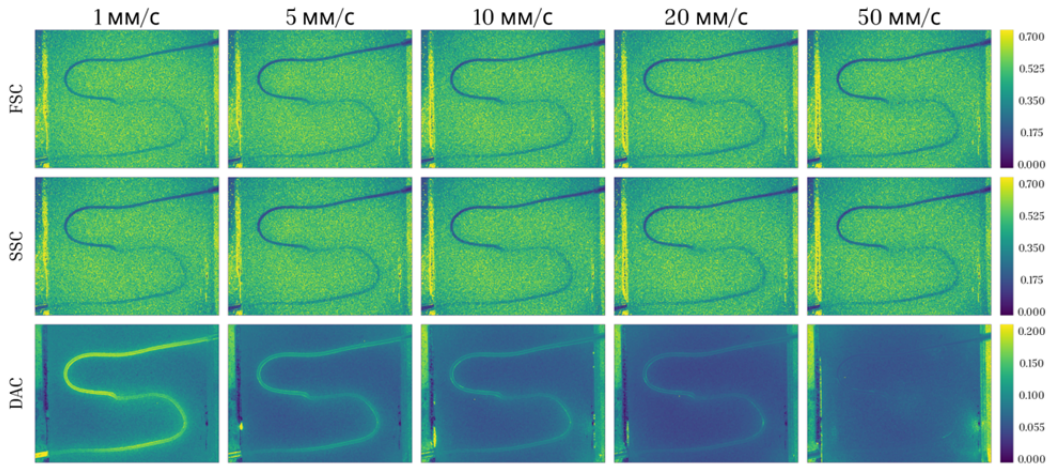


Рис. 1. Карты полного контраста спекла (FSC), статического контраста (SSC) и коэффициента динамической активности (DAC) оптического фантома для различных скоростей потока жидкости

На рис. 2 показаны траектории модельного сосуда в двух проекциях, полученные АГК-ЛСКТ и сопоставленные с результатами опорной ультразвуковой томографии.

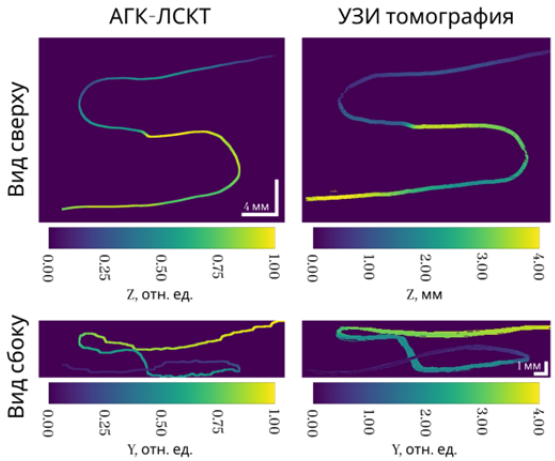


Рис. 2. Сравнение пространственной реконструкции сосудистого канала, полученной методом ЛСКТ и ультразвуковой томографии

Представленный метод АГК-ЛСКТ надежно разделяет статические и динамические компоненты спекл-сигнала, обеспечивая одновременное картирование скорости кровотока и относительной глубины сосудов без усложнения оптики. На фантоме с капилляром, скрытым на глубинах до 4,5 мм, метрика DAC линейно реагировала на скорости 1–50 мм/с, а SSC достоверно кодировала глубину. 3D-траектории сосудов согласовались с ультразвуковой томографией (r = 0,94). Тем самым АГК-ЛСКТ открывает путь к бесконтактному, недорогому и квазитомографическому мониторингу микроциркуляции в тканях.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 24-44-00082).

Список источников

[1] *Amini N. et al.* Impact of light polarization on laser speckle contrast imaging with a custom phantom for microvascular flow // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 1. Art. no. 26652.

[2] *Li D.-Y. et al.* Transmissive-detected laser speckle contrast imaging for blood flow monitoring in thick tissue: from Monte Carlo simulation to experimental demonstration // Light: Science & Applications. 2021. Vol. 10. № 1. Art. no. 241.

[3] *Kulcsar C. et al.* Laser speckle size and contrast investigation of volumetric scattering from controlled turbid phantoms and mouse skin tissues // iScience. 2025. Vol. 28. № 5. Art. no. 112433. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112433.

[4] *Surkov Yu. et al.* Laser speckle contrast imaging with principal component and entropy analysis: a novel approach for depth-independent blood flow assessment // Frontiers of Optoelectronics. 2025. Vol. 18. № 1. Art. no. 1.

[5] *Arias-Cruz J.A. et al.* Visualization of in vitro deep blood vessels using principal component analysis-based laser speckle imaging // Biomedical Optics Express. 2019. Vol. 10. № 4. P. 2020–2031.

Laser speckle contrast imaging with principal component analysis: a novel depth-independent approach to blood-flow assessment

Yu.I. Surkov, I.A. Serebryakova, A.P. Fashchevskiy, P.A. Timoshina, E.A. Genina, V.V. Tuchin

Saratov State University, Saratov, Russia

A laser speckle-contrast tomography method based on principal component analysis is presented, enabling simultaneous and independent mapping of vessel depth and blood-flow velocity. The raw speckle signal is decomposed into static and dynamic components: the first correlates linearly with the relative depth of the vessels and is invariant to flow speed, while the second quantifies velocity and is depth-independent. Experiments on optical phantoms containing a model capillary show a strong correlation between the reconstructed depth maps and ultrasound tomography results. The proposed approach requires no modification of the optical layout used in conventional laser speckle-contrast imaging. Potential applications include tumour-perfusion mapping and intra-operative monitoring of cerebral blood flow with depth resolution.

Keywords: *laser speckle contrast imaging, principal component analysis, blood flow velocity*

Применение оптического просветления для повышения информативности мультимодального метода скрининга новообразований кожи

И.А. Серебрякова[1], Ю.И. Сурков[1], Э.А. Генина[1], Я.К. Кузинова[2], О.М. Конопацкова[2], В.В. Тучин[1]

[1] *Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*
[2] *Саратовский государственный медицинский университет, Саратов, Россия*

В данной работе представлены результаты исследования новообразований кожи человека. Мультимодальный метод скрининга, позволяющий получать результаты в режиме реального времени, основан на сочетании спектроскопии диффузного отражения, оптической когерентной томографии, высокочастотной ультразвуковой визуализации и оптического просветления кожи. Разработанный мультимодальный контактный гель улучшает разрешение и информативность регистрируемых данных in vivo.

Ключевые слова: *новообразования кожи, оптическое просветление, спектроскопия диффузного отражения, оптическая когерентная томография, высокочастотный ультразвук*

Введение

Одной из актуальных задач онкодерматологии является совершенствование диагностических критериев и методов раннего выявления злокачественных новообразований кожи [1]. Современная диагностика значительно зависит от субъективного опыта врача [2]. В последние годы все большее развитие получают неинвазивные методы визуализации — такие как оптическая когерентная томография (ОКТ), высокочастотное ультразвуковое исследование (ВЧУЗИ) и спектроскопия диффузного отражения (СДО) [3, 4]. Особый интерес представляет метод оптического просветления (ОП), основанный на временном снижении рассеяния света в биотканях. ОП повышает контраст и глубину визуализации кожи [5]. В сочетании с мультимодальным скринингом этот подход может значительно повысить точность диагностики новообразований кожи человека.

Материалы и методы

Для неинвазивного скрининга использовалась цифровая дерматоскопия (Firefly DE 300), ОКТ (GAN930V2-BU), СДО (USB4000-UV-VIS, NIRQuest) и ВЧУЗИ (DUB SkinScanner). Для комплексной визуализации был разработан мультимодальный контактный гель (МКГ), обладающий свойствами ОП агента. Состав геля: гидроксиэтилцеллюлоза (1 %), сорбитол (5 %), диамид угольной кислоты (5 %), дистиллированная вода (42,5 %), глицерин (40 %), диметилсульфоксид (1 %), пропиленгликоль (5 %) и феноксиэтанол (1 %).

Измерения проводились до и спустя 15 мин после нанесения МКГ на участок с доброкачественным новообразованием (ДН) (исследуемый) и контрольный участок кожи.

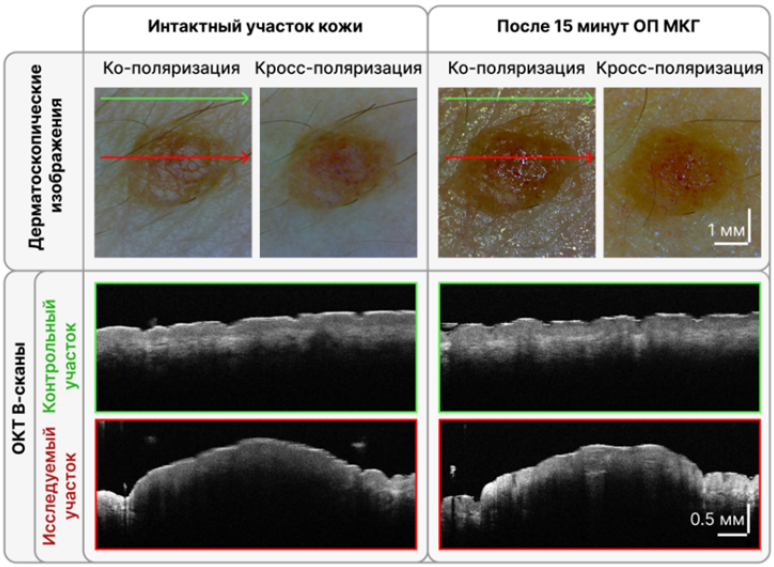
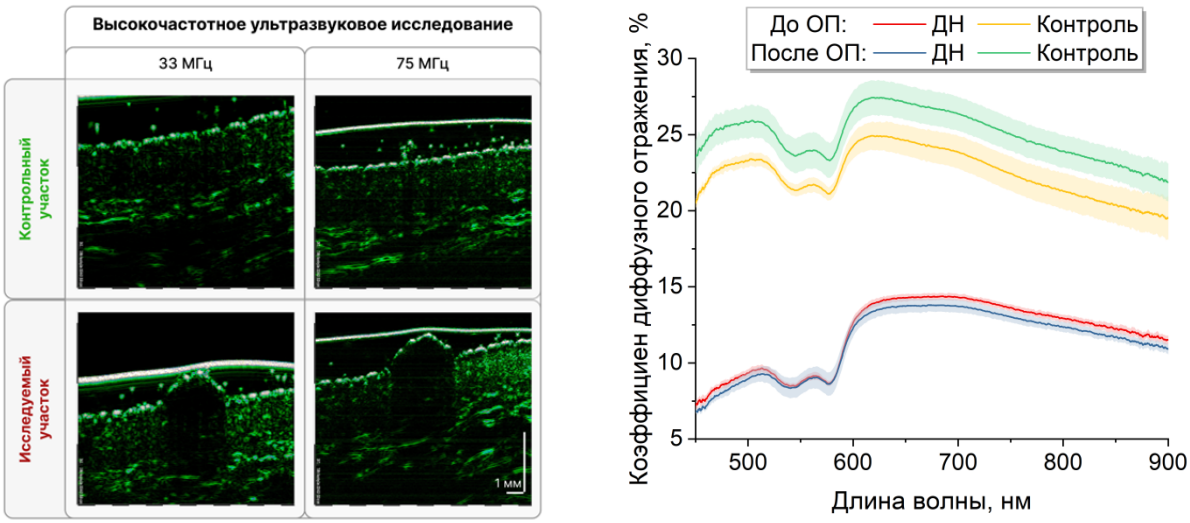


Рис. 1. Примеры дерматоскопических изображений в ко- и кросс-поляризованном свете и ОКТ В-сканы, интактного участка кожи и после 15 минут ОП МКГ. Цветными стрелками обозначены плоскости ОКТ-зондирования — В-сканы



а) б)

Рис. 2. ВЧУЗИ и СДО до и после ОП МКГ контрольного и исследуемого участков кожи:
а) результат ВЧУЗИ; б) результат СДО

Результаты

На рис. 1 представлены дерматоскопические изображения (в ко- и кросс-поляризованном свете) и ОКТ-сканы (В-режим) до и после ОП. После ОП отмечено улучшение качества и глубины визуализации: четче прорисовываются фолликулы, сосуды и пигментные структуры, повышается контраст между эпидермисом и дермой.

Результаты ВЧУЗИ представлены на рис. 2, а и СДО на рис. 2, б до и после ОП контрольного и исследуемого участков кожи. В области новообразования отмечено снижение эхогенности, что может указывать на изменение акустических свойств ткани. Результаты СДО указывают на эффективность метода ОП для улучшения качества неинвазивной диагностики кожных новообразований.

Заключение

Результаты исследования подтверждают, что ОП с применением МКГ способствует улучшению качества неинвазивной визуализации кожных структур. Анализ изменений СДО показал выраженное снижение рассеяния света после обработки тканей, что свидетельствует о повышении их оптической прозрачности. Интеграция метода ОП в состав мультимодального скрининга, включающего дерматоскопию, ОКТ, ВЧУЗИ и СДО позволила повысить диагностическую информативность каждого из используемых подходов и расширить возможности дифференциальной диагностики ДН и потенциально злокачественных новообразований.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-14-00287.

Список источников

[1] *Sung H. et al.* Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // CA: A Cancer Journal for Clinicians. 2021. Vol. 71. № 3. P. 209–249.

[2] *Carrera C. et al.* Clinical and dermoscopic characterization of pediatric and adolescent melanomas: Multicenter study of 52 cases // Journal of the American Academy of Dermatology. 2018. Vol. 78. № 2. P. 278–288.

[3] *Silver F.H. et al.* Rapid Noninvasive Skin Screening for Basal Cell Carcinomas using Vibrational Optical Coherence Tomography // Machine Learning. 2025. Vol. 255. № 255. P. 255–255.

[4] *Coppola R. et al.* Basal cell carcinoma thickness evaluated by high frequency ultrasounds and correlation with dermoscopic features // Italian Journal of Dermatology and Venereology. 2021. Vol. 156. № 5. P. 610–615.

[5] *Xia Q. et al.* In vivo skin optical clearing for improving imaging and light-induced therapy: a review // Journal of Biomedical Optics. 2023. Vol. 28. № 6. P. 060901-1–060901-17.

Application of optical clearing to enhance the diagnostic value of a multimodal skin lesion screening method

I.A. Serebryakova[1], Yu.I. Surkov[1], E.A. Genina[1], Y.K. Kuzinova[2], O.M. Konopatskova[2], V.V. Tuchin[1]

[1] *Saratov State University, Saratov, Russia*
[2] *Saratov State Medical University, Saratov, Russia*

This work presents the results of a study on optical clearing of human skin lesions. The multimodal screening method, which allows for real-time data acquisition, is based on the combination of diffuse reflectance spectroscopy, optical coherence tomography, and high-frequency ultrasound imaging. The obtained results demonstrate that the multimodal contact gel improves the resolution and diagnostic value of in vivo recorded data.

Keywords: *skin lesions, optical clearing, diffuse reflectance spectroscopy, optical coherence tomography, high-frequency ultrasound*

Система поддержки принятия врачебных решений в цифровой диафаноскопии верхнечелюстных пазух с применением сверточных нейронных сетей

Е.О. Брянская[1], Д.В. Герасин[1], А.В. Бакотина[2], А.Ю. Овчинников[2], Ю.О. Николаева[2], А.В. Масленникова[2], В.В. Дремин[1], А.В. Дунаев[1]

[1] Научно-технологический центр биомедицинской фотоники, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орел, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, Москва, Россия

Работа посвящена разработке системы поддержки принятия врачебных решений для классификации зарегистрированных с помощью программно-аппаратного комплекса цифровой диафаноскопии диафанограмм верхнечелюстных пазух на основе сверточной нейронной сети ResNet-50. Разработанная модель классификации позволяет классифицировать состояние тканей верхнечелюстных пазух на классы «синусит/отсутствие патологии» со значениями чувствительности и специфичности — 0,84 и 0,96 соответственно; на классы «кистозные изменения/отсутствие патологии» — 0,85 и 0,91 соответственно. Таким образом, разработанная классификационная модель может быть применена для цифровой диафаноскопии с целью раннего выявления патологий верхнечелюстных пазух с использованием системы поддержки принятия клинических решений.

Ключевые слова: *цифровая диафаноскопия, система поддержки принятия врачебных решений, синусит, диафанограммы, сверточные нейронные сети*

Введение

Своевременная диагностика патологий верхнечелюстных пазух (ВЧП) является актуальной задачей ввиду постоянного роста заболеваемости. Метод цифровой диафаноскопии, основанный на зондировании ВЧП излучением на длинах волн 650 нм и 850 нм, позволяет выявлять патологии ВЧП за счет регистрации диафанограмм КМОП-камерой и оценки наличия или отсутствия поглощения зондирующего излучения в области ВЧП. В настоящий момент классификация диафанограмм ВЧП осуществляется с применением линейного дискриминантного анализа лишь на два класса: отсутствие или наличие патологии. Для улучшения диагностической эффективности перспективным видится применение сверточных нейронных сетей (СНС).

Целью работы являлась разработка системы поддержки принятия врачебных решений для цифровой диафаноскопии ВЧП с применением СНС для дифференциации патологий ВЧП.

Материалы и методы

Предложена модель классификации диафанограмм ВЧП, полученных с помощью программно-аппаратного комплекса цифровой диафаноскопии, на основе СНС ResNet-50. Диафанограммы, используемые для апробации разработанной модели классификации, были получены с участием 80 условно-здоровых добровольцев и 92 пациентов с различными патологиями ВЧП (кистозные изменения, синусит, мицетома, полипозные изменения и др.).

Для формирования обучающей выборки диафанограммы были разделены на 3 группы (отсутствие патологии, синусит, кистозные изменения). Разделение на классы осуществлялось, базируясь на результатах ранее предложенной модели классификации, и на результатах КТ-исследований. В обучающую выборку было отобрано по 30 диафанограмм для каждого класса. Тестовую выборку составили: 17 диафанограмм для класса «отсутствие патологии», 21 диафанограмма для класса «синусит», 31 диафанограмма для класса «кистозные изменения».

Результаты

В экспериментах использована модель с автоматическим подбором весовых коэффициентов для правил принятия решения. В ходе классификации тестовой выборки осуществляется оценка вероятности наличия того или иного заболевания или его отсутствия. Результат формируется на основе наивысшей вероятности.

В результате апробации данной модели получены значения чувствительности и специфичности при разделении на классы «синусит/отсутствие патологии» — 0,84 и 0,96 соответственно; на классы «кистозные изменения/отсутствие патологии» — 0,85 и 0,91 соответственно.

Заключение

Таким образом, разработанная классификационная модель может быть применена для цифровой диафаноскопии с целью раннего выявления патологий верхнечелюстных пазух в телемедицине

и при проведении ЛОР-консультаций в автоматизированном режиме с использованием системы поддержки принятия клинических решений.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-75-00144, https://rscf.ru/project/24-75-00144/.

Clinical decision support system in digital diaphanoscopy of maxillary sinuses using convolutional neural networks

E.O. Bryanskaya[1], D.V. Gerasin[1], A.V. Bakotina[2], A.Yu. Ovchinnikov[2], Yu.O. Nikolaeva[2], A.V. Maslennikova[2], V.V. Dremin[1], A.V. Dunaev[1]

[1] *Research and Development Center of Biomedical Photonics, Orel State University, Orel, Russia*
[2] *Otorhinolaryngological Department, Clinical Center of Maxillofacial, Plastic Surgery and Dentistry, Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia*

The work is devoted to the development of a clinical decision support system for the classification of maxillary sinus diaphanograms recorded using a software-hardware system of digital diaphanoscopy based on convolutional neural network ResNet-50. The classification model allows classifying the maxillary sinus conditions into classes "sinusitis/absence of pathology" with sensitivity and specificity — 0.84 and 0.96, respectively; and into classes "cystic changes/absence of pathology" — 0.85 and 0.91, respectively. Thus, the classification model can be applied to digital diaphanoscopy for the purpose of early detection of maxillary sinus pathologies using a clinical decision support system.

Keywords: *digital diaphanoscopy, clinical decision support system, maxillary sinuses, diaphanograms, convolutional neural networks*

Оценка острой и хронической токсичности наносенсибилизатора в зависимости от доз введения различным животным

Е.Н. Лазарева[1, 2], А.М. Мыльников[3], Н.А. Наволокин[3], И.Ю. Янина[1, 2]

[1] *Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*
[2] *Томский государственный университет, Томск, Россия*
[3] *Саратовский государственный медицинский университет, Саратов, Россия*

Целью работы было провести оценки острой и хронической токсичности наносенсибилизатора на основе апконверсионных наночастиц (АКНЧ) в зависимости от доз введения лабораторным животным (крысы, мыши). АКНЧ [$NaYF_4$:Yb^{3+}, Er^{3+}] (фторидная матрица, легированная ионами иттербия и эрбия) были синтезированы гидротермальным методом. Использовали АКНЧ, покрытые оболочками из человеческого сывороточного альбумина и цианина 3B NHS-эфира (Cy3) (ООО «Люмипроб Рус», Москва, Россия). Концентрация АКНЧ составляла 2 мг/мл. В среднем объем однократного внутривенного введения крысе составлял 0,95 мл, мыши — 0,12 мл. Все дозировки приводили к обратимым морфологическим изменениям, грубых изменений в виде гибели клеток миокарда, почек, печени или развития выраженных аллергических реакций в легких не обнаружено.

Ключевые слова: *токсичность, наносенсибилизатор, апконверсионные наночастицы.*

Введение

Острая и хроническая токсичность — это два основных типа токсичности, различающиеся по времени воздействия вещества на организм. Острая токсичность возникает при однократном или кратковременном воздействии, в то время как хроническая токсичность развивается при длительном воздействии вещества.

Целью работы было провести оценки острой и хронической токсичности наносенсибилизатора на основе апконверсионных наночастиц (АКНЧ) в зависимости от доз введения лабораторным животным (крысы, мыши).

Материалы и методы

АКНЧ [$NaYF_4$:Yb^{3+}, Er^{3+}] (фторидная матрица, легированная ионами иттербия и эрбия) были синтезированы гидротермальным методом. Использовали АКНЧ, покрытые оболочками из человеческого сывороточного альбумина и цианина 3B NHS-эфира (Cy3) (ООО «Люмипроб Рус», Москва, Россия). Концентрация АКНЧ составляла 2 мг/мл. Исследования проводились на крысах и мышах. В среднем объем однократного внутривенного введения крысе составлял 0,95 мл, мыши — 0,12 мл.

Результаты

В таблице приведены данные для сравнения выраженности морфологических изменений во внутренних органах при введение разных доз частиц и разное периоды выведения.

Степень выраженности морфологических изменений во внутренних органах при введение разных доз частиц и разное периоды выведения

Вид животного	Крысы					
Доза	1	1	2	2	3	3
Период выведения животных	сутки	7 суток	сутки	7 суток	сутки	7 суток
Миокард полнокровие	+++	+++	+	+	++	+
Миокард отек	++	++	+	++	++	++
Эпителий извитых канальцев, степень повреждения	+	++	++	+++ некроз	+++	++
Почки полнокровие	+++	+++	+++	++	+++	+++
Кровоизлиянии в почке	+	–	–	–	–	+
Печень полнокровие сосудов / синусоидов	++/++	+++/++	++/+	++/+	+/+++	++/++

Окончание табл.

Вид животного	Крысы					
Печень степень повреждения гепатоцитов	++	+++	+	+++	+	++
легкие Полнокровие сосудов	+++	++	+++	+	++	+++
Селезенка – полнокровие красной пульпы	+	+++	+++	+++	+++	++
Селезенка макрофагальная реакции	–	–	+++	++	–	–
Вид животного	Мыши					
Доза	1	1	2	2	3	3
Период выведения животных	сутки	7 суток	сутки	7 суток	сутки	7 суток
Миокард полнокровие	+	+	+	+	++	++
Миокард отек	++	++	++	++	+	+
Эпителий извитых канальцев, степень повреждения	++	++	+	++	+++	+++
Почки полнокровие	+++	++	++	++	++	+++
Кровоизлиянии в почке	–	–	–	–	–	++
Печень полнокровие сосудов / синусоидов	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	++/+
Печень степень повреждения гепатоцитов	+	++	+	+++	++	++
легкие Полнокровие сосудов	+++	++	++	+++		+++
Селезенка – полнокровие красной пульпы	++	++	++	++	+++	+++
Селезенка макрофагальная реакции	–	–	–	–	–	–

Примечание: + слабо выраженные изменения, ++ умеренно выраженные изменения; +++ сильно выраженные изменения

Обсуждение

При внутривенном введение частиц белым лабораторным крысам при всех трех дозировках во внутренних органах наблюдали признаки нарушения кровообращения в виде полноводия в почках, миокарде, легких с наибольшей выраженностью при дозировке 1 и через сутки после введения, при этом через неделю степень выраженности полнокровия падала, и только в селезенке нарастала в зоне красной пульпы. В миокарде сохранялся умеренный отек при всех дозировках и сроках выведения. В печени при всех трех дозировках, а в почках при 1 и 2 через неделю степень выраженности повреждения клеток через неделю возрастала, а в почках при 3 дозировке падала интенсивность повреждения эпителия извитых канальцев. В почках при первой дозировке через сутки после введения и при 3 дозировке через неделю после введения наблюдали кровоизлияние в строме. В селезенке только при 2 дозировке отмечали макрофагальную реакцию в белой пульпе, как через сутки, так и через неделю.

При внутривенном введение частиц белым лабораторным мышам при всех трех дозировках во внутренних органах наблюдали признаки нарушения кровообращения, так слабое полнокровие и умеренный отек наблюдали при всех дозировках и сроках введения в миокарде, в легких выраженное полнокровие через неделю при 2 и 3 дозе, а при 1 и 3 дозе через сутки после выведения, в почка выраженное полнокровие, кровоизлияние в строме почке (при 3 дозе через неделю) и умеренное выражение полнокровие в печени и выраженное полнокровие

В печени при 1 и 2 дозировках, а в почках при 2 дозе через неделю степень выраженности повреждения клеток возрастала. Самые выраженные признаки повреждения эпителия извитых ка-

нальцев наблюдались при 3 дозе (как через сутки, так и через неделю от введения), а в печени через неделю от введения 3 дозы.

Заключение

Все изменения в виде нарушения кровенаполнения, связаны с внутривенным введением препарата и увеличением объема циркулирующей крови, являются по определению обратимыми. Однако у крыс максимально выражены были при 1 дозе, а у мышей при 3 дозе.

Признаки повреждения эпителия извитых канальцев в виде набухания у мышей были максимальны при 3 дозе, вне зависимости от времени введения, а у крыс при 2 дозе через сутки от введения. Признаки повреждения печени в виде вакуолизации цитоплазмы гепатоцитов печени у крыс максимальны при 1 и 2 дозе через неделю, а у мышей при 2 дозе через неделю.

Все дозировки приводили к обратимым морфологическим изменениям, грубых изменений в виде гибели клеток миокарда, почек, печени или развития выраженных аллергических реакций в легких не обнаружено. Хотя через 1 неделю после введения изменения не исчезали, а в ряде случаев усиливались, однако при более длительном времени начиная от 1 месяца такие изменения должны исчезать.

Благодарность

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-22-00144, https://rscf.ru/project/25-22-00144/.

Evaluation of acute and chronic toxicity of a nanosensitizer depending on the doses administered to different animals

E.N. Lazareva[1, 2], A.M. Myl'nikov[3], N.A. Navolokin[3], I.Yu. Yanina[1, 2]

[1] *Saratov State University, Saratov, Russia*
[2] *Tomsk State University, Tomsk, Russia*
[3] *Saratov State Medical University, Saratov, Russia*

The aim of the work was to evaluate the acute and chronic toxicity of a nanosensitizer based on upconversion nanoparticles (UCNPs) depending on the doses administered to laboratory animals (rats, mice). UCNPs [$NaYF_4$:Yb^{3+}, Er^{3+}] (fluoride matrix doped with ytterbium and erbium ions) were synthesized by the hydrothermal method. UNNPs coated with shells of human serum albumin and cyanine 3B NHS ester (Cy3) (OOO Lumiprob Rus, Moscow, Russia) were used. The concentration of UCNPs was 2 mg/mL. On average, the volume of a single intravenous administration to a rat was 0.95 mL, to a mouse — 0.12 mL. All dosages resulted in reversible morphological changes; no gross changes in the form of death of myocardial cells, kidneys, liver, or the development of severe allergic reactions in the lungs were detected.

Keywords: *toxicity, nanosensitizer, upconversion nanoparticles*

Оценка тканевых эффектов при имплантации углерод–углеродных композитов методом МРТ

П.Е. Зайцев[1], А.С. Скрябин[2], А.В. Шакуров[2], В.В. Жердева[1]

[1] Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Россия
[2] Факультет энергомашиностроения, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Разработка прижизненных методов оценки биоинтеграции имплантируемых материалов и прогностических критериев успешной имплантации актуально для персонализированной медицины. Целью работы является разработка МРТ-критериев для определения биоинтеграции углерод–углеродных композитов. Исследования проводили на мышах BDF1, которым были имплантированы композиты. Методом МРТ оценивали структуру формирующейся вокруг импланта соединительно-тканной капсулы в динамике in vivo и в ауоптатах. Критерием эффективности биоинтеграции служило количественное соотношение рыхлой и плотной соединительной ткани в структуре фиброзной капсулы. Разработан алгоритм, основанный на МРТ-визуализации и методе проекций максимальной интенсивности, позволяющий проводить количественную оценку данного параметра. Предложенная методика демонстрирует потенциал для дифференциации типов соединительной ткани не только ex vivo, но и in vivo.

Ключевые слова: *углерод–углеродные композиты, имплантация, МРТ, бионтеграция, соединительно-тканная капсула, плотная соединительная ткань, рыхлая соединительная ткань*

Введение

Разработка инструментальных методов для динамической оценки биосовместимости имплантируемых материалов in vivo остается одной из ключевых задач современной биоматериаловедения. Это обусловлено растущим объемом экспериментальных данных, демонстрирующих принципиальные ограничения классических ex vivo тестовых систем. Многочисленные исследования подтверждают, что лабораторные модели лишь частично воспроизводят сложные биохимические и клеточные взаимодействия, возникающие при контакте материала с живыми тканями в организме. В частности, такие критические аспекты, как формирование фиброзной капсулы, динамика воспалительного ответа и процессы неоваскуляризации, требуют принципиально иных подходов к оценке.

В наших предыдущих работах [1] была успешно апробирована методика неинвазивного мониторинга тканевых реакций с использованием магнитно-резонансной томографии (МРТ). В частности, удалось установить корреляцию между сигнальными характеристиками МРТ и гистологическими параметрами фиброза для ряда модельных материалов. Целью исследования стало применение разработанных методик для изучения тканевых реакций на имплантацию углерод–углеродных композитных материалов BD1 с различными типами покрытий у мышей. Дополнительной задачей стала оптимизация алгоритмов обработки данных для последующей МРТ-гистологической валидации результатов.

Методы

МРТ-исследование аутоптатов проводили на МРТ-системе Aspect Imaging (Израиль) с использованием двух режимов сканирования: T1-weighted gradient echo (параметры TR/TE = 60/2,4 мс, угол поворота 30°, NEX 20, поле зрения 40×40 мм, матрица 120×180, 15 срезов) и T2-fast spin echo (параметры TR/TE = 4000/38,3 мс, поле зрения 40×40 мм, матрица 120×180, ETL 5, NEX 8, 15 срезов), включая режим с жироподавлением (инверсионный предимпульс TI = 100 мс). Для исследований in vivo применяли режимы T1w и T1w-TI, при этом сканы с жироподавлением анализировали методом максимальной интенсивности проекций (МИП). Разделение тканей по содержанию коллагена (плотная и рыхлая соединительная ткань) выполняли с использованием метода линейной разделимости. В эксперименте использовали углеродные скаффолды без покрытия и с гидроксиапатитным покрытием, нанесенным методами электрофорезного и детонационного напыления, которые имплантировали подкожно в нижнюю дорсальную область мышам линии BDF1 (n=6). МРТ-мониторинг проводили с интервалом 7–10 дней, а количественную оценку площадей рыхлой и плотной соединительной ткани осуществляли на основе ранее установленных констант с использованием программного обеспечения ImageJ Fiji.

Результаты

Анализ аутоптатов проводили в режиме T1wGRE с жироподавлением [1], после чего распределение МР-сигнала оценивали с помощью метода максимальной интенсивности проекций (МИП). Для

стандартизации показателей использовали пороговое значение интенсивности, разделяющее рыхлую и плотную соединительную ткань. Оптимальное значение было выбрано на основе минимального пересечения гистограмм распределения сигналов: 40–100 для рыхлой ткани и 101–254 для плотной. На T1wGRE-изображении аутоптата (рис. 1, А) наблюдается светлый фон, что осложняет идентификацию рыхлой соединительной ткани. Аналогичная тенденция сохраняется при анализе in vivo-изображений. В то же время на сканах с инверсией сигнала (рис. 1, Б) визуализируются четкие различия: дистальные участки плотной ткани отображаются ярко-белыми, а рыхлая ткань — серыми. Для улучшения контрастности изображение обработали фильтром Fire (рис. 1, В), дополнив его шкалой интенсивности (рис. 1, Г). Данный метод позволяет количественно оценить соотношение рыхлой и плотной тканей (рис. 2). В целях получения изображений пониженной контрастности в режиме T2 для образцов in vivo разрабатывается метод высаживания насыщенных парамагнетиком клеток (рис. 3)

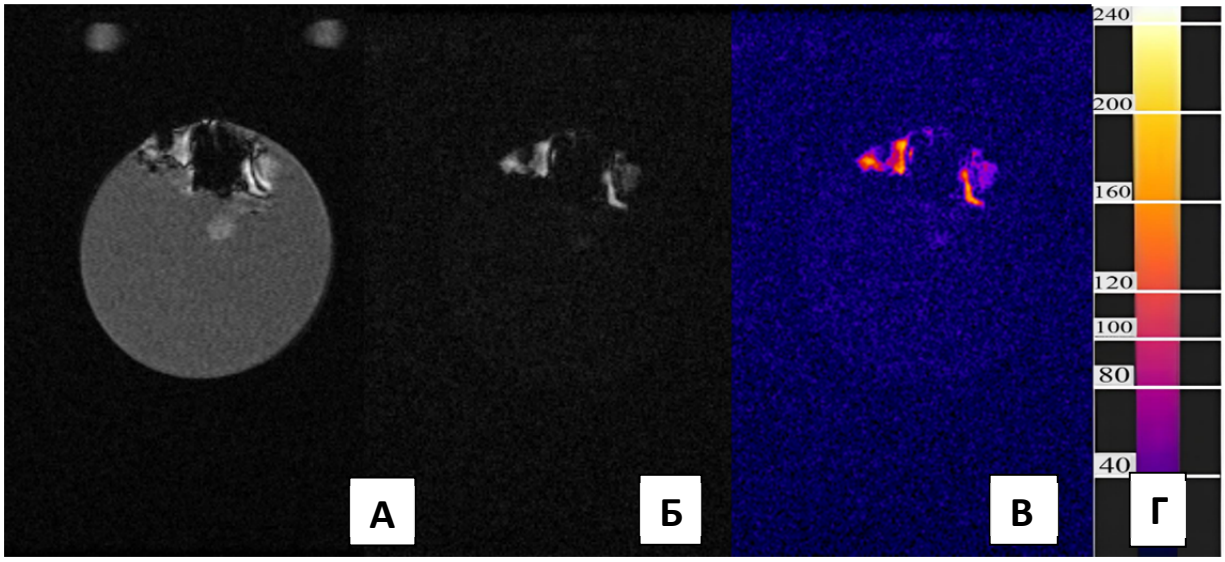


Рис. 1. Анализ МРТ скана 12-недельного скаффолда с покрытием гидроксиапатита по методу МИП; А — T1wGRE центральный срез; Б — центральный срез в режиме жироподавления; В - центральный срез в режиме жироподавления в цветообработке fire; Г — шкала интенсивности рыхлой и плотной ткани в режиме цветообработки fire

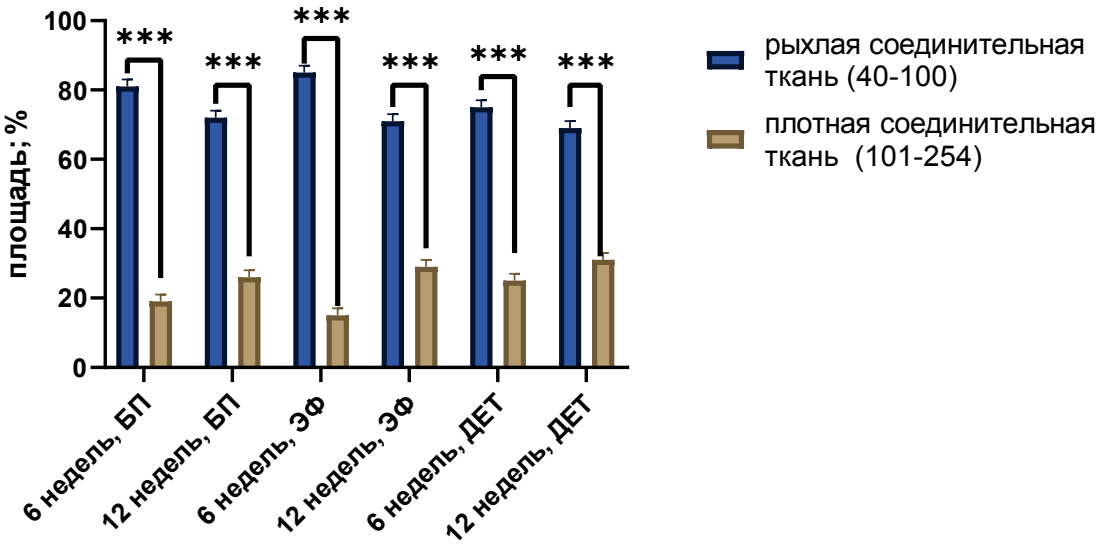


Рис. 2. Соотношение рыхлой и плотной ткани в составе фиброзной капсулы вокруг скаффолда:
БП — без покрытия, ЭФ — покрытие методом электрофореза, ДЕТ — покрытие методом детонации

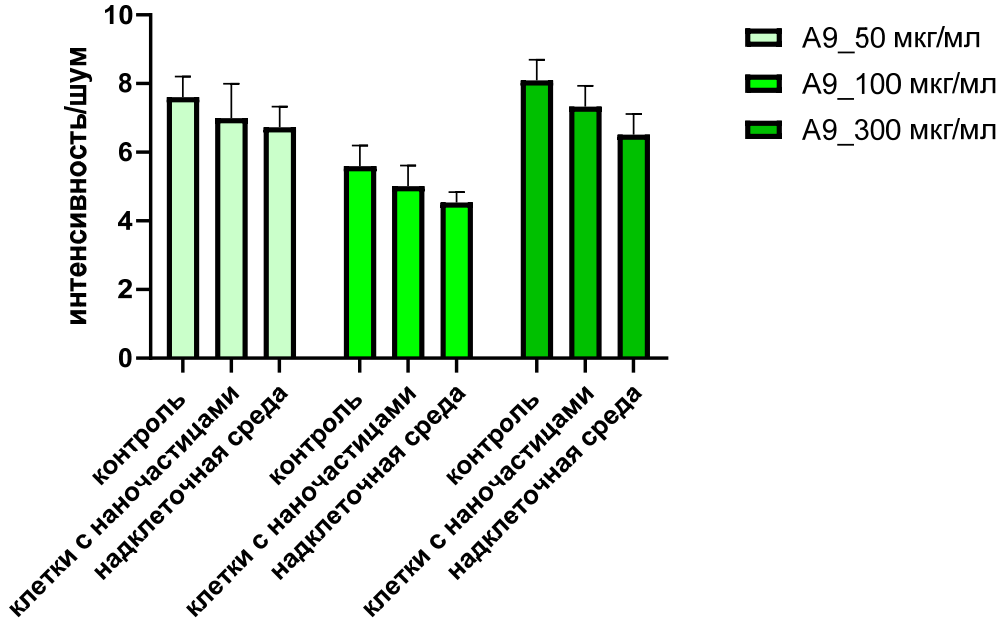


Рис. 3. диаграмма отрицательной интенсивности парамагнитных частиц in vitro в режиме T2-fast spin echo

Заключение

Разработан новый метод дифференциации тканей, демонстрирующий высокую эффективность при использовании в МРТ-режиме T1w с жироподавлением. Данный алгоритм позволяет достоверно разграничивать рыхлую и плотную соединительную ткань как в аутоптатах, так и открывает перспективы для мониторинга биоинтеграции композитных имплантатов in vivo. В рамках дальнейших исследований планируется разработка методик оценки клеточной колонизации скаффолдов in vitro, создание новых подходов к анализу биоинтеграции имплантатов in vivo, а также применение усовершенствованных композитных материалов с оптимизированными свойствами для улучшения процессов биоинтеграции. Полученные результаты имеют значительный потенциал для развития методов неинвазивного мониторинга в области тканевой инженерии и имплантологии.

Список источников

[1] *Skriabin A.S., Tsygankov P.A., Vesnin V.R., Shakurov A.V., Skriabina E.S., Sviridova I.K., Sergeeva N.S., Kirsanova V.A., Akhmedova S.A., Zherdeva V.V. et al.* Electrophoretic Deposition of Calcium Phosphates on Carbon–Carbon Composite Implants: Morphology, Phase/Chemical Composition and Biological Reactions // Int. J. Mol. Sci. 2024. Vol. 25. Art. no. 3375.

Evaluation of tissue effects in implantation of carbon - carbon composites by MRI

P.E. Zaitsev[1], A.S. Skriabin[2], A.V. Shakurov[2], V.V. Zherdeva[1]

[1] *Bach Institute of Biochemistry, Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[2] *Department of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

The development of intravital methods for assessing the biointegration of implantable materials and prognostic criteria for successful implantation is relevant for personalized medicine. The aim of the work is to develop MRI criteria for determining the biointegration of carbon-carbon composites. The studies were conducted on BDF1 mice, which were implanted with composites. The MRI method was used to assess the structure of the connective tissue capsule formed around the implant in dynamics in vivo and in auoptates. The criterion for the effectiveness of biointegration was the quantitative ratio of loose and dense connective tissue in the structure of the fibrous capsule. An algorithm based on MRI visualization and the maximum intensity projection method has been developed, allowing for a quantitative assessment of this parameter. The proposed technique demonstrates the potential for differentiating connective tissue types not only ex vivo, but also in vivo.

Keywords: *carbon–carbon composites, implantation, MRI, biontegration, connective tissue capsule, dense connective tissue, loose connective tissue*

Исследование липидных рафтов с помощью биосенсора на основе фотонных интегральных схем

И.Н. Флоря[1], И.А. Андриевская[2], Е.М. Устинов[2], А.Ю. Кузин[1, 3], А.Д. Голиков[4], В.С. Галанова[1, 3], Д.М. Кобцев[1, 5], 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 (ФИС) и микрофлюидных каналов выделяются среди множества датчиков благодаря высокой чувствительности (<100 нм/RIU), низкому пределу обнаружения (<10 млн$^{-1}$) и малому объему требуемого аналита (<20 мкл). Они могут неразрушающим образом обнаруживать аналит в реальном времени без использования меток. Изготовленные нами ФИС впервые применялись для измерения показателя преломления липидных рафтов в градиентных фракциях оптипрепа. Сравнение экспериментальных данных с данными рефрактометрии показывает хорошее согласие двух методов, открывая путь к определению ультранизких концентраций липидных рафтов и изучению их влияния на свойства иммунных клеток, связанных с развитием инфекционно-воспалительных заболеваний и постинфекционных осложнений.

Ключевые слова: *фотонные интегральные схемы, микрофлюидные каналы, комплексный показатель преломления, липидные рафты*

Введение

Липидные рафты — небольшие домены плазматической мембраны, богатые холестерином и сфинголипидами [1]. Они играют важную роль в клеточной сигнализации, вирусном инфицировании и других процессах. Рафты динамичны, могут разрушаться при выделении, размер 10–200 нм, не имеют уникальных биохимических маркеров — все это делает их обнаружение технически сложным, требуя комбинацию методов и повышения чувствительности.

Сенсоры на основе ФИС с микрофлюидными каналами хорошо показали себя в области биосенсинга [2]. В основе работы ФИС в качестве сенсора лежит оптический метод измерения показателя преломления. Метод основан на изменении оптического пути света и спектральном сдвиге интерференционной картины при взаимодействии эванесцентной моды с волноводным окружением. Функционализация поверхности в режиме реального времени позволяет сделать ФИС селективным к биомаркерам.

Протокол отделения и состав рабочих растворов

Для исследования были приготовлены 2 линейки образцов по 10 растворов липидных рафтов в буфере с различной концентрацией по методу детергент-free флотирования [3]. Постъядерный супернатант (PNS), полученный сдвиговым лизисом клетки в изотоничном буфере, смешивался пополам с 50 % OptiPrep, ($\rho_{взвеси} \approx 1{,}135$ г/мл). Этот 25 % слой (1,7 мл) укладывался на дно холодной 5-мл трубки. Сверху добавляли 1,7 мл 20 % OptiPrep ($\rho \approx 1{,}110$ г/мл) и, наконец, 1,7 мл чистого буфера ($\rho \approx 1{,}055$ г/мл). Центрифугирование при 25 000 g в течение 5 часов, легкие холестерин- и сфинголипид-обогащенные микродомены всплывали к границе 0/20 %. Из-за скачка плотности, они образовывали характерный туманный пояс, который становился ядром четвертой из десяти фракций.

Базовый буфер: 20 мМ Tris–HCl pH 7,8, 250 мМ сахароза, 1 мМ $CaCl_2$, 1 мМ $MgCl_2$, ингибиторы протеаз (0,2 мМ AEBSF, 1 μг/мл апротинин, 10 μМ бестатин, 3 μМ E–64, 10 μг/мл лейупетин, 2 μМ пепстатин, 50 μг/мл calpain–I). OptiPrep — 60 % (м/об) раствор йодиксанола в воде с 0,27 М сахарозы; плотность исходного концентрата ≈ 1,32 г/мл.

После центрифугирования концентрация йодиксанола по фракциям с учетом частичной диффузии между слоями: фракции 1–3 почти не содержат OptiPrep, 4 фракция — 8–12 %; 5 фракция — 15–18 %; 6–7 фракции — 19–20 %; 8–10 фракции — приближаются к 25 %.

Дизайн ФИС

Фотонный чип выполнен на коммерческой платформе Si с толщиной подслоя SiO_2 2,6 мкм и верхнего слоя Si_3N_4 толщиной 450 нм. В основе биосенсора был микрокольцевой резонатор в полупротравленном дизайне. Радиус кольца R = 193 мкм, зазор между подводящим и кольцевым волново-

дами 0,8 мкм, ширина подводящего и кольцевого волноводов составляла 1,15 и 1,8 мкм, соответственно. Для ввода/вывода оптического излучения в ФИС использовались фокусирующие решетки (FGC), оптимизированные на длину волны 1550 нм. Микрофлюидный канал был выполнен из ПДМС (полидиметилсилоксан), имел ширину 700 мкм и полностью покрывал микрокольцевой резонатор.

Экспериментальная установка

ФИС с микрофлюидными каналами был собран на металлическом держателе и располагался на 3D-механическом столике с пьезодвигателями для точного геометрического выравнивания FGC и массива одномодовых волокон, а также возможности управления температурой. Измерения проводились при температуре 23 °C. Для прокачки аналитов использовали перистальтический насос. Излучение перестраиваемого лазера через контроллер поляризации подавалось на FGC фотонного чипа и на выходе из ФИС измерялось быстрым фотодетектором. При каждом измерении проводилась развертка длин волн в диапазоне от 1510 до 1630 нм с последующей записью спектров пропускания.

Методы и результаты

На первом этапе предварительное исследование ФИС с кольцевым резонатором и микрофлюидными каналами показало чувствительность около 20 нм/RIU, предел обнаружения менее 4,5 млн$^{-1}$ при объеме требуемого аналита менее 25 мкл [4].

На втором этапе через охарактеризованные сенсоры прокачивались растворы липидных рафтов. В процесс прокачки нами измерялись спектры пропускания ФИС. Зависимости сдвига резонансной длины волны кольцевых микрорезонаторов сравнивались с данными полученными на рефрактометре (ИРФ-Компакт) (рис. 1.) Как видно из рисунков, наблюдается хорошее согласие двух методов.

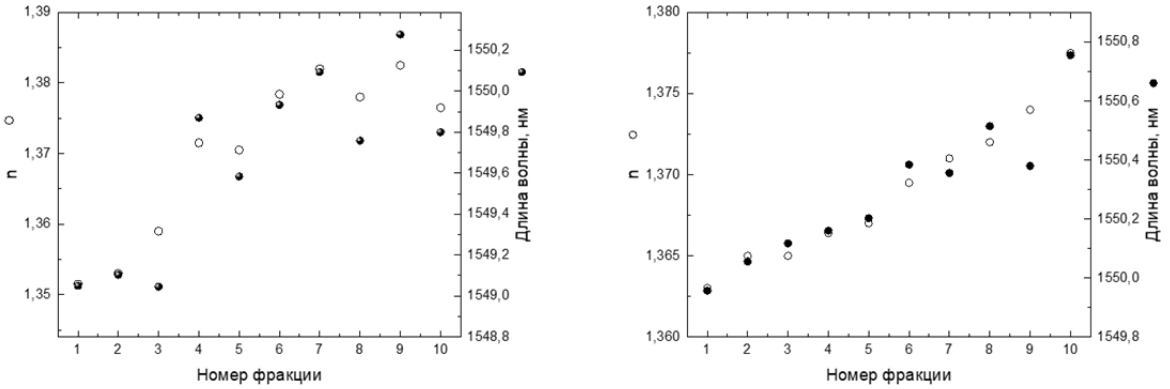
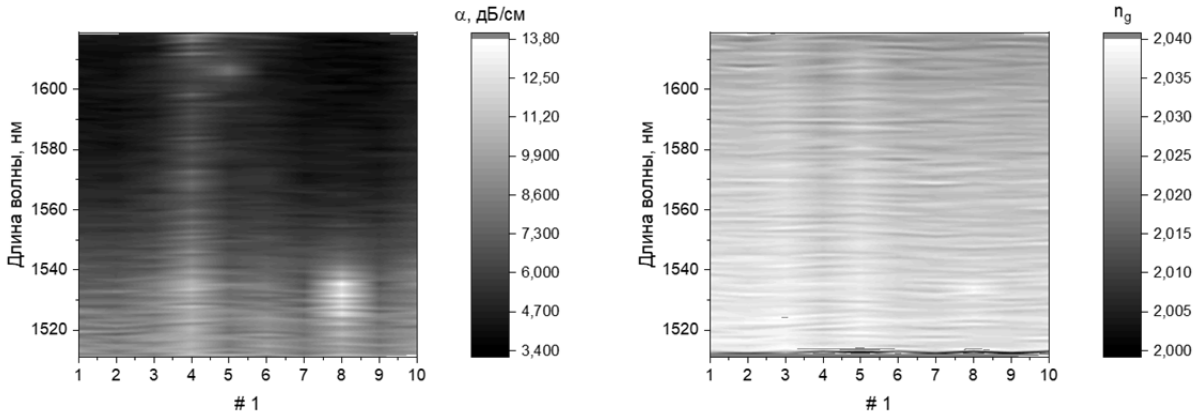


Рис. 1. Экспериментальные данные зависимости сдвига резонансной длины волны от номера образца (черные кружки) в сравнении с данными рефрактометрии (светлые кружки): а) линейка образцов № 1; б) линейка образцов № 2

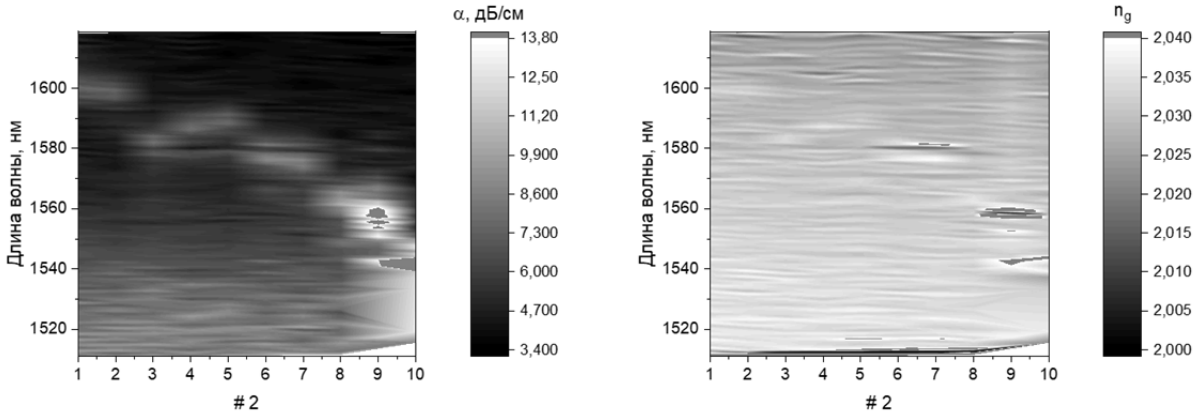
В отличие от стандартного рефрактометра, который может получать только действительную часть показателя преломления, используемый нами метод измерения позволяет извлекать групповой показатель (n_g) преломления и оптическое поглощение (α) одновременно [5]. На рис. 2 и 3 показаны контурные карты (n_g и α) для всех исследуемых растворов в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1510–1630 нм.

Экспериментальные данные показывают, что выделенные 2 линейки образцов отличаются между собой. Нами это связывается с возможной диффузией между слоями из-за долгого центрифугирования. Согласно методу приготовления растворов, пиковые концентрации липидных рафтов должны быть во фракциях 3–5.



а) б)

Рис. 2. Контурные карты для линейки образцов № 1: а) потери; б) групповой показатель преломления



а) б)

Рис. 3. Контурные карты для линейки образцов № 2: а) потери; б) групповой показатель преломления

Заключение

В работе нами были исследованы различные фракции липидных рафтов, отличающиеся концентрацией. Было показано, что изменение концентрации приводит к изменению показателя преломления растворов. Сравнение данных, полученных на рефрактометре с данными на основе фотонных интегральных схем, показывает хорошее согласие двух методов. Дополнительные данные — групповой показатель преломления и оптические потери, которые могут быть получены одновременно с действительной частью n, открывают новый подход к измерению малых концентраций липидов в буфере биосенсором на основе ФИС. ФИС позволит изучать липидные рафты с большой точностью, анализировать динамику.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования FSME-2025-0004 (изготовление фотонных интегральных схем) и Российского научного фонда № 23-79-00056 (исследование).

Список источников

[1] *Sezgin E. et al.* The mystery of membrane organisation: composition, regulation and physiological relevance of lipid rafts // Nat. Rev. Mol. Cell Biol. 2017. Vol. 18 (6). P. 361–374.

[2] *Kuzin A. et al.* Real-time surface functionalization of a nanophotonic sensor for liquid biopsy // Applied Physics Letters. 2023. Vol. 123. № 19.

[3] *Macdonald J.L. et al.* A simplified method for the preparation of detergent-free lipid rafts // Journal of Lipid Research. 2005. Vol. 46. C. 1061–1067.

[4] *Kuzin A. et al.* Hybrid nanophotonic–microfluidic sensor for highly sensitive liquid and gas analyses // Optics Letters. 2022. Vol. 47. № 9. C. 2358–2361.

[5] *Kuzin A. et al.* Microfluidic–nanophotonic sensor for on-chip analysis of complex refractive index // Applied Physics Letters. 2024. Vol. 124. № 6.

Study of lipid rafts using biosensor based on photonic integrated circuits

I.N. Florya[1], I.A. Andrievskaya[2], E.M. Ustinov[2], A.Y. Kuzin[1,3], A.D. Golikov[4], V.S. Galanova[1,3], D.M. Kobtsev[1], V.V. Kovalyuk[1,5], G.N. Goltsman[5,6]

[1] *University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*
[2] *Far Eastern Scientific Centre of Physiology and Pathology of Respiration, Blagoveshchensk, Russia*
[3] *Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*
[4] *Moscow State Pedagogical University, Moscow, Russia*
[5] *National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*
[6] *Russian Quantum Center, Moscow, Russia*

Sensors based on photonic integrated circuits (PICs) and microfluidic channels stand out among many sensors due to their high sensitivity (< 100 nm/RIU), low detection limit (< 10 ppm), and small volume of required analyte (< 20 μL). They can non-destructively detect analyte in real time without using markers. Our PICs were first used to measure the refractive index of lipid rafts in Optiprep gradient fractions. Comparison of experimental data with refractometry data shows good agreement between the two methods, opening the way to determining ultra-low concentrations of lipid rafts and studying their effect on the properties of immune cells associated with the development of infectious and inflammatory diseases and post-infectious complications.

Keywords: *photonic integrated circuits, microfluidic channels, complex refractive index, lipid rafts*

MIP и 1T МРТ в анализе повреждений головного мозга у мышей линии C57BL/6 в купризоновой модели рассеянного склероза

В.Н. Володина, П.Е. Зайцев, В.В. Жердева

Институт биохимии им. А.Н. Баха, Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Россия

Целью данного исследования была разработка системы статистической оценки степени поражений головного мозга при рассеянном склерозе с помощью 1T МРТ. Для проведения эксперимента использовался томограф Аспект Имиджинг, Израиль, напряженность поля 1T. В качестве контраста использовались препараты на основе гадолиния. Сканирование производилось под газовым наркозом. Результаты обрабатывались с помощью программы ImageJ Fiji. В ходе исследования был разработан новый принцип анализа данных, основанный на MIP (maximal intensity projection — MIP), позволяющий оценить глубину поражений.

Ключевые слова: *1T МРТ, мышиная модель, рассеянный склероз, MIP, обработка данных*

Целью исследования является выбор оптимального алгоритма МР-сканирования на маломощном томографе, а также разработка метода анализа, позволяющего оценивать повреждение структур наиболее полно неинвазивными методами.

Мыши линии C57/BL6 в течение 90 дней получали 400 мг купризона с кормом, затем проводили МРТ-сканирование под газовой анестезией (изофлюран, минимальная объемная концентрация 1,5–2 %). Параметры МРТ-анализы были следующими: для режима T2w FOV 25×25 мм, матрица 168×168, NEX 10, TR/TE 3000/69,1, расстояние между срезами 0,05 мм, FA 90 градусов. Температура тела поддерживалась в области физиологической нормы благодаря подогреваемой катушке МРТ-томографа.

В ходе сканирования контроль дыхания осуществлялся с помощью совместимой с томографом системы мониторинга для мелких лабораторных животных. Частота дыхательных движений в ходе съемки поддерживалась на уровне 30 дыхательных движений. По мере проведения эксперимента фиксировались атипичные очаги накопления контраста в головном мозге. Полученные сканы анализировали в программе ImageJ Fiji. Во время обработки данных фиксировалась площадь накопления контраста, что совпадает с площадью поражения нервных волокон. Анализ изображений проводили на основе получения и суммирования проекций с максимальным значением интенсивности MIP (maximal intensity projection — MIP) [1]. Суммарная площадь в этом случае складывалась из всех сканов. Рассчитывали средние значения интенсивностей и максимальную площадь накопления контрастного агента в очагах поражения.

В ходе обработки полученных данных было отмечено, что основные работы по данной тематике проводились на томографах с напряженностью поля от 2,35T до 9,4T [2–5]. Мы использовали обработку данных с помощью MIP на томографах с напряженностью 1T, что, в итоге, дало результаты, коррелирующиеся с имеющимися данными.

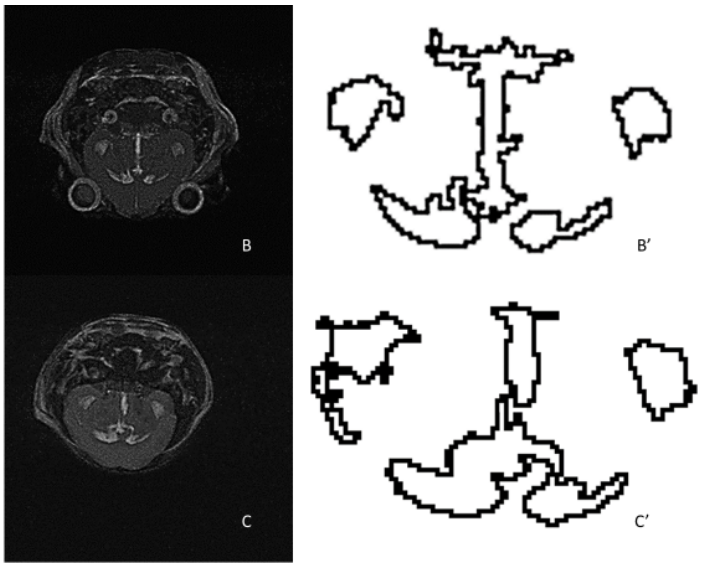


Рис. 1. Схема создания контуров

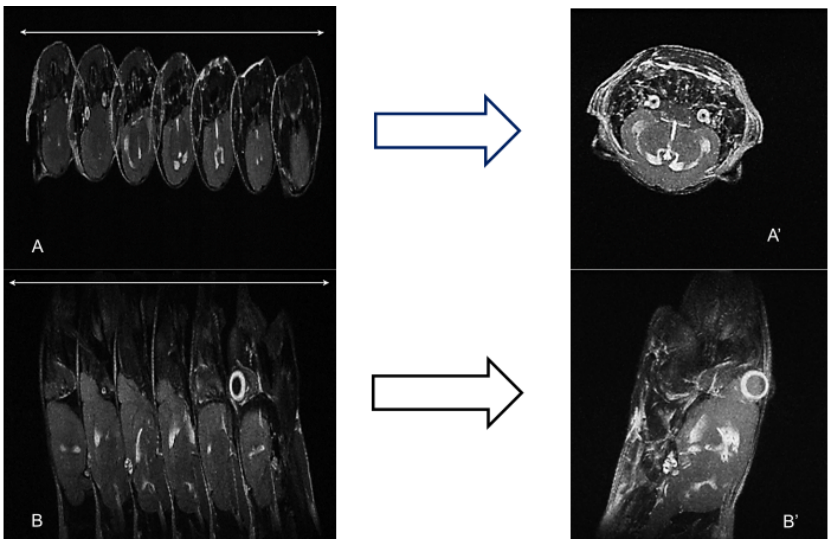


Рис. 2. Схема создания MIP-изображения

В нашем исследовании мы попытались наиболее полно исследовать мозг мышей линии C57Bl/6 in vivo, а также подобрать параметры для использования в подобных исследованиях томографов с меньшей мощностью.

Для наиболее полной обработки результатов эксперимента мы использовали метод MIP. В ходе этого были созданы контуры, очерчивающие области с гиперинтенсивным сигналом, сканы МРТ в данном способе обработки представляют собой наложения нескольких проекций (рис. 1).

Суммарная площадь в этом случае складывалась из всех сканов (рис. 2).

Метод проекции максимальной интенсивности (MIP) позволил точно определить площадь распространения контрастного вещества, определив область, где плотность интенсивно окрашенных пикселей при сложении проекций наибольшая. Также это позволило на основе значений интенсивности сделать выводы о том насколько глубоко проникло контрастное вещество.

Список источников

[1] *Park H., Kwon M.J., Han Y.* Techniques in image segmentation and 3D visualization in brain MRI and their applications // Medical Imaging Systems Technology. Vol. 5. Methods in Cardiovascular and Brain Systems. 2005. P. 207–253.

[2] *Mitsumori L.M. et al.* Magnetic resonance imaging using gadolinium-based contrast agents // Topics in Magnetic Resonance Imaging. 2014. Vol. 23. № 1. P. 51–69.

[3] *Frullano L., Caravan P.* Strategies for the preparation of bifunctional gadolinium (III) chelators // Current organic synthesis. 2011. Vol. 8. № 4. P. 535–565.

[4] *Wang N. et al.* Probing demyelination and remyelination of the cuprizone mouse model using multimodality MRI // Journal of Magnetic Resonance Imaging. 2019. Vol. 50. № 6. P. 1852–1865.

[5] *Boretius S. et al.* Assessment of lesion pathology in a new animal model of MS by multiparametric MRI and DTI // Neuroimage. 2012. Vol. 59. № 3. P. 2678–2688.

IP and 1T MRI in the analysis of brain damage in C57BL/6 mice in the cuprizone model of multiple sclerosis

V.N. Volodina, P.E. Zaitsev, V.V. Zherdeva

Bach Institute of Biochemistry, Federal Research Center "Fundamentals of Biotechnology" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The aim of this study was to develop a system for statistical assessment of the degree of brain damage in multiple sclerosis using 1T MRI. For the experiment, we used the Aspect Imaging tomograph, Israel, field strength 1T. Gadolinium-based drugs were used as a contrast. Scanning was performed under gas anesthesia. The results were processed using the ImageJ Fiji program. During the study, a new principle of data analysis was developed based on MIP (maximal intensity projection — MIP), which allows to estimate the depth of lesions.

Keywords: *1T MRI, mouse model, multiple sclerosis, MIP, data processing*

Оптическое просветление, флуоресцентный имиджинг и МРТ в детекции индивидуальных тканевых эффектов при резорбции полиэфирных сополимерных материалов биомедицинского назначения

А.Р. Лихов[1], В.В. Тучин[2], В.В. Жердева[1]

[1] *Институт биохимии им. А.Н. Баха ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва, Россия*
[2] *Саратовский государственный университет Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

Биорезорбируемые имплантаты на основе полиэфирных сополимерных композитов применяются в хирургии и регенеративной медицине. Возможность визуализации их резорбции актуальна для оценки индивидуальных тканевых реакций. В работе представлены комбинированные подходы с использованием МРТ, флуоресцентной визуализации и технологии оптического просветления, позволяющие выявлять отек, воспаление, фиброз и нарушение кожного покрова. Анализ эффективности оптического просветления (−30 %≤Q≤70 %) указывает на специфические локальные изменения вокруг импланта. Предложенный метод открывает перспективы для неинвазивного мониторинга биодеградации и персонализированной оценки совместимости материалов с тканями организма.

Ключевые слова: *резорбируемые полиэфирные импланты, МРТ, флуоресцентная визуализация, глицерин, эффективность оптического просветления*

Мультимодальные методы визуализации могут предоставлять ценную информацию для анализа долгосрочной судьбы материала в организме. С их помощью можно наблюдать за процессами резорбции, оценивать степень интеграции имплантата в ткани, выявлять воспалительные реакции и отслеживать ремоделирование внеклеточного матрикса. Это значительно повышает информативность исследований и позволяет принимать более взвешенные решения при переходе от доклиническим к клиническим испытаниям.

Ранее нами были получены результаты по оценке деградации и резорбции полиэфирных сополимерных материалов гравиметрическим методом, методами МРТ и флуоресцентного имиджинга [1]. В настоящей работе основное внимание уделено использованию оптического просветления для описания тканевых реакций при имплантации данных материалов мышам линии Balb\c. На этапе получения в сополимерную смесь были внесены флуоресцентные (ICG) и парамагнитные метки (цитрат гадолиния (Gd3+)). Поскольку флуоресценция образцов сополимера демонстрировала неоднородность, уровень сигнала флуоресценции индоцианина зеленого (ICG) у животных также варьировался.

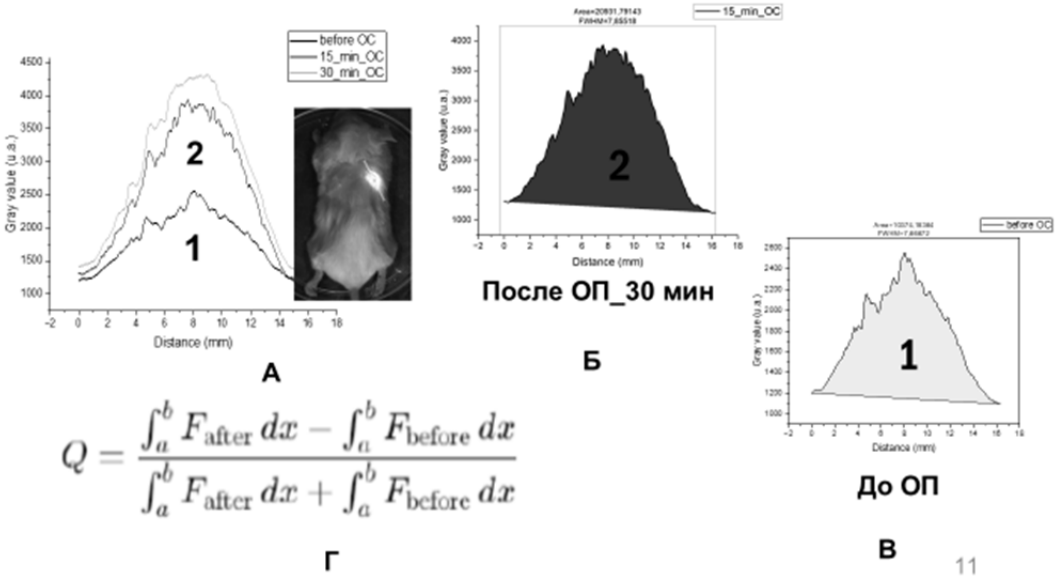


Рис. 1. Расчет эффективности (Q) оптического просветления (ОП). Сегментация изображения (ROI) и соответствующие профили интенсивности флуоресценции (А); результаты интегрирования интенсивности флуоресценции после ОП (Б) и до ОП (В), рассчитанные в соответствующей области интереса в программе Image J/Fijji; формула расчета эффективности ОП (Г)

Для уменьшения светорассеяния и улучшения контраста применяли оптический просветляющий агент (ОПА) на основе водной смеси, содержащей 70 % глицерина и 5 % ДМСО. ОПА приме-

нялося местно в виде аппликаций. Интеграл под кривой распределения интенсивности флуоресценции (ИФ) рассчитывался по области выделения (ROI), обозначенной на рис. 1, А, как после (площадь 2, рис. 1, Б), так и до (площадь 1, рис. 1, В) нанесения ОПА. Эффективность оптического просветления (Q) рассчитывали по формуле (рис. 1, Г) как соотношение разности к сумме интегралов под кривыми после и до нанесения ОПА.

Q (n=3–12) продемонстрировала изменения в течение всего периода наблюдения за животными (0–45дней). Эти результаты демонстрируют высокий уровень вариации для точек после применения ОПА: –30 % ≥ Q сум ≤ +70 % (рис. 2, А), в то время как усредненная Q для каждого времени экспозиции с ОПА продемонстрировала слабый эффект 7,4 % ≥ Q средний ≤ 10,4 % (рис. 2, Б).

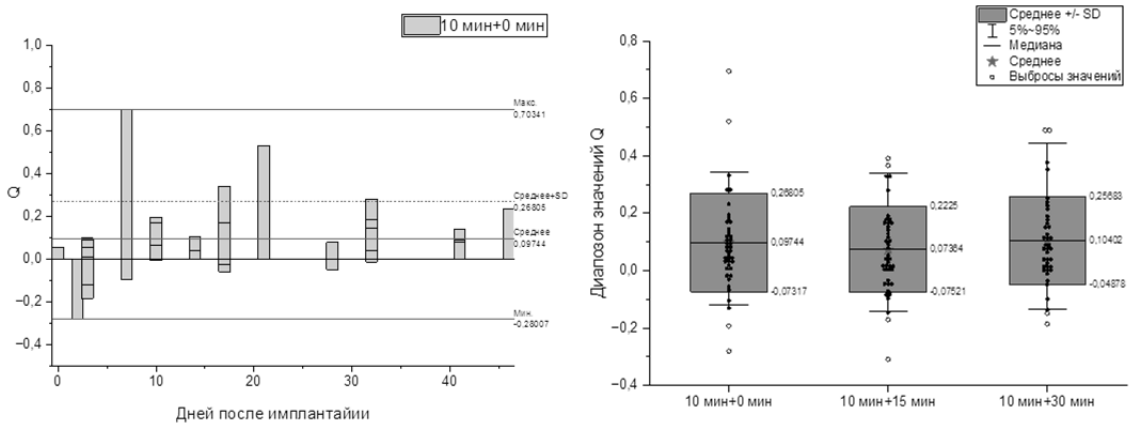


Рис. 2. Эффективность оптического просветления (Q) (А) диаграмма Q-box с на 0–43 дни наблюдения (n=12). (Б**)** Диаграмма Тьюки для Q среднего 10 мин аппликации +0 мин, 10 мин аппликации +15 мин, 10 мин аппликации +30 мин

При оценке индивидуальных эффектов на животных снижение эффективности ОП происходило вследствие прямого тушения ИФ флуорофора и преобладало в начальный период наблюдения (0–17 дней) из-за неполного заживления места операции. МРТ-сканы продемонстрировали соответствующие тканевые эффекты после ОП в местах вокруг имплантированного материала (рис. 3). Помимо незаживающих ран, такие эффекты, как экссудат вокруг импланта также влиял на эффективность ОП, приводя к ее снижению.

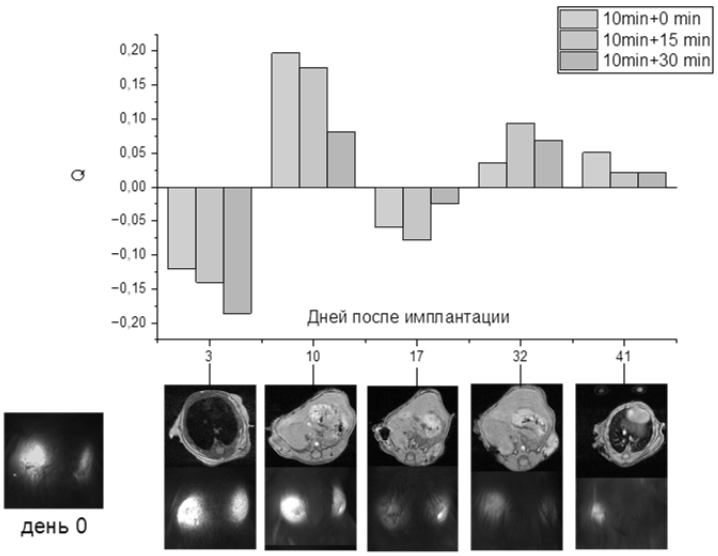


Рис. 3. Индивидуальные показатели эффективности просветления Q и соответствующие аксиальные проекции МРТ и флуоресцентное изображение имплантов в экспериментальных животных, демонстрирующие тканевые эффекты вокруг имплантов. Диаграмма суммарных Q **(**вверху) и аксиальных проекций МРТ (внизу) в режимах T1wGRE T1 (TR / TE = 60 / 3 мс, FA 20, NEX 7, FOV 40×40 мм, 128×128 /256×256)

Пример изменения эффективности ОП (Q) на всем периоде наблюдения для одного из животных приведено на рис. 3. Отрицательные значения Q демонстрирует на 3-й и 17-й день. Соответствующий T2wMPT указывает на нарушение кожного покрова с той же стороны. Отек вокруг импланта на 41 день также снижает эффективность оптического просветления, что подтверждается соответствующими T2wMPT изображениями (рис. 3).

Таким образом, мультимодальная визуализация, основанная на сочетании флуоресцентной визуализации, оптического просветления и МРТ, представляет собой информативный инструмент для комплексной оценки резорбции полиэфирных материалов в условиях in vivo. С помощью данного подхода можно не только прогнозировать сроки резорбции, но и анализировать тканевые эффекты, что открывает новые возможности для создания функциональных и адаптивных биоматериалов будущего.

Список источников

[1] *Zherdeva VV. et al.* Enhanced Fluorescence Imaging of Implants Based on Polyester Copolymers in Combination With MRI // J Biophotonics. 2025. Art. no. e202400147. https://doi.org/10.1002/jbio.202400147

Optical clearing, fluorescent imaging, and MRI in the detection of individual tissue effects during the resorption of biomedical polyether copolymer materials

A.R. Likhov[1], V.V. Tuchin[2], V.V. Zherdeva[1]

[1] *A.N. Bach Institute of Biochemistry, Federal Research Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[2] *N.G. Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia*

Bioresorbable implants based on polyester copolymer composites are used in surgery and regenerative medicine. The ability to visualize their resorption is crucial for assessing individual tissue responses. This work presents combined approaches using MRI, fluorescent imaging, and optical clearing techniques to detect edema, inflammation, fibrosis, and skin barrier disruption. Analysis of the efficiency of optical clearing ($-30\ \% \le Q \le 70\ \%$) indicates specific local changes around the implant. The proposed method offers promising prospects for non-invasive monitoring of biodegradation and personalized assessment of material compatibility with body tissues.

Keywords: *resorbable polyester implants, MRI, fluorescent imaging, glycerol, optical clearing efficiency*

Секция 12
Оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации

Фазовый ввод информации в 4F системе

Р.В. Скиданов, Ю.В. Ханенко, А.Е. Морозов, А.С. Пронин, Д.М. Сорокин, Л.Л. Досколович

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

Экспериментально проверена возможность ввода информации в 4F систему, работающую в режиме дифракционной нейронной сети, в виде модуляции фазового распределения входного светового поля. Показано, что при определенных условиях фазовый ввод позволяет получить лучшие результаты по сравнению с вводом амплитудным.

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

Введение

Реализации нейронных сетей с помощью оптики очень подробно описана в [1]. Эта книга была издана еще в 1998 году. Особенно много места в данной книге уделяется наиболее тонкому вопросу реализации нелинейного преобразования. Книга написана задолго до того, как нейронные сети (а именно, сверточные нейронные сети) стали крайне эффективным способом распознавания образов, что произошло чуть более 10 лет назад.

Прорыврм в данной тематике можно считать публикацию [2], в которой предложено использование каскада дифракционных оптических элементов для распознавания изображений. В качестве еще одного достижения данной статьи следует отметить подход к расчету каскада ДОЭ, аналогичный обучению нейронных сетей, основанный на градиентном спуске функционала среднеквадратичного отклонения. Глубокая дифракционная нейронная сеть состоит из тонких фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ), расположенных на некоторых расстояниях друг от друга. На выходе есть набор областей, в которых происходит регистрация сформированной интенсивности и распознавание осуществляется по определению максимума мощности в одной из этих областей.

Однако существует проблема, связанная с необходимостью очень точной юстировки оптических транспарантов относительно друг друга, эту проблему можно решить в 4F системы, в которой небольшое смещение транспаранта не оказывает существенного воздействия на результат распознавания. Еще одна проблема связана с тем, что ввод информации осуществляется в виде амплитудной модуляции входящего светового поля, при этом используется принципиально фазовый модулятор света, что приводит к необходимости установки дополнительных элементов, которые являются дополнительными источниками ошибок.

Эксперимент

Рассмотрим экспериментальное аналоговое фотонное вычислительное устройство (АФВУ) на основе 4F системы. Принципиальная оптическая схема АФВУ представлена на рис.1а. Выходное линейно-поляризованное излучение твердотельного лазера (LSR532HX- 2W, λ = 532нм, максимальная выходная мощность 2,5 Вт) преобразовывалось в световое распределение близкое к плоской волне, за счет использования системы коллимации пучка с микрообъективом (20×) и микродиафрагмой диаметром 10мкм проходило через полуволновую пластинку, которая была использована для поворота плоскости линейно поляризации лазерного пучка. Далее это линейно-поляризованное излучение попадало через светоделительный кубик Bs1 на отражающий пространственный модулятор света M1 SPSLM36R (размер 4096×2240 пикселей, размер пикселя 3,6 мкм) (входная плоскость). Комбинация линзы L2 (фокусное расстояние 250 мм) и отражающего пространственного модулятора света SPSLM36R была использована для реализации 4F оптической системы Фурье-коррелятора, где в качестве пространственного фильтра использовалась фазовая маска, выводимая на дисплей модулятора (спектральная плоскость). При этом светоделительный кубик Bs2 был использован как дополнительный элемент этого коррелятора, который был использован для наблюдения отраженного промодулированного светового поля с помощью видеокамеры Cam1 (Daheng ME2P-1231-32U3M, размер матрицы 4096×3000, размер пикселя 3,45 мкм). Светоделительный кубик BS2 в сочетании с линзой L3 (фокусное расстояние 75 мм) давал возможность наблюдать интенсивность светового поля, сформированного в плоскости дисплея отражающего модулятора M2. В данном случае расстояние от линзы до плоскости дисплея модулятора, а также расстояние от линзы до матрицы видеокамеры Cam2(Daheng ME2P-1231-32U3M, размер матрицы 4096×3000, размер пикселя 3,45 мкм) было равно двойному фокусному расстоянию линзы. Фактически регистрируемая интенсивность в этом случае представляет собой спектр светового поля, сформированного в плос-

кости дисплея первого модулятора света M1. Реализованное экспериментальное устройство в основном соответствует оптической схеме на рис. 1.

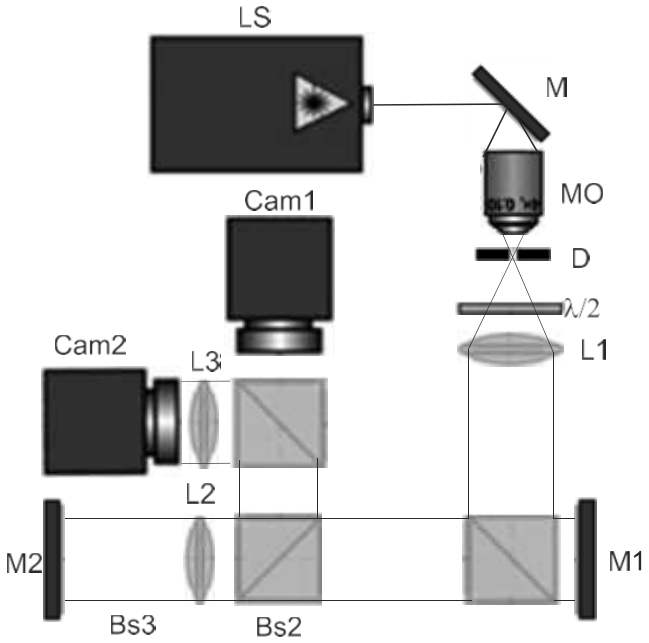


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента на основе 4F схемы: (а) принципиальная оптическая схема: LS — лазер (532нм), M — поворотное зеркало, MO — микрообъектив (20×), D — диафрагма, λ/2 — полуволновая пластина, L1 — линза коллиматор, Bs1, Bs2, Bs3 — делители пучка, M1 — входной модулятор, L2 — линзы, выполняющая преобразование Фурье, M2 — модулятор в частотной плоскости, L3 — линзы для формирования изображения распределения интенсивности в частотной плоскости, Cam1 — выходная камера, Cam2 — камера регистрирующая распределение интенсивности в частотной плоскости

Представленная оптическая схема за счет отсутствия поляризатора позволяет в 2 раза снизить мощность используемого лазера по сравнению со схемой, в которой реализуется амплитудный ввод.

В качестве тестового набора объектов выступали силуэты беспилотных летательных аппаратов семи разных типов в разных ракурсах (по 10 000 на каждый тип), как показано на рис. 2.

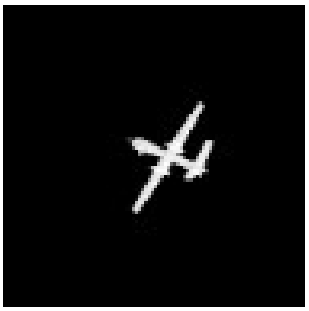


Рис. 2. Пример силуэта беспилотного летательного аппарата

Результаты распознавания 5000 силуэтов беспилотных летательных аппаратов

Тип	1	2	3	4	5	6	7
1	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,02	0,91	0,00	0,02	0,00	0,05	0,00
3	0,00	0,00	0,95	0,02	0,00	0,03	0,00
4	0,00	0,02	0,11	0,61	0,00	0,26	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00	0,02
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,98
							0,92

В таблице представлены результаты эксперимента по распознаванию 5000 силуэтов.

Дифракционная нейронная сеть была рассчитана (обучена) методом, который подробно описан в [3]. Кроме этого, минимизации влияния большого светового потока на модуляторе в частотной плоскости участок диаметром 50 мкм вокруг оптической оси заполнялся бинарной дифракционной решеткой максимальной малого периода (два пиксела модулятора).

Надежность распознавания составила около 92 %, что намного выше, чем получалось достигнуть при амплитудном вводе (85 %).

Заключение

Оптические аналоговые вычисления в 4F системе удобнее осуществлять использую фазовую модуляцию светового поля для ввода информации. За счет отсутствия поляризатора позволяет в 2 раза снизить мощность используемого лазера по сравнению со схемой, в которой реализуется амплитудный ввод. Эксперимент показал существенно более высокую надежность распознавания силуэтов беспилотных летательных аппаратов, по сравнению с классическим амплитудным вводом информации.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

Список источников

[1] *Denz C.* Optical neural networks. Luxemburg: Springer Science & Business Media, 1998.

[2] *Lin X., Rivenson Y., Yardimci N.T. et al.* All-optical machine learning using diffractive deep neural networks // Science. 2018. Vol. 361. P. 1004–1008. https://doi.org/10.1126/science.aat8084

[3] *Soshnikov D.V., Doskolovich L.L., Byzov E.V.* Gradient method of cascade DOE calculation and its application in the problem of classification of handwritten digits // Computer optics. 2023. Vol. 47. № 5. P. 691–701.

Phase input of information in the 4F system

R.V. Skidanov, Yu.V. Khanenko, A.E. Morozov, A.S. Pronin, D.M. Sorokin, L.L. Doskolovich

Samara University, Samara, Russia

The possibility of entering information into a 4F system operating in the mode of a diffraction neural network in the form of modulation of the phase distribution of the input light field has been experimentally verified. It is shown that under certain conditions, phase input allows for better results than amplitude input.

Keywords: *4F system, diffraction neural network, optical calculations*

Вычислительный дифракционный метод регистрации и компенсации фазовых искажений в когерентных оптических системах

З.С. Марков, Т.З. Миниханов, Е.Ю. Злоказов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В докладе представлены результаты экспериментального исследования вычислительного дифракционного метода регистрации волнового фронта на основе алгоритма Герчберга — Сэкстона с использованием случайных фазовых масок для задачи компенсации фазовых искажений в когерентных оптических системах. Проведена апробация метода фазовой визуализации на примере волнового фронта, пространственно модулированного скрытым изображением; описан эксперимент по улучшению качества голографической реконструкции путем измерения и регистрации контролируемого сферического волнового фронта. Полученные результаты демонстрируют перспективность предложенного подхода для повышения разрешающей способности и стабильности голографических систем

Ключевые слова: *оптика, голография, измерение волнового фронта, компенсация аберраций*

Введение

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество и точность получения, передачи и обработки данных когерентными голографическими системами [1–6], является возникновение фазовых искажений, возникающих в результате распространения лазерного излучения на оптических элементах системы.

Используемые для измерения фазовых искажений современные датчики волнового фронта обладают недостатками: основанные на принципах геометрической оптики датчики Шака — Гартмана обладают невысоким пространственным разрешением, а интерференционные методы требуют сложной оптической схемы и качественной виброизоляции.

Целью работы является исследование вычислительного дифракционного метода, базирующегося на методе WISH [7], лишенного указанных недостатков.

Схема установки

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В качестве источника излучения использован неодимовый лазер Cobolt Samba 200 ($\lambda = 532$ нм). Также использовался расширитель пучка, жидкокристаллический фазовый ПВМС HOLOEYE PLUTO-2 VIS-036 CS2100 и КМОП камера Thorlabs Kiralux LP126MU/M.

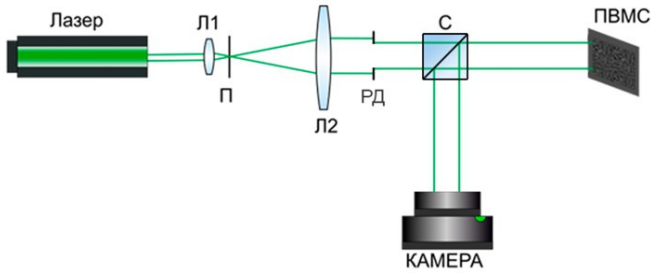


Рис. 1. Схема оптической установки

Дифракционные картины обрабатывались модифицированным алгоритмом Герчберга — Сэкстона с ограничением в плоскости детектора. В рамках каждой итерации алгоритма осуществлялось прямое интегральное оптическое преобразование, замена модуля рассчитанного поля на измеренный, обратное оптическое преобразование.

Восстановление «скрытого» изображения

С помощью экспериментальной установки проведено измерение картин дифракции лазерного излучения на фазовых масках, представляющих собой некоррелированные случайные распределения в диапазоне $[0; \pi]$, к которым добавлен фазовый набег в виде некоторого изображения. Общая глубина модуляции составила $[0; 2\pi)$.

Путем сравнения результатов восстановления «скрытого» изображения с помощью среднеквадратичного отклонения восстановленного значения фазы от эталонного, для разных фазовых масок определено, что для расстояния 7 см между камерой и ПВМС оптимальный размер субпикселя маски равен 2×2 пикселям модулятора.

Улучшение качества голографической реконструкции

Для демонстрации метода компенсации фазовых искажений в оптическую схему введена контролируемая дефокусировка. Итерационно восстановлена информации об амплитуде и фазе поля в плоскости ПВМС, рассчитанный волновой фронт представлен на рис. 2.

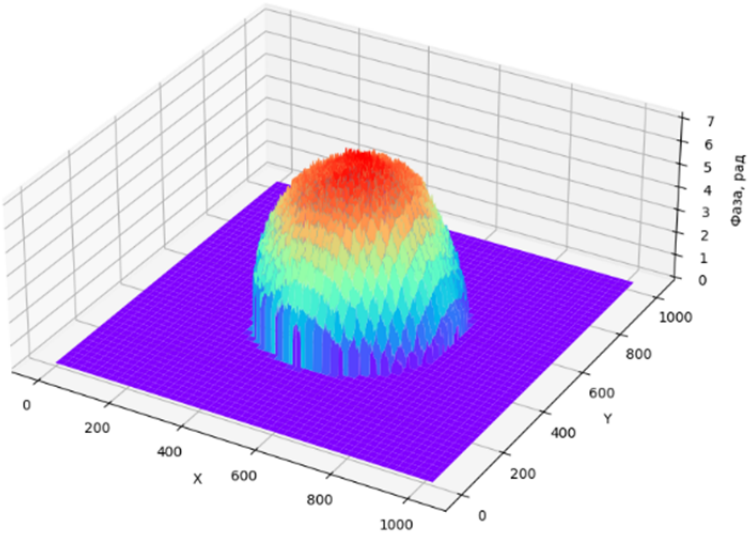
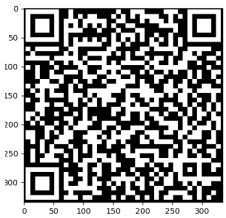
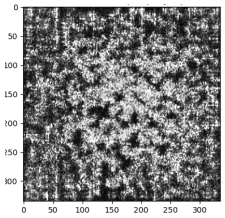
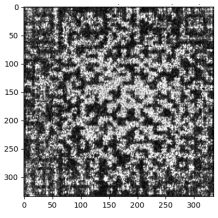


Рис. 2. Рассчитанный волновой фронт

К голограмме QR-кода добавлена корректирующая фазовая маска, компенсирующая рассчитанный сферический волновой фронт. Сравнение восстановленных изображений с использованием метрик SSIM и кросс-корреляции приведено в таблице.

Сравнение восстановленных с голограммы изображений

	Эталонное изображение	**Восстановленное изображение**	**Восстановленное изображение с корр. маской**
			
SSIM	1	0,4091	0,5648
Кросс-корреляция	1	0,4337	0,5693

Улучшение качества реконструкции составило 15,6 % и 13,5 %, согласно метрикам SSIM и кросс-корреляции.

Заключение

В рамках исследований получены оптимальные значения пространственной частоты фазовых масок для оптической схемы. Проведено улучшение качества голографической реконструкции на 15,6 %, согласно метрике SSIM. Полученные результаты демонстрируют эффективность метода для компенсации фазовых искажений в голографических системах.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

Список источников

[1] *Shu-Feng Lin et al.* Single SLM full-color holographic 3-D display based on sampling and selective frequency-filtering methods // Opt. Express. 2017. № 25. P. 11389–11404.

[2] *Armitage D. et al.* Introduction to Microdisplays. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 2006.

[3] *Evtikhiev N.N. et al.* Model of an invariant correlator with liquid-crystal spatial light modulators // Kvantovaya Elektronika. 2012. № 42 (11). Art. no. 1039.

[4] *Manzur T. et al.* Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking // Applied Optics. 2012. № 51. P. 4976–4983.

[5] *Monjur M.S. et al.* Hybrid optoelectronic correlator architecture for shift-invariant target recognition // J. Opt. Soc. Am. 2014. № 31. P. 41–47.

[6] *Cheremkhin P.A. et al.* QR code optical encryption using spatially incoherent illumination // Laser Phys. Let. 2017. № 14 (2), Art. no. 026202.

[7] *Wu Y. et al.* WISH: wavefront imaging sensor with high resolution // Light: Science & Applications. 2019. № 8. Art. no. 44.

Computational diffraction method for recording and compensating phase distortions in coherent optical systems

Z.S. Markov, T.Z. Minikhanov, E.Y. Zlokazov

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The report presents the results of an experimental study of a computational diffraction wavefront detection method based on the Gerchberg-Saxton algorithm using random phase masks for the task of phase distortion compensation in coherent optical systems. The phase visualization method has been tested using the example of a wavefront spatially modulated by a hidden image; an experiment to improve the quality of holographic reconstruction by measuring and registering a controlled spherical wavefront has been described. The results obtained demonstrate the prospects of the proposed approach for increasing the resolution and stability of holographic systems.

Keywords: *optics, holography, wavefront measurement, aberration compensation*

Метод подавления интерференционных замираний в волоконно-оптических когерентных фазочувствительных рефлектометрах

Р.И. Хан[1, 2], Т.З. Миниханов[1, 3], Г.Б. Сидельников[1], Т.В. Гриценко[2], А.Б. Пнев[2]

[1] *Акционерное общество Научно-производственный центр «ЭЛВИС», Москва, Россия*
[2] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*
[3] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

В работе предложен метод подавления интерференционных замираний в φ–OTDR с когерентным детектированием, основанный на полифазном сложении выровненных комплексных отсчетов когерентного рассеяния. Экспериментально продемонстрировано полное устранение замираний вдоль 40 км распределенного чувствительного элемента макета φ–OTDR.

Ключевые слова: *волоконно-оптическая сенсорика, когерентная фазочувствительная рефлектометрия, когерентное рэлеевское рассеяние*

Введение

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных направлений волоконно-оптической сенсорики является когерентная фазочувствительная рефлектометрия (φ–OTDR). φ–OTDR применяются для решения задач охраны периметров, обнаружения утечек трубопроводов, контроля состояния инженерных конструкций и мониторинга трафика вдоль транспортной инфраструктуры.

Одно из ключевых ограничений когерентных φ–OTDR — это естественное образование зон нечувствительности (замирания) в рефлектограммах вследствие преобразования состояния поляризации и деструктивной интерференции рассеянного излучения.

Замирания приводят к появлению пространственных отсчетов с низким отношением сигнал/шум (ОСШ) и интенсивными фазовыми отклонениями, более $\pi/2$ при ОСШ менее 1 по I или Q компоненте.

Поляризационные замирания могут быть подавлены посредством метода поляризационного разделения (PDM), тогда как интерференционные замирания устраняются с использованием метода частотного разделения (FDM). Для эффективного подавления замираний применяется объединение либо фаз [1], либо комплексных амплитуд [2] сигналов, предварительно разделенных в спектральном и поляризационном доменах.

В данной работе предлагается метод подавления интерференционных замираний, основанный на полифазном сложении выровненных комплексных отсчетов когерентного рассеяния, позволяющий полностью устранять замирания вдоль 40 км распределенного чувствительного элемента (РЧЭ). Данный подход не требует введения дополнительных зондирующих частот (FDM) и аппаратного усложнения системы.

Метод подавления замираний

Частота замираний напрямую зависит от уровня ОСШ. В когерентных φ-OTDR доминирующим шумом является гетеродин-спонтанный фототок, индуцируемый усиленным спонтанным излучением (УСИ) волоконного эрбиевого предусилителя (ВЭПУ). Применение ВЭПУ, несмотря на рост сигнального уровня, существенно снижает ОСШ рефлектограммы. Гетеродин-спонтанный шум возникает в результате интерференции УСИ и опорного сигнала, поэтому его нельзя эффективно подавить оптическими фильтрами [3].

Исключение ВЭПУ из приемного тракта переносит шумовой предел на уровень фотоприемного устройства (ФПУ), что повышает ОСШ и снижает долю замираний РЧЭ. Поляризационные замирания подавляются методом PDM, а остаточные интерференционные — полифазным суммированием выровненных отсчетов, при котором сигнал выравнивается методом, предложенным в [2], разбивается на M фаз и далее складываются соответствующие первые, вторые и т. д., M-е выборки.

Экспериментальное исследование

Рассмотрим структурную схему экспериментального стенда, представленную на рис. 1.

В качестве источника излучения использовался одночастотный лазер NKT Photonics Koheras BASIK X15 (30 мВт CW). Оптическим разветвителем OP1 отводилось 10 % выходной мощности для гетеродинирования. Зондирующий импульс длительностью $\tau = 100$ нс формировался акустооптическим модулятором со сдвигом частоты 120 МГц и поступал в РЧЭ длиной 40 км. Для предот-

вращения непрерывной засветки РЧЭ УСИ волоконного эрбиевого усилителя (ВЭУ) АОМ устанавливался после ВЭУ. Рассеянное поле поляризационным разветвителем ПР разделялось на две ортогональные компоненты, каждая из которых интерферировала с гетеродином в ОР3 и ОР4 с максимальным контрастом. Интерференционный сигнал регистрировался двумя балансными фотоприемниками (БФПУ1 и БФПУ2) и оцифровывался осциллографом с частотой дискретизации $\nu_d = 500$ МГц. В цифровой обработке выполнялась квадратурная демодуляция, в результате которой формировался комплексный аналитический сигнал с I и Q компонентами.

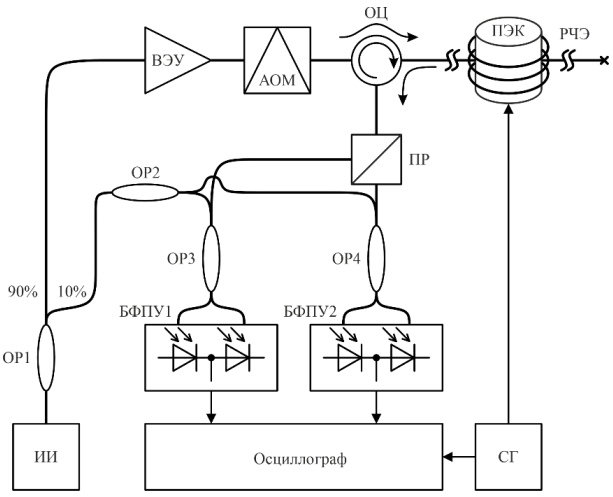
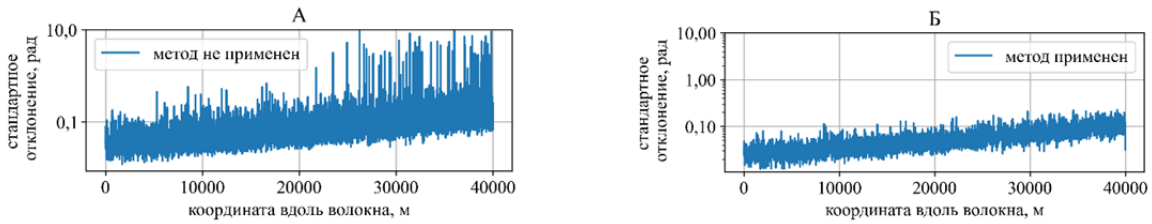


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда когерентного фазочувствительного рефлектометра

Ширина спектра зондирующего сигнала определяется обратной величиной длительности импульса, $\Delta\nu_{sig} = 1/\tau = 10$ МГц, тогда как ширина первой зоны Найквиста задается $\nu_n = \frac{\nu_d}{2} = 250$ МГц. Поскольку $\nu_n \gg \Delta\nu_{sig}$, то возникает запас дискретизации, позволяющий применить полифазную децимацию до 25 раз.

Применим полифазное сложение к предварительно выровненным отсчетам [2]. На рис. 2 показаны пространственные распределения стандартных отклонений фазы при объединении двух поляризационных каналов (рис. 2, А) и с дополнительно примененным методом (рис. 2, Б).

При объединении предварительно выровненных отсчетов ортогональных поляризаций в сигнале наблюдается 0,1% выбросов фазы с отклонением более $\pi/2$ вызванных остаточными интерференционными замираниями, устраняемыми полностью полифазным сложением.



А) Б)

Рис. 2. Стандартное отклонение отчетов рефлектограмм без применения полифазного сложения (А) и с применением полифазного сложения (Б)

Заключение

В работе предложен и продемонстрирован метод подавления остаточных интерференционных замираний, позволяющий полностью устранить зоны нечувствительности вдоль 40 км РЧЭ, не требующий усложнения аппаратной реализации.

Список источников

[1] *Tong S. et al.* A Fading Suppression Method for Φ-OTDR Systems Based on Multi-Domain Multiplexing // Sensors. 2025. Vol. 25. № 8. Art. no. 2629.

[2] *Wakisaka Y. et al.* Fading suppression of Φ-OTDR with the new signal processing methodology of complex vectors across time and frequency domains // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. № 13. P. 4279–4293.

[3] *Vidal-Moreno P.J. et al.* Noise analysis in direct detection and coherent detection phase-sensitive optical time-domain reflectometry systems // Optics express. 2023. Vol. 31. № 17. P. 27450–27461.

Interference fading suppression method in coherent phase-sensitive reflectometry

R.I. Khan[1, 2], T.Z. Minikhanov[1, 3], G.B. Sidelnikov[1], T.V. Gritsenko[2], A.B. Pnev[2]

[1] *Joint Stock Company Scientific and Production Center "ELVIS", Moscow, Russia*
[2] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*
[3] *National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

In this work, we propose a method to suppress interference fading in φ-OTDR with coherent detection by performing a polyphase summation of phase-aligned complex samples of coherent Rayleigh scattering. Experimental results demonstrate that this approach eliminates fading along a 40 km sensing fiber.

Keywords: *fiber-optic sensing, coherent phase-sensitive reflectometry, coherent Rayleigh scattering*

Формирование голографических изображений в системах дополненной реальности на основе голограммного перископа

Т.А. Гататдинов, Е.Ю. Злоказов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе исследовался процесс формирования изображений компьютерно-синтезированными голограммами в когерентной оптической системе на основе фазового пространственно-временного модулятора света и голографического волноводного перископа. Были проведены эксперименты по оптическому восстановлению контурных и сплошных изображений с фазовых голограмм Френеля, также были проведены эксперименты по восстановлению 3D-сцен. Рассмотрены различные методы вывода голограмм на пространственно-временной модулятор света (ПВМС) и различные конфигурации оптической схемы: мультиплексный вывод голограмм, использование деспеклера, расположение плоскости голографического перископа под углом к плоскости ПВМС, а также их комбинация.

Ключевые слова: *волноводная голография, фазовые голограммы, компьютерный синтез, голограммы Френеля*

В современном мире дисплеи дополненной реальности (Augmented Reality, AR) привлекают к себе все больше внимания. Особый интерес в качестве основы для разработки таких дисплеев представляют голографические волноводные перископы [1].

В работе проводилось формирование изображений в голограммном волноводе компьютерно-синтезированными голограммами Френеля, синтезированными алгоритмом Герчберга-Сэкстона [2]. Голограммы выводились на фазовый жидкокристаллический отражательный пространственно-временной модулятор света (ЖК ПВМС). Волновод был расположен под углом порядка 30° к плоскости ПВМС.

Для оценки изображений при различных режимах восстановления использовались нормальное среднеквадратичное отклонение (НСКО), взаимная корреляция (КК) и пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ).

На рис. 1 представлена схема разработанной оптической системы восстановления изображений.

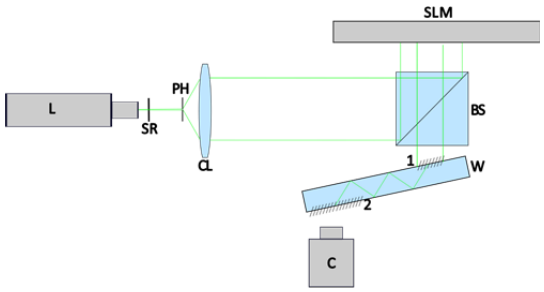
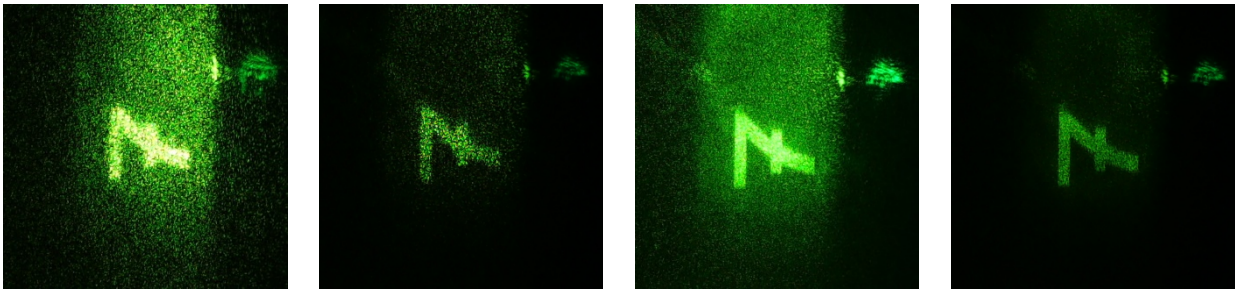


Рис. 1. Схема экспериментальной оптической системы: L — лазер, SR — деспеклер, PH — пин-холл, CL — коллимирующая линза, BS — светоделительный куб, W — волновод (периоды решеток 1 и 2 равны), C – камера

На рис. 2 представлены изображения, восстановленные при различных конфигурациях оптической системы: использование деспеклера (вращающегося матового рассеивателя), мультиплексный (последовательный) вывод голограмм с различными фазовыми масками на ПВМС и их комбинация.



а) б) в) г)

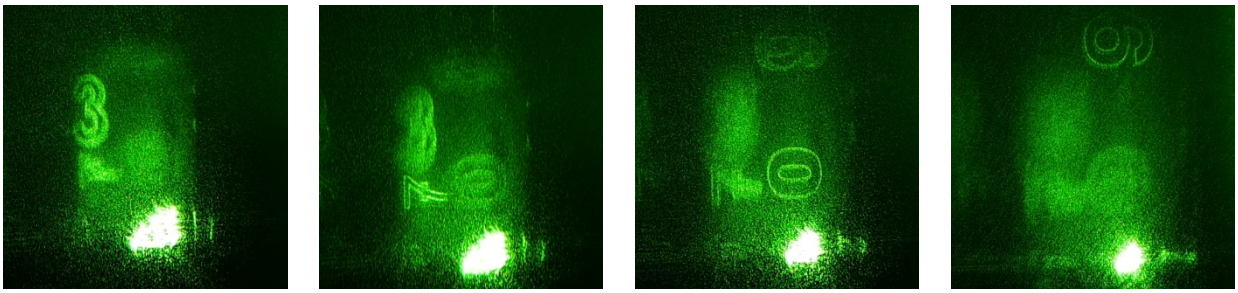
Рис. 2. Восстановленные изображения при различных конфигурациях системы: а) без модификаций, б) использование деспеклера, в) мультиплексный вывод голограмм, г) комбинация деспеклера и мультиплексного вывода голограмм

В табл. 1 представлены рассчитанные значения НСКО, взаимной корреляции и ПОСШ для сплошных изображений при различных конфигурациях оптической системы.

Таблица 1. Значения рассчитанных метрик при различных конфигурациях системы

Конфигурация	НСКО	КК	ПОСШ, Дб
Без модификаций	0,67	0,66	8,00
Использование деспеклера	0,67	0,65	8,81
Мультиплексный вывод голограмм	0,68	0,84	8,85
Комбинация деспеклера и мультиплексного вывода голограмм	0,69	0,83	11,02

На рис. 3 представлены 3D-сцены с четырьмя плоскостями, содержащими цифры числа «3709». При восстановлении использовались деспеклер и мультиплексный вывод голограмм.



а) б) в) г)

Рис. 3. Восстановленные изображения, расположенные в различных плоскостях:
а) 20 см, б) 40 см, в) 60 см, г) 100 см

В табл. 2 представлены значения рассчитанных метрик для изображений в каждой плоскости.

Таблица 2. Значения рассчитанных метрик для изображений, расположенных в различных плоскостях

Расстояние между голограммой и изображением	НСКО	КК	ПОСШ, Дб
20 см	0,87	0,28	10,80
40 см	0,64	0,49	11,73
60 см	0,22	0,38	11,47
100 см	0,78	0,45	12,07

При расположении волновода под углом к плоскости ПВМС удалось частично подавить нулевой порядок дифракции. При последовательном выводе на ПВМС голограмм с различными фазовыми масками [3] изображения восстанавливаются со сглаженными контурами. Применение деспеклера снижает фоновый шум. При восстановлении 3D-сцен фоновые шумы не удается подавить применением деспеклера.

Таким образом, в ходе работы были получены голографические изображения плоских и 3D-сцен с четырьмя объектными плоскостями. Для подавления спекл-шумов рассмотрены применение деспеклера и мультиплексный вывод голограмм на ПВМС.

Благодарность

Коллективу лаборатории «Голографии и волноводной оптики» МГТУ им. Н.Э. Баумана за предоставленные образцы.
Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340-П.

Список источников

[1] *Solomashenko A. et al.* Image Quality for Near-Eye Display Based on Holographic Waveguides // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Art. no. 11136. https://doi.org/ 10.3390/app122111136

[2] *Gerchberg W.O. et al.* A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures // Optik. 1972. Vol. 35. Iss. 2. P. 237–246.

[3] *Shimobada T. et al.* Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction // Optics Express. 2013. Vol. 21. № 21. P. 25285–25290.

Formation of holographic images in augmented reality systems based on a hologram periscope

T.A. Gatatdinov, E.Yu. Zlokazov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

The work investigated the process of image formation by computer-generated holograms in a coherent optical system based on a phase spatial light modulator and a holographic waveguide periscope. Experiments were conducted on optical reconstruction of contour and solid images from Fresnel phase holograms, as well as experiments on restoration of 3D scenes. Various methods of hologram output to a spatial light modulator (SLM) and various configurations of the optical circuit are considered: multiplex output of holograms, the use of a speckle reducer, the location of the holographic periscope plane at an angle to the SLM plane, as well as their combination.

Keywords: *waveguide holography, phase holograms, computer generating, Fresnel holograms*

Секция 13
Новые прикладные оптические технологии

Экспериментальные исследования погрешности стабилизации линии визирования оптико-электронных систем наблюдения

Г.Н. Маркушин[1], В.В Коротаев[2], М.А. Чехов[1], А.Н. Чиванов[1], В.А. Рыжова[2]

[1] *АО ПО «УОМЗ « г. Екатеринбург, Россия*
[2] *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

Целью работы является исследование возможности снижения погрешности стабилизации линии визирования в сканирующих оптико-электронных системах наблюдения. Методы исследования: компьютерное моделирование системы управления стабилизацией и экспериментальные исследования погрешности стабилизации линии визирования. Показана возможность стабилизации линии визирования по азимуту и углу места с погрешностью не более 5 угл. сек. при воздействии механических линейных вибраций в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц и угловых колебаний в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц.

Ключевые слова: *оптико-электронная система наблюдения, линия визирования, погрешность стабилизации, стенд синусоидальных колебаний, методика оценки погрешности.*

Введение

Сканирующие оптико-электронные системы наблюдения (ОЭСН) широко используются в составе автоматизированных комплексов для экологического мониторинга, проведения спасательных операций, выявления транспортных правонарушений [1–3]. В реальных условиях эксплуатации ОЭСН подвергаются воздействию широкополосной случайной вибрации в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц при спектральной плотности виброускорения до 0,01 g^2/Гц и угловым колебаниям носителя в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц при амплитуде колебаний от 20° до 1° в зависимости от частоты [4]. Целью настоящей работы является уменьшение погрешности стабилизации линии визирования ОЭСН.

Стенд для исследования погрешностей стабилизации

Разработан стенд, который обеспечивает имитацию синусоидальных колебаний на платформу системы стабилизации линии визирования оптических каналов оптико-электронных систем наблюдения [4]. Стенд обеспечивает возможность задания режимов угловых синусоидальных колебаний при фактических угловых колебаниях носителя в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц.

На базе известных вибростендов, позволяющих задавать случайные широкополосные вибрации, также создан стенд для исследования влияния таких вибраций на системы стабилизации линии визирования ОЭСН.

Разработан и изготовлен высокоточный измерительный стенд для исследования, испытания и калибровки систем стабилизации линии визирования ОЭСН различного назначения.

Разработана методика [4] экспериментальной оценки погрешности стабилизации линии визирования ОЭСН и проверки систем стабилизации с использованием разработанных стендов [4].

Исследования погрешностей систем стабилизации

На разработанных и изготовленных стендах проведены экспериментальные исследования ОЭСН с двухосевой системой стабилизации платформы с визирными каналами с двойным кардановым подвесом с угломестным и азимутальным приводами подслеживания.

Результаты эксперимента показали, что при изменении частоты угловых колебаний по оси Z в диапазоне от 0,1 до 0,2 Гц с амплитудой 20°, амплитуда погрешности стабилизации не изменяется и составляет 12 угл. сек., а ее СКО составляет 8,5 угл. сек.

По разработанной методике исследовалось также воздействие случайных широкополосных вибраций на рассмотренную ОЭСН с системой стабилизации, при ее установке на вибростенд ВЭДС 1500МК ПО «Виброприбор». Среднее квадратическое ускорение вибраций задавалось на уровне 2g. Уровни воздействия вибраций задавались в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц.

Экспериментальные исследования в этом случае показали, что максимальная погрешность стабилизации линии визирования регистрируется по оси Z при воздействии случайной широкополосной вибрации по оси Y. При этом СКО погрешности стабилизации не превышает 15 угл. сек.

Разработана система стабилизации платформы с визирными каналами на сферическом подшипнике с гиростабилизированным угломестным и азимутальным приводами подслеживания, экспериментальные исследования которой показали, что при фактических воздействиях угловых колебаниях в диапазоне частот до 5 Гц и вибрационных воздействиях в диапазоне частот до 2000 Гц, значения погрешности стабилизации не превышают 3-5 угл. секунд.

Заключение

Экспериментальные исследования погрешности стабилизации линии визирования ОЭСН с визирными каналами на сферическом подшипнике с гиростабилизированным угломестным и азимутальным приводами подслеживания показали реализуемость стабилизации линии визирования с погрешностью, не превышающей 5 угл. секунд.

Список источников

[1] *Yun-Han Chang, Shang-Yen Tsai, Chi-Wai Chow, Chih-Chun Wang, Deng-Cheng Tsai, Yang Liu, Chien-Hung Yeh.* Unmanned-aerial-vehicle based optical camera communication system using light-diffusing fiber and rolling-shutter image-sensor // Optics Express. 2023. Vol. 31, Iss. 11. P. 18670–18679. https://doi.org/10.1364/OE.492547

[2] *Буслов И.А., Гордеев А.Е., Доррер Г.А., Кобыжакова С.В., Яровой С.В.* Система управления борьбой с природными пожарами на базе беспилотных летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2–3. С. 858–863.

[3] *Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Кошелев А.В., Самохина И.А., Васильев А.С., Тимофеев А.Н., Васильева А.В., Ярышев С.Н.* Двухдиапазонные оптико-электронные системы обнаружения субъектов браконьерского промысла // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 36–48. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-36-48

[4] *Маркушин Г.Н., Чехов М.А. Чиванов А.Н., Симановский М.М., Коротаев В.В., Рыжова В.А.* Стенд и методика исследования погрешностей стабилизации линии визирования в сканирующих оптико-электронных системах наблюдения // Оптический журнал. 2025. Т. 92. № 2. С. 76–86. http://doi.org/10.17586/1023-5086-2025-92-02-76-86

Experimental studies of the stabilization error of the line of sight of optical-electronic surveillance systems

G.N. Markushin[1], M.A. Chekhov[1], A.N. Chivanov[1], V.V. Korotaev[2], V.A. Ryzhova [2]

1 Ural Optical and Mechanical Plant named after Mr. E.S. Yalamov, Ekaterinburg, Russia
2 ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The aim of the work is to study the possibility of reducing the stabilization error of the line of sight in scanning optical-electronic surveillance systems. Research methods: computer modeling of the stabilization control system and experimental studies of the stabilization error of the line of sight. The possibility of stabilizing the line of sight in azimuth and elevation with an error of no more than 5 arcsec under the influence of mechanical linear vibrations in the frequency range from 1 to 2000 Hz and angular oscillations in the frequency range from 0.1 to 5 Hz is shown.

Keywords: *optical-electronic observation system, line of sight, stabilization error, sinusoidal oscillation stand, error assessment method*

Рефрактометры с температурной компенсацией на основе межмодовых волоконно-оптических интерферометров

А.А. Маркварт, Л.Д. Завалишина, А.Э. Зарипов, Л.Б. Лиокумович, Н.А. Ушаков

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

В работе рассмотрены межмодовые интерферометры на основе составных волоконно-оптических SMS-структур, от англ. singlemode-multimode-singlemode, и их применение в качестве измерителей показателя преломления внешней среды. Приведена методика расчета спектральных характеристик интерферометров и их отклика на изменение показателя преломления и температуры внешней среды. Предложен подход учета влияния температуры на результаты измерения показателя преломления внешней среды, заключающийся в анализе откликов различных интерференционных компонент, соответствующих различным парам волоконных мод, при помощи преобразования Фурье. Проведены экспериментальные исследования интерферометров, погруженных в водные растворы глицерина разных концентраций. Продемонстрирована возможность одновременного измерения концентрации глицерина в растворе и температуры раствора. Рассмотрены особенности применения дискретного преобразования Фурье и проанализированы погрешности измерений.

Ключевые слова: *межмодовый волоконный интерферометр, SMS, показатель преломления, спектральная интерферометрия, преобразование Фурье*

Измерение показателя преломления внешней среды является важной задачей, имеющей широкое применение, начиная от нефтегазовой промышленности и заканчивая медициной. Волоконно-оптические датчики показателя преломления являются особенно привлекательным типом датчиков благодаря их высокой точности, компактным размерам, долговечности, гибкости, биосовместимости, электровзрывобезопасности, устойчивости к электромагнитным помехам, устойчивости к химической коррозии и радиации. Наиболее простым способом измерить показатель преломления является измерение коэффициента отражения на границе торца оптоволоконного зонда и внешней среды [1, 2]. Более чувствительными являются датчики на основе поверхностного плазмонного резонанса [3–5] и интерференционные датчики, такие как интерферометры Фабри — Перо [6] и межмодовые интерферометры [7–19]. Методы опроса таких датчиков заключаются в измерении спектра отражения или пропускания зависимости коэффициента прохождения оптического излучения через оптоволоконный датчик (или отражения) от длины волны. Эту зависимость для простоты будем называть спектральной характеристикой датчика (СХ). Изменение показателя преломления внешней среды приводит к изменению СХ. В частности, в случае датчика на поверхностном плазмонном резонансе смещается длина волны резонанса, а в случае интерферометров Фабри — Перо и межмодовых интерферометров изменяются разности фаз интерферирующих волн, вследствие чего изменяются частоты и начальные фазы квазигармонических компонент СХ. Типичные значения размещающей способности волоконно-оптических рефрактометров составляет от 10^{-4} до 10^{-9} RIU — от англ. “refractive index unit”.

Среди перечисленных датчиков показателя преломления наиболее простым в изготовлении, является датчик на основе межмодового интерферометра с одномодовым подключением. Эти интерферометры формируются путем сварки подводящих одномодовых оптических волокон с одной или несколькими секциями оптических волокон разных типов и/или в разных геометрических конфигурациях [7–19]. Примерами таких оптоволоконных структур являются SNS-структура (singlemode-no core-single mode) [9–11]. SMSMS-структура (singlemode-multimode-singlemode-multimode-singlemode) [12–14]. и аналогичная ей STSTS-структура (singlemode-thin core-singlemode- thin core-singlemode) [15], структура из подводящего одномодового волокна, приваренной одномодовой секции со сдвигом и второго подводящего одномодового волокна [16, 17] и др. Такие структуры имеют два подводящих одномодовых волокна, и их спектральная характеристика измеряется «на проход». За счет зеркальной симметрии могут быть изготовлены аналогичные по свойствам структуры с зеркалом, одним подводящим одномодовым волокном и измерением спектральной характеристики «на отражение» [17, 18]. При этом вдвое уменьшается длина чувствительной секции. Схемы таких интерферометров представлены на рис. 1.

Повторимся, что принцип измерения параметров внешней среды выше перечисленными интерферометрами заключается в том, что фазовый набег возбуждаемых в чувствительной секции интерферометра мод зависит от показателя преломления внешней среды. В структуре SNS такими модами являются моды бессердцевинного волокна, а в SMSMS и STSTS структурах — оболочечные моды стандартного одномодового волокна в центральной секции, возбуждаемые за счет коротких (несколько десятков микрон) вставок. При этом типичная длина чувствительной секции составляет

от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров. Таким образом, спектральная характеристика интерферометра зависит от показателя преломления внешней среды. При ее измерении в относительно небольшом спектральном окне она имеет полигармонический характер и состоит из суммы косинусоидальных компонент (в случае SNS-структуры — строго, в случае SMSMS-структуры — приближенно при достаточно короткой длине многомодовых вставок). Аргументом каждого косинуса является разность фаз пары мод, которая почти линейно зависит от длины волны. Количество косинусов в сумме равно количеству попарных комбинаций мод, распространяющихся в чувствительном многомодовом волокне. При изменении показателя преломления внешней среды или температуры изменяются разности фаз пар мод, что приводит к изменению частот и начальных фаз квазигармонических компонент СХ.

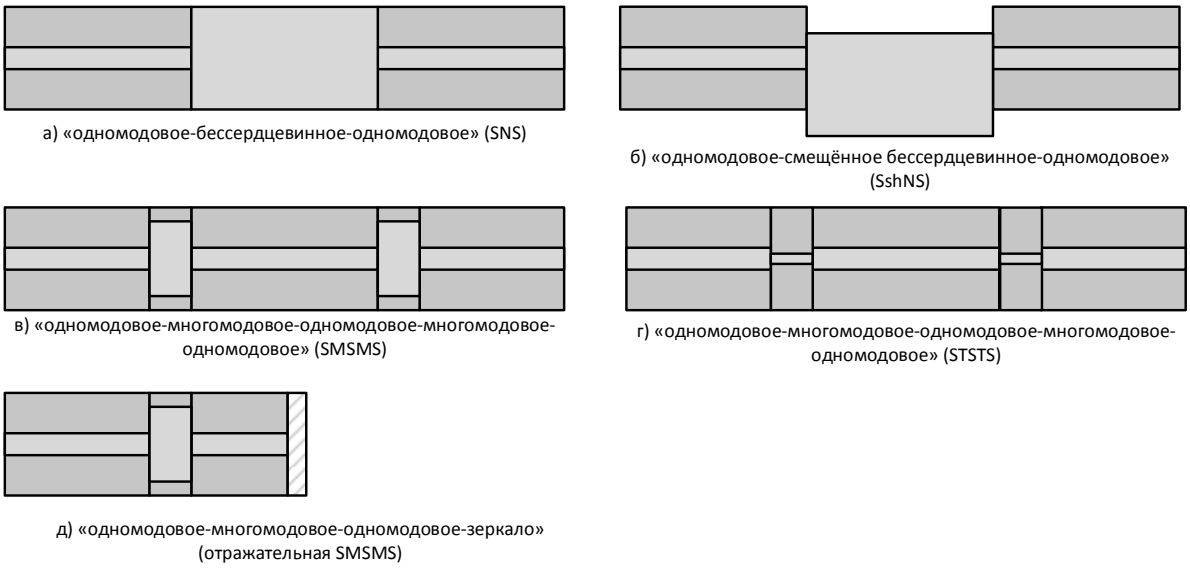


Рис. 1. Схемы межмодовых интерферометров

Известной проблемой, связанной с датчиками показателя преломления, является влияние изменений температуры на результаты измерений показателя преломления. Обычно это решается добавлением второго датчика. В нашей работе мы предложили новый подход для одновременного измерения преломления и температуры с использованием одного датчика на основе межмодового интерферометра. Этот подход основан на анализе сигналов интерференции от нескольких пар мод. Дело в том, что разности фаз пар мод у разных пар по-разному зависят от изменения показателя преломления внешней среды и похожим образом зависят от изменения температуры. Это определяет возможность одновременного измерения температуры и показателя преломления внешней среды, что также может быть интерпретировано как проведение температурной компенсации при измерении показателя преломления внешней среды.

Мы провели расчет нескольких межмодовых интерферометров на основе осесимметричных структур: SNS, SMSMS, STSTS, погруженных в водные растворы глицерина разных концентраций при постоянной температуре, и погруженных в воду при разной температуре. При этом использовались следующие волокна: S — стандартное одномодовое волокно с диаметром сердцевины 8,2 мкм SMF-28, N — бессердцевинное волокно Thorlabs FG125LA, M — градиентное многомодовое волокно Thorlabs GIF625 с диаметром сердцевины 62,5 мкм, T — одномодовое волокно в видимом диапазоне длин волн SM600 с диаметром сердцевины 4,6 мкм. Геометрические параметры были выбраны следующими: Длины чувствительных частей всех интерферометров — 27 см, длины вставок в структурах SMSMS и STSTS — 50 мкм. Диапазон длин волн: 1510–1590 нм.

В расчете и последующем эксперименте были получены схожие чувствительности фаз интерференционных компонент к температуре воды и различные чувствительности к изменению концентрации глицерина в водном растворе, что подтвердило возможность проведения одновременного измерения показателя преломления внешней среды (или концентрации глицерина в растворе) и температуры. Например, для SMSMS-структуры были получены следующие результаты для диапазона изменения показателя преломления от 1,32 до 1,36 (концентрации глицерина от 0 до 40 %) и для диапазона изменения температуры от 10 до 80 ^{o}C. На рис. 2 представлены полученные численно и экспериментально СХ для SMSMS-структуры, а также модули преобразования Фурье от

них. В численном моделировании были получены чувствительности фаз интерференционных компонент от 10 до 2000 рад/RIU (от 0,01 до 2,9 рад/%) к изменению показателя преломления (концентрации глицерина в растворе) и порядка 0,07 рад/°C к температуре. В эксперименте были получены чувствительности от 56 до 376 рад/RIU (от 0,07 до 0,48 рад/%) к изменению показателя преломления (концентрации глицерина в растворе) и порядка 0,15 рад/°C к температуре. Среднеквадратичные отклонения одновременного определения температуры и показателя преломления (концентрации глицерина) в эксперименте составили 10^{-4} RIU (0,074 %) и 0,148 ˚C соответственно. Расхождение в результатах расчета и эксперимента возможно объясняется не идеальностью изготовления SMSMS-структуры, в связи с чем возбуждались неосесимметричные моды, неучтенные в численном моделировании, что хорошо видно по несоответствию модулей Фурье-образов. Тем не менее, чувствительности интерференционных компонент оказались схожими по порядку величины.

Таким образом, нами численно и экспериментально был апробирован подход разработки рефрактометров с температурной компенсацией на основе межмодовых волоконных интерферометров. Результаты работы могут быть использованы при разработке и дальнейшей оптимизации таких устройств. Более подробное изложение полученных в работе результатов будет представлено в виде статьи в научном журнале, подготовленной по мотивам данного доклада.

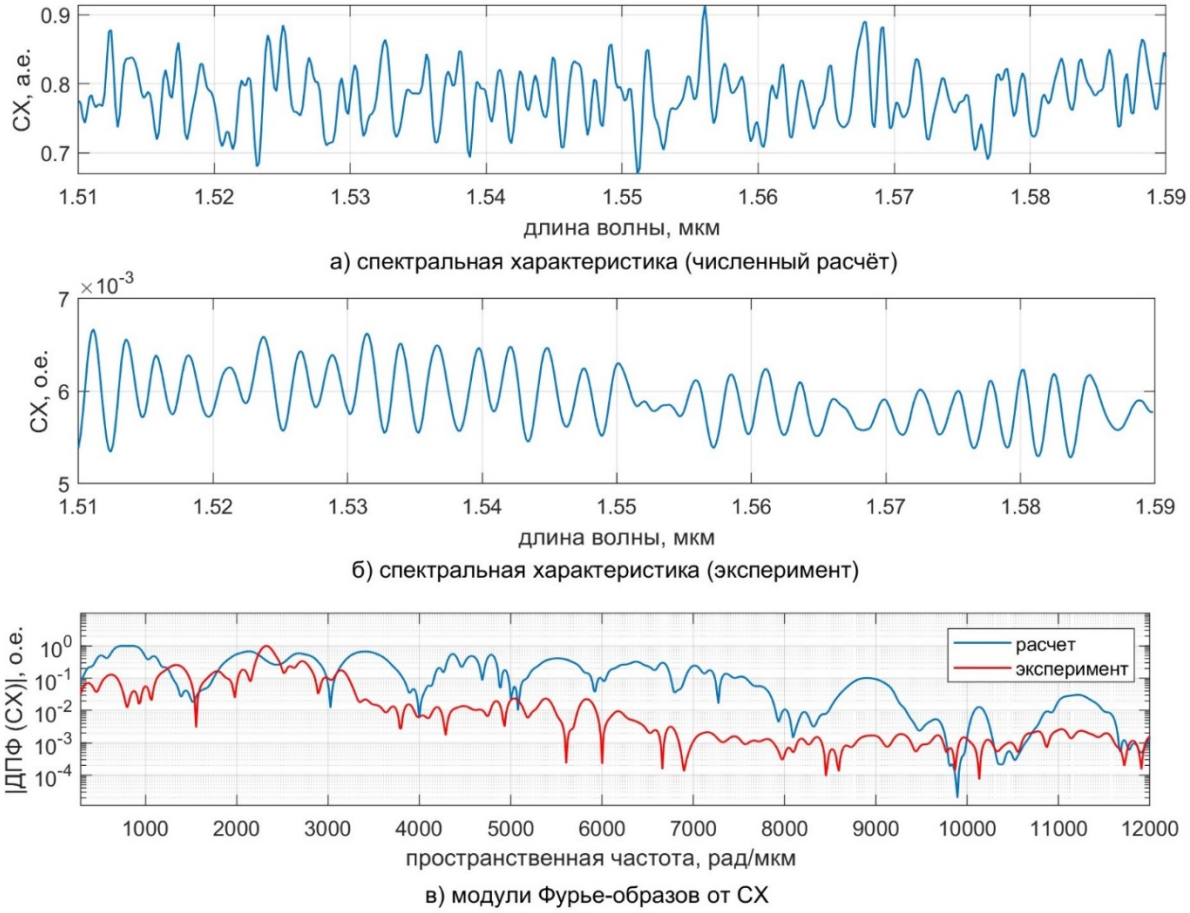


Рис. 2. Результаты расчета и эксперимента с SMSMS-структурой

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-10095.

Список источников

[1] *Xu W. et al.* Simple Fiber-Optic Refractive Index Sensor Based On Fresnel Reflection and Optical Switch // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13. № 5. P. 1571–1574.

[2] *Brientin A. et al.* Numerical and experimental study of a multimode optical fiber sensor based on Fresnel reflection at the fiber tip for refractive index measurement // Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 143. Art. no. 107315.

[3] *Гущин М.Г. и др.* Создание и определение чувствительности волоконно-оптического рефрактометра на основе поверхностного плазмонного резонанса // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 9. С. 1212–1216.

[4] *Казанский Н.Л. и др.* Достижения в разработке плазмонных волноводных датчиков для измерения показателя преломления // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44. № 3. С. 295–318.

[5] *Мамичев Д.А. и др.* Оптические сенсоры на основе поверхностного плазмонного резонанса для высокочувствительного биохимического анализа // Молекулярная медицина. 2012. № 6. С. 19–27.

[6] *Pevec S. et al.* Miniature fiber-optic Fabry-Perot refractive index sensor for gas sensing with a resolution of 5x10-9 RIU // Opt. Express. 2018. Vol. 26. № 18. P. 23868–23882.

[7] *Wang K. et al.* Multimode optical fiber sensors: from conventional to machine learning-assisted // Measurement Science and Technology. 2024. Vol. 35. № 2.

[8] *Chapalo I. et al.* Advances in Optical Fiber Speckle Sensing: A Comprehensive Review // Photonics. 2024. Vol. 11. № 4.

[9] *Mar-Abundis N. et al.* Sugar Detection in Aqueous Solution Using an SMS Fiber Device // Sensors. 2023. Vol. 23. № 14.

[10] *Li Y. et al.* Multimode interference refractive index sensor based on coreless fiber // Photonic Sensors. 2014. Vol. 4. № 1. P. 21–27.

[11] *Khanikar T. et al.* Multimode interference-based fiber optic sensors using single mode/no-core/single mode (SNS) configuration // Optical Waveguide and Laser Sensors III. SPIE, 2024. Vol. 13044. Art. no. 130440P.

[12] *Ma Y. et al.* Mach – Zehnder Interferometer Based on a Sandwich Fiber Structure for Refractive Index Measurement // IEEE Sensors Journal. 2012. Vol. 12. № 6. P. 2081–2085.

[13] *Xiong R. et al.* Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on Modal Interference // IEEE Sensors Journal. 2014. Vol. 14. № 8. P. 2524–2528.

[14] *Wo J. et al.* A compact all fiber refractive index sensor based on modal interference // Sensors. IEEE, 2012. P. 1–4.

[15] *Юсупова Л.И. и др*. Интерферометры на основе вставок оптических волокон с тонкой сердцевиной SM600 и SM450 // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 9. С. 73–77.

[16] *Duan D.-W. et al.* In-fiber Mach–Zehnder interferometer formed by large lateral offset fusion splicing for gases refractive index measurement with high sensitivity // Sensors and Actuators B: Chemical. 2011. Vol. 160. № 1. P. 1198–1202.

[17] *Tian Z. et al.* Single-Mode Fiber Refractive Index Sensor Based on Core-Offset Attenuators // IEEE Photonics Technology Letters. 2008. Vol. 20. № 16. P. 1387–1389.

[18] *Zhang Y. et al*. Refractive Index Sensing Characteristics of Single-Mode Fiber-Based Modal Interferometers // Journal of Lightwave Technology. 2014. Vol. 32. № 9. P. 1734–1740.

[19] *Wang P. et al.* Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multimode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing // J. Opt. Soc. Am. B. 2011. Vol. 28. № 5. P. 1180–1186.

Temperature-compensated refractometers based on intermode fiber-optic interferometers

A.A. Markvart, L.D. Zavalishina, A.E. Zaripov, L.B. Liokumovich, N.A. Ushakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

The paper considers intermode interferometers based on composite fiber-optic SMS structures (from singlemode-multimode-singlemode) and their application as the refractive index sensors. A technique for calculating the spectral characteristics of the interferometers and their response to changes in the refractive index and temperature of the external environment is presented. An approach to taking into account the effect of temperature on the results of measuring the refractive index of the external environment is proposed, which consists in analyzing the responses of various interference components corresponding to different pairs of fiber modes using the Fourier transform. Experimental studies of interferometers immersed in aqueous solutions of glycerol of different concentrations are carried out. The possibility of simultaneously measuring the concentration of glycerol in the solution and the temperature of the solution is demonstrated. Features of the application of the discrete Fourier transform are considered and measurement errors are analyzed.

Keywords: *intermode fiber interferometer, SMS, refractive index, spectral interferometry, Fourier transform*

Особенности применения спектральных систем контроля при изготовлении интерференционных фильтров для ИК диапазона

А.Н. Тропин

АО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

Для исследования особенностей использования спектральных систем контроля при изготовлении инфракрасных интерференционных фильтров реализован подход, основанный на моделировании процесса вакуумного осаждения покрытий. С применением процедуры так называемого предпроизводственного анализа рассматриваются различные стратегии контроля толщины осаждаемых слоев. На примере некоторых многослойных тонкопленочных структур продемонстрированы возможности указанного подхода. Развитая в работе процедура для определения наиболее подходящей стратегии контроля позволяет получать воспроизводимые результаты в технологических процессах вакуумного осаждения оптических интерференционных покрытий. Рассмотрены имеющиеся ограничения и приведены результаты практического применения спектральных систем контроля при изготовлении прецизионных инфракрасных интерференционных фильтров.

Ключевые слова: *интерференционный фильтр, вакуумное осаждение, многослойное тонкопленочное покрытие, спектральная система контроля*

Введение

Успешное изготовление сложных прецизионных многослойных интерференционных оптических покрытий сопряжено с рядом существенных трудностей. В первую очередь, это связано с необходимостью точного контроля толщины слоев, получаемых осаждением в вакууме.

С помощью расчетного эксперимента можно показать, что для некоторых узкополосных фильтров, относительное изменение толщины одного из полуволновых (резонансных) слоев всего лишь на 1 % приводит к уменьшению пропускания фильтра в максимуме более чем на 15 %.

Для контроля вакуумного напыления сложных многослойных оптических покрытий может быть эффективным применение так называемых спектровизоров — спектральных систем контроля (ВВОМ — broad band optical monitors) [1].

В работе исследованы особенности использования таких спектральных систем контроля на примере системы IRIS 1017 с рабочим спектральным диапазоном 0,95–2,40 мкм.

Метод широкополосного спектрального контроля

По своей сути спектровизор представляет собой спектральный прибор. Как правило, в качестве диспергирующего элемента в приборах, получивших промышленное распространение, используются дифракционные решетки, а развертка по спектру осуществляется за счет использования многоэлементных линейных приемников излучения. За счет применения таких приемников, позволяющих исключить механическую развертку по спектру, время измерения спектра составляет не более нескольких десятков миллисекунд, что, применительно к задачам контроля процесса вакуумного осаждения покрытий, позволяет контролировать процесс напыления практически в реальном времени.

Для получения пленок заданной толщины предварительно рассчитывается спектр пропускания (отражения) слоя заданной толщины. При этом в расчете учитываются дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения. На рис. 1 приведен стоп-кадр процесса контроля толщины осаждаемого слоя в режиме работы на отражение.

Процесс осаждения заканчивается в тот момент, когда текущий, динамически изменяющийся спектр осаждаемого слоя совпадает с расчетной спектральной характеристикой.

При контроле толщины осаждаемого слоя измерение его спектральных характеристик производится либо на неподвижном контрольном образце, либо на образце, закрепленном на вращающейся оснастке вместе с напыляемыми оптическими деталями [2]. При изготовлении покрытий, работающих в том же спектральном диапазоне, что и система контроля, имеется возможность контролировать всю многослойную структуру с использованием только одного контрольного образца.

Однако отличительной особенность настоящей работы было то обстоятельство, что с использованием системы контроля с рабочим диапазоном 0,95–2,40 мкм исследованы особенности изготовления интерференционных фильтров для работы в области спектра от 5 до 15 мкм.

Поэтому ключевым моментом в работе является то обстоятельство, что контроль процесса осаждения осуществляется не по одному контрольному образцу, закрепленному на вращающейся оснастке, а по нескольким неподвижным контрольным образцам. Так, например, имеется возмож-

ность осаждать на один контрольный образец как по одному слою, так и по несколько чередующихся слоев. Кроме этого, на один контрольный образец можно осаждать, например, только слои с низким показателем преломления n_H, а на другой — только с высоким n_B [3]. По этой причине несомненный практический интерес представляет определение стратегии контроля, дающей наилучшие результаты практической реализации покрытий. Под стратегией контроля здесь понимается количество слоев, осаждаемых на каждый контрольный образец, а также их последовательность.

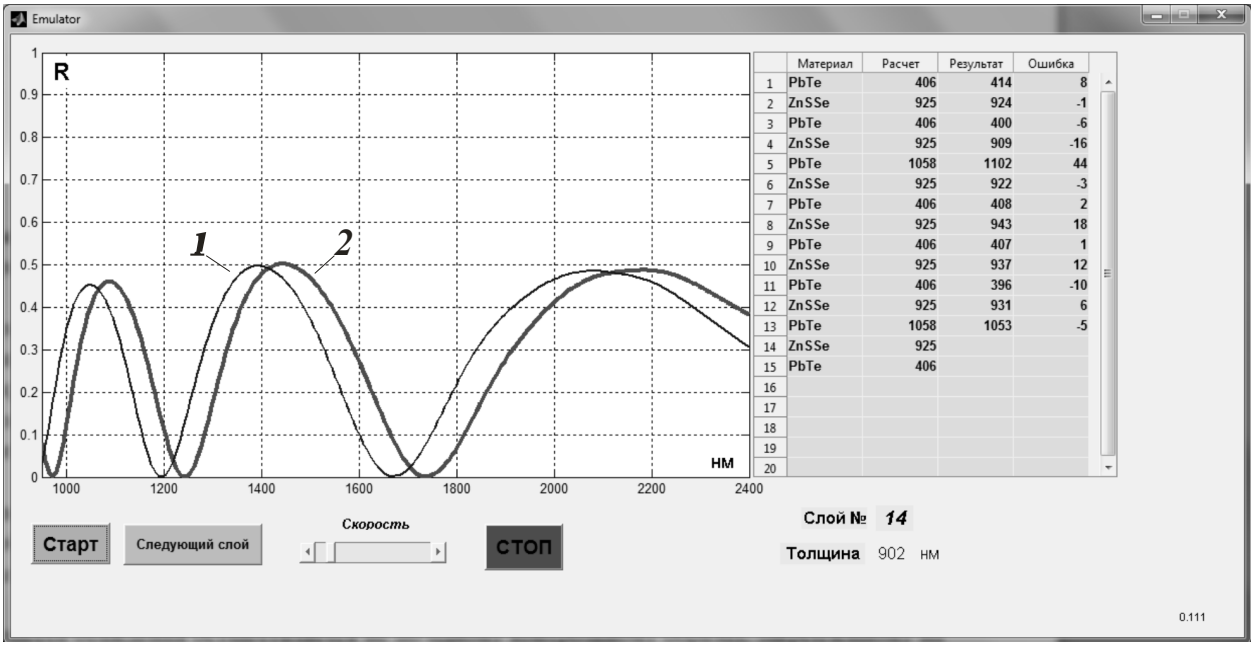


Рис. 1. Процесс контроля толщины: 1 — спектр отражения напыляемого слоя; 2 — спектр отражения слоя требуемой толщины

При моделировании процесса контроля в работе были использованы следующие стратегии контроля:

стратегия 1 — напыление всех слоев покрытия на один контрольный образец;

стратегия 2 — напыление всех слоев с n_H на один контрольный образец, а всех слоев с n_B — на другой;

стратегия 3 — последовательное напыление по 2 слоя на несколько контрольных образцов.

Предпроизводственный анализ

На практике выбор стратегии контроля можно осуществить двумя способами — непосредственно реализовать несколько напылений одного и того же покрытия с использованием различных стратегий контроля, или провести серию вычислительных экспериментов, моделирующих реальный процесс напыления многослойного покрытия. Очевидно, что первый подход сопряжен с существенными временными и материальными затратами, в то время, как вычислительный эксперимент лишен этих недостатков.

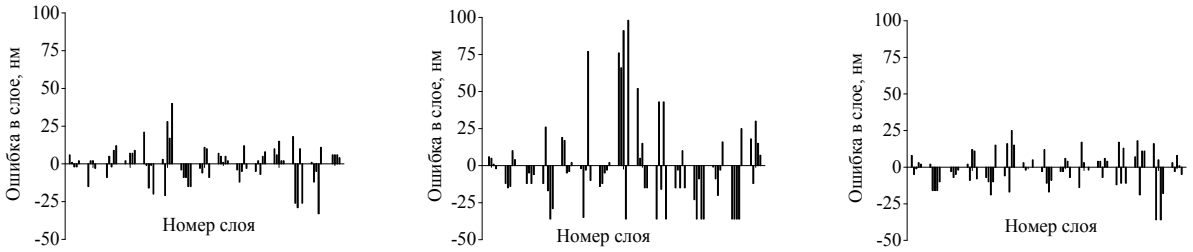
Для проведения вычислительного эксперимента в работе использовалась специально составленная программа, моделирующая реальный процесс контроля толщины слоев с использованием спектральной системы IRIS 1017. В общем случае, входными данными для моделирования могут служить точностные характеристики используемой спектральной системы контроля, флуктуации скорости осаждения слоев, отклонения оптических констант пленок от принятых в расчете, непосредственно стратегия контроля, а также ряд других параметров, отражающих реальный процесс вакуумного осаждения оптических покрытий [4]. Результатом проведения виртуального напыления являются величины возможных ошибок в толщинах слоев покрытия, а также спектральные характеристики полученных покрытий с ошибками.

В качестве примера для исследования особенностей изготовления инфракрасных фильтров была использована 15-ти слойная структура узкополосного интерференционного фильтра с λ_{max} = 8,55 мкм и $\Delta\lambda_{0,5}$ = 135 нм. Структура покрытия на подложке из монокристаллического кремния представлена в таблице, где В — это пленки *PbTe*, а Н — пленки *ZnSe*.

Структура покрытия

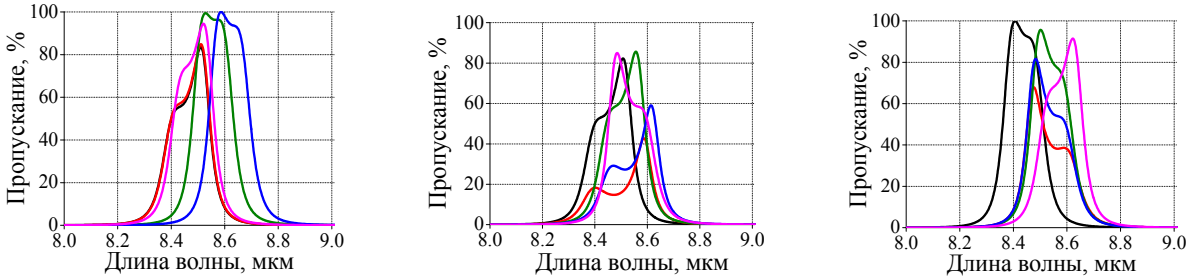
Номер слоя	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Материал	В	Н	В	Н	В	Н	В	Н	В	Н	В	Н	В	Н	В
Толщина, нм	406	925	406	925	812	925	406	925	406	925	406	925	812	925	406

Результатом проведения серии виртуальных напылений являются структуры с ошибками в слоях и соответствующие этим структурам их спектральные характеристики пропускания. На рис. 2 приведены полученные ошибки в слоях для 5 различных процессов с применением трех приведенных выше стратегий контроля. На рис. 3 приведены соответствующие спектральные характеристики.



а) б) в)

Рис. 2. Ошибки в толщинах слоев: а) стратегия 1, б) стратегия 2, в) стратегия 3



а) б) в)

Рис. 3. Спектры структур: а) стратегия 1, б) стратегия 2, в) стратегия 3

С учетом полученных результатов можно сделать вывод о том, что применительно к рассматриваемой структуре многослойного покрытия, наиболее пригодными стратегиями контроля являются стратегия 1 и стратегия 3. Однако с учетом особенностей оптических свойств напыляемых пленок, в частности, заметного поглощения пленок PbTe в рабочем спектральном диапазоне системы контроля, наилучшей из рассмотренных стратегий контроля является стратегия 3.

Заключение

Таким образом, в работе для исследования особенностей изготовления инфракрасных оптических покрытий с использованием спектральных систем применен подход на основе так называемого предпроизводственного анализа, представлены результаты его апробирования для определения стратегии контроля толщины осаждаемых слоев при изготовлении сложных инфракрасных многослойных покрытий. Развитая в работе процедура для определения наиболее подходящей стратегии контроля направлена на получение воспроизводимых результатов в технологических процессах вакуумного осаждения прецизионных инфракрасных интерференционных фильтров.

Список источников

[1] *Deakins D. et al.* Evaluation of Broadband Optical Monitoring for Optical Interference Coatings makjian // Society of Vacuum Coaters. 57th Annual Technical Conference Proceedings. 2014. P. 206–210.

[2] *Prosovsky O.F. et al.* Contemporary system of direct broadband optical monitoring of thickness of spray optical coatings // Light & Engineering. 2020. Vol. 28. № 5. P. 48–52. https://doi.org/10.33383/2020-017

[3] *Zhupanov V.G. et al.* Indirect broadband optical monitoring with multiple witness substrates // Appl. Opt. 2009. Vol. 48. № 12. P. 2315–2320.

[4] *Tikhonravov A.* Virtual deposition plant // Proc. of SPIE. 2005. Vol. 5870. P. 1–13. https://doi.org/10.1117/12.617043

Features of the application of spectral control systems in the manufacture of IR interference filters

A.N. Tropin

JSC "Research Institute "GIRICOND", Saint-Petersburg, Russia

An approach based on modeling the vacuum deposition of coatings to study the features of using spectral control systems in the manufacture of infrared interference filters is implemented. A variety of strategies for controlling deposited layers using a procedure called pre-production analysis are considered. The possibilities of this approach using of some multilayer thin-film structures analysis are demonstrated. The procedure developed in this work for determining the most suitable control strategy allows obtaining reproducible results in technological processes of vacuum deposition of optical interference coatings. The existing limitations are considered and the results of practical application of spectral control systems for precision infrared interference filters production are presented.

Keywords: *interferential filter, vacuum deposition, multilayer thin film coating, spectral control system*

Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа состава газовой смеси

А.В. Шелаев, А.В. Барышев

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Спектроскопия комбинационного рассеяния находит применение в анализе состава газовых смесей. Одним из ключевых преимуществ метода является возможность детектирования двухатомных молекул (H_2, O_2 и N_2), что важно для мониторинга и обеспечения безопасности в энергетике и атомной отрасли. Возбуждения комбинационного рассеяния осуществлялось лазером с длиной волны 445 нм и выходной мощностью 6 Вт. Такие параметры позволили обеспечить высокую чувствительность и точность измерений, вплоть до 0,01 % об., в полном диапазоне 0–100 % об. Исследовались две оптические конфигурации детектирования: с обратным сбором рассеянного излучения и в геометрии скрещенных пучков. Последняя продемонстрировала существенно лучшее соотношение сигнал-шум, что делает ее более предпочтительной для практического применения.

Ключевые слова: *оптика, спектроскопия, комбинационное рассеяния, газ*

Комбинационное рассеяние (КР) света — оптический метод анализа вещества, основанный на неупругом рассеянии света. Он позволяет определять малые концентрации газов, включая токсичные и взрывоопасные, а также детектировать двухатомные молекулы (H_2, O_2, N_2), недоступные для ИК-спектроскопии. КР-спектроскопия находит применение в энергетике [1] и атомной промышленности [2], где контроль состава газовых смесей критичен для предотвращения аварий. Метод позволяет дистанционно и без забора проб анализировать атмосферу в герметичных зонах при высоких температурах или радиационном фоне. Интеграция в автоматизированные системы обеспечивает непрерывный мониторинг.

Основными газами, указывающими на риск аварии, являются H_2, O_2, N_2, H_2O, CO, CO_2. Опасность зависит от соотношения компонентов: восстановителей (H_2, CO), окислителей (O_2) и нейтральных газов (N_2, CO_2, H_2O). Поэтому важно измерять все компоненты газовой смеси. КР-спектроскопия обладает высокой селективностью, отсутствием перекрестных помех и устойчивостью к «отравлению» чувствительного элемента, например, молекулами CO/CO_2, что характерно для каталитических датчиков [3].

Для исследования применялся стабилизированный по температуре диодный лазер (445 нм, 6 Вт). Спектры КР регистрировались с помощью конфокального спектрометра с фокальным расстоянием 520 мм и дифракционной решеткой 600 штр/мм. Линия возбуждения подавлялась краевыми фильтрами. Для повышения сигнала использовался пинхол 2×2 мм. Детектирование проводилось ПЗС-камерой, охлаждаемой до −60 °C; время накопления — от 10 до 60 с. Лазерное излучение фокусировалось в кварцевую газовую ячейку объемом ~50 мл с помощью параболического зеркала с серебряным покрытием. Газовая смесь подавалась через автоматизированный стенд, обеспечивающий заданные концентрации, при этом скорость потока составляла от 100 до 500 мл/мин.

Были испытаны две схемы: «на отражение» и «скрещенная». Первая предусматривала сбор излучения по тому же пути, что и возбуждающий пучок, вторая — пространственное разделение каналов. Также варьировались параболические зеркала для изменения числовой апертуры, как следствие, и пространственной селективности. Высокий уровень фона в схеме «на отражение» был связан с флуоресценцией зеркал и пылинок в лазерном пучке. Применение скрещенной схемы позволило минимизировать фон за счет разделения путей возбуждения и детектирования. Отказ от дихроичного зеркала в пользу алюминиевого устранил дополнительные источники флуоресценции. Несмотря на снижение общего сигнала в 3 раза, соотношение сигнал/шум стало значительно выше, так как фон уменьшился с 20 000 до 25 отсчетов, то есть на 3 порядка.

Для калибровки оптического отклика на различные концентрации измеряемых газов сначала в газовую ячейку напускался исследуемый газ в концентрации 100 % об. Основной пик молекулы H_2, отвечающей за переход между колебательными уровнями, соответствует 4150 $см^{-1}$. Зная интегральную концентрацию, отвечающую 100 % об. H_2 и учитывая, что величина оптического сигнала прямо пропорциональна количеству молекул, а также полагая, что давление и температура (22 °C) в ячейке оставалась неизменными, можно определить коэффициент для линейной зависимости в соотношении между концентрацией и интегральной интенсивностью пика КР H_2 на 4150 $см^{-1}$. При времени экспозиции 10 с СКО составило 23 ppm. После усреднения по 10 точкам (время 100 с) точность повысилась до 6 ppm и, таким образом, предел обнаружения составил 18 ppm.

Для других компонент были проведены аналогичные исследования. Концентрация O_2 определялась по пикам при 1556 $см^{-1}$, N_2 — при 2333 $см^{-1}$. Точность измерений — менее 0,2 % об. во всем интервале от 0 до 100 % об. Уровень шума вблизи 0 составил ~80 ppm для O_2 и ~90 ppm для N_2. Точность ограничена стабильностью лазера (~1/300 при 10 с накопления сигнала). Предел обнаружения CO_2 определялся по интенсивности пика в диапазоне 1250–1500 $см^{-1}$, чтобы минимизировать влияние O_2. На основе зависимости интенсивности от концентрации получен предел детектирования — 240 ppm. Наконец, пары воды анализировались по колебаниям ОН-группы в области 3650–3750 $см^{-1}$. Для коррекции фона использовалась базовая линия в диапазонах 3550–3600 и 3800–3850 $см^{-1}$. Точность определения относительной влажности в азоте составила 0,15 % относительной влажности при комнатной температуре, что соответствует ~40 ppm H_2O.

Таким образом, предложенный способ детектирования КР сигнала и конструктивные элементы установки обеспечили детектирование газов со значениями чувствительности вплоть до 0,01 % и высокую селективность.

Список источников

[1] *Chen Ya et al.* Development of an online detection setup for dissolved gas in transformer insulating oil // Applied Science. 2021. № 2. Art. no. 12149.

[2] *Bentaib A. et al.* Overview on hydrogen risk research and development activities: Methodology and open issues // Nuclear Engineering and Technology. 2015. № 47. P. 26–32.

[3] *Magne S. et al.* In situ gas monitoring by fiber-coupled Raman spectrometry for H_2-risk management in nuclear containment during a severe nuclear accident // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2021. Vol. 67. № 4.

Application of Raman spectroscopy for gas mixture composition analysis

A.V. Shelaev, A.V. Baryshev

Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

Raman spectroscopy is employed for the analysis of gas mixtures. A key advantage of this method is its ability to detect diatomic molecules such as H_2, O_2, and N_2, which is crucial for monitoring and safety in the energy and nuclear sectors. Raman scattering was excited using a 445 nm laser with an output power of 6 W. These parameters enabled highly sensitive measurements with an accuracy of up to 0.01 vol. %, across the full concentration range of 0–100 vol. %. Two optical detection configurations were evaluated: backward collection of scattered radiation and a crossed-beam geometry. The latter provided a significantly improved signal-to-noise ratio, making it more suitable for practical implementation.

Keywords: *optics, spectroscopy, Raman scattering, gas*

Оптические и не оптические методы диагностики и контроля нового поколения

А.П. Владимиров

Институт машиноведения УрО РАН им. Э.С. Горкунова, Екатеринбург, Россия

Целью доклада является сообщение об использовании нового оптического метода для определения деформаций газовых, жидких и твердых сред, и о начале разработки на основе полученных данных новых датчиков, методов и приборов контроля и диагностики. Показано, что не регистрация в режиме реального времени многоцикловой усталости современными методами контроля объясняется большой базой измерения порядка 1–100 мм, в то время как гигантские усталостные эффекты возникают на участках размером порядка 10 мкм. На основе выявленных механизмов усталости ряда материалов для оценки остаточного ресурса деталей предложено разрабатывать оптические и неоптические датчики нового поколения. Рассмотрены первые шаги, предпринятые для создания таких датчиков.

Ключевые слова: *динамика спеклов, усталость, разрушение, остаточный ресурс*

Введение

Согласно литературным источникам [1–3], 90 % деталей техники разрушаются следствие усталости, из них от 50 до 80 % — вследствие многоцикловой усталости. Однако до последнего времени методы неразрушающего контроля многоцикловую усталость не регистрировали. Соответственно, отсутствуют методы оценки и расчета остаточного ресурса деталей, эксплуатируемых в условиях многоцикловой усталости, которые удовлетворяют требованиям инженерной практики [3]. Поэтому создание методов контроля и диагностики многоцикловой усталости является весьма актуальной задачей. Новый оптический метод, позволяющий надежно регистрировать многоцикловую усталость, нами создан, теория метода, его экспериментальное и метрологическое обоснование были опубликованы в статьях [4–6]. Физической основой метода является новый механо-оптический эффект, обнаруженный нами в 2010 году и рассмотренный в 2012 году в статье [7]. Этот эффект известен малому числу оптиков. Целью доклада является рассмотрение теории эффекта и его проявление в экспериментах. Обсуждаются формулы, используемые для определения деформаций, дается краткий обзор результатов их использования для изучения механизмов усталостной деградации ряда материалов. На основе полученных данных в статьях [8–11] сделан вывод о необходимости разработки датчиков и методов контроля и диагностики нового поколения. Обсуждаются первые шаги, предпринятые нами для создания таких датчиков.

Образцы, техника и методика измерений

В экспериментах использовались плоские образцы, изготовленные из стали, алюминиевого сплава и оргстекла. Образцы были без концентратов напряжений, со слабым концентратором и с острым надрезом типа Шарпи. Испытания на усталость проводили на машине типа MIKROTRON фирмы RUMUL. Оптическая система, состоящая из лазерного модуля, двух призм и телекамеры с объективом располагалась либо на платформе машины, либо на столике рядом. Деформации участков поверхности определяли по формулам, выведенным при аналитическом решении задач о динамики спеклов в плоскости изображения отражающих и прозрачных деформируемых тел [4–6, 12]. Регистрируемой величиной является среднее по времени цифровое значение интенсивности излучения $\tilde{I}$ в пиксели телекамеры, далее формируется нормированная временная автокорреляционная функция $\eta(t)$ этой интенсивности. По квазипериодическим изменениям величин $\tilde{I}$ и η во времени определяли динамику разности оптических путей Δu двух волн, распространяющихся на среднем, характерном расстоянии Δl в пределах линейного разрешения линзы. В статье [12] было продемонстрировано отличное совпадение теории и эксперимента.

Результаты и их обсуждение

В статьях [8–11] показано, что не регистрация современными методами контроля многоцикловой усталости объясняется большой базой измерения (областью усреднения) порядка 1–100 мм, в то время как гигантские усталостные эффекты локализованы в области порядка 10 мкм. В стали, алюминиевом сплаве и в оргстекле выявлены одинаковые процессы усталостной деградации материалов. Путем регистрации распределения величины η вдоль линии, проведенной в плоскости изображения объектов, показано, что с самого начала опытов начинается локализация необратимых

процессов на малых участках. При первом же цикле возникают малые участки, постоянно находящиеся в растянутом состоянии. Вначале на этих участках идут два процесса: 1) разрывы межатомных или межмолекулярных связей из-за теплового хаотического движения атомов и молекул, 2) медленное увеличение растягивающих деформаций из-за циклической ползучести материала. После исчерпания механизмов ползучести деформации резко возрастают, но не путем изменения формы участка, а за счет изменения его объема. Начинается генерация миро-пор, пор и микротрещин. В сопряженной области начинается характерное «кипение» спеклов. При этом сопротивление материала участка деформированию, т. е. максимально выдерживаемое напряжение постепенно уменьшается до нуля. В этот момент путем объединения дефектов возникает макротрещина. Усталостная трещина возникает на участке размером порядка 10 мкм при относительной деформации порядка 10^{-1}.

В процессе накопления больших локальных необратимых деформаций на малых участках размером порядка 10 мкм происходит сильное изменение физических свойств материала. Кардинально изменяется деформация, плотность среды, ее электро- и магнито- сопротивление, магнитная проницаемость, скорость ультразвука, упругие константы и т.д. Зная предельное значение физической величины, соответствующей старту трещины, и контролируя скорость ее изменение на участке, можно оценить время до старта трещины, т.е. остаточный ресурс детали. Для решения этой задачи в статьях [8–11] было предложено создавать датчики матричного типа с размером ячеек порядка 10 мкм. Рассматриваются первые шаги, предпринятые в этом направлении. Обсуждаются проекты матричных тензо-датчиков, термопар, вихретоковых датчиков, лазерных генераторов и приемников УЗ волн, магнитных датчиков, перспективы их изготовления.

Заключение

На основе нового механо-оптического эффекта создан лазерный метод, позволяющий в режиме реального времени определять деформации газовых, жидких и твердых сред на минимальной базе порядка 1 мкм. С помощью метода выявлен единый механизм усталостной деградации ряда материалов при мало-, много-, и гига- цикловой усталости. Показано, что не регистрация многоцикловой усталости современными методами неразрушающего контроля объясняется большой базой измерения порядка 1–100 мм. Для оценки остаточного ресурса деталей предложено создавать методы диагностики и контроля нового поколения, основанные на использовании датчиков матричного типа с размерами ячеек порядка 10 мкм.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России по теме АААА-А18-118020790148-1. При выполнении работы было использовано оборудование ЦКП «Пластометрия» при ИМАШ УрО РАН. Автор благодарит студентов Уральского федерального университета Наумова К.В, Седова Д.С., Корелина А.А., научного сотрудника ИФМ УрО РАН Павлова Т.Н., а также Романова В.В. из лазерного института ИТМО за их участие в подготовке материалов доклада.

Список источников

[1] *Barr C.M. et al.* Autonomous healing of fatigue cracks via cold welding // Nature. 2023. Vol. 620. P. 550–556.

[2] *Brinckmann S.* On the role of dislocations in fatigue crack initiation: Dissertation. University of Groningen, 2005.

[3] *Новиков И.И. и др.* Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. С. 328.

[4] *Vladimirov A.P.* Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media // Optical Engineering. 2016. Vol. 55. № 12. P. 1217–1227.

[5] *Vladimirov A.P., Druzhinin A.V., Malygin A.S., Mikitas K.N.* Theory and calibration of speckle dynamics of phase object // Saratov Fall Meeting 2011: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII: Proc. SPIE. 2012. Vol. 8337. P. 83370C-1–83370C-15.

[6] *Vladimirov A.P.* Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1740. P. 040004-10–40004-4. https://doi.org/10.1063/1.4952663

[7] *Vladimirov A.P.* Dynamic Speckle – Interferometry of Micro-Displacements // 10th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques –AIVELA. 2012. Book Series: AIP Conference Proceedings, 2012. Vol. 1457. P. 459–468.

[8] *Vladimirov A.P., Kamantsev I.S., Drukarenko N.A., Myznov K.E., Naumov K.V.* Comparison of applications results of two speckle methods for study multi-cycle fatigue of structural steel // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2024. Vol. 24. № 1. P. 20–29 (In Russ.).

[9] *Vladimirov A.P., Drukarenko N.A., Myznov K.E.* Using Speckle Images for Determining the Local Plastic Strains Arising at High-Cycle Fatigue of 09G2S Steel // Technical Physics Letters. 2021. Vol. 47. № 8. P. 773–776.

[10] *Владимиров А.П.* Спекл-диагностика деградации сплава Д16 при одно-, мало-, много-, и гига- цикловом нагружении // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2024. Т. 11. № 3. С. 73–77. https://doi.org/10.24892/RIJIE/20240312

[11] *Vladimirov A., Sedov D., Prokhorova Y.* To the development of a high-cycle fatigue sensors and vision systems // IEEE Xplore: 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) Sochi, 2024, pp. 205–209. https://doi.org/10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694192

[12] *Владимиров А.П.* К спекл-томографии функций живой клетки // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 8. С. 655–664.

Optical and non-optical diagnostic and control methods of the new generation

A.P. Vladimirov

E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Deformations of gaseous, liquid, and solid media, and the initiation of the development of new-generation sensors, monitoring, and diagnostic methods, instruments, and devices based on the obtained data. It is shown that the failure of modern monitoring methods to detect high-cycle fatigue in real time is explained by the large measurement base of 1–100 mm, while gigantic effects occur in areas measuring approximately 10 μm. Based on the identified fatigue mechanisms for a number of materials, it is proposed to develop new-generation optical and non-optical sensors for the remaining life of components.

Keywords: *speckle dynamics, fatigue, destruction, residual resource*

Опыт получения и применения в серийном оптическом производстве комбинированных оптических элементов на основе прецизионного реплицирования с использованием малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения

М.М. Ахметов[1], Л.В. Бордюжа[2], Н.А. Гурин[3], С.В. Косковский[1], Е.Г. Лисова[1], А.В. Лукин[1], А.Н. Мельников[1], Н.Г. Мирханов[1], И.А. Могилюк[1], Д.Р. Нурмухаметов[2], И.В. Самойлов[4], А.Ф. Скочилов[1], О.Б. Яковлев[4]

[1] *АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Россия*
[2] *АО «Казанский оптико-механический завод», Казань, Россия*
[3] *АО «Новосибирский приборостроительный завод», Новосибирск, Россия*
[4] *АО «Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» им. Э.С. Яламова», Екатеринбург, Россия*

В докладе представлены основные технологические операции и номенклатура расходных материалов для получения комбинированных оптических элементов (КОЭ). Приведены результаты комплексных ускоренных испытаний на сохраняемость и климатику нескольких различных образцов КОЭ. Показано, что по долговечности, механической прочности, устойчивости к воздействию ряда агрессивных сред и других негативных факторов КОЭ близки к своим чисто стеклянным аналогам, а их себестоимость многократно ниже. Обсуждаются первые результаты применения КОЭ в реальных оптико-электронных устройствах.

Ключевые слова: *комбинированный оптический элемент, компонент, асферическая поверхность, прецизионное реплицирование, малоусадочная полимерная композиция, фотополимер, мастер-матрица, окуляр*

К традиционным способам формообразования асферических оптических поверхностей (АП) относятся следующие способы на основе [1, 2]:

— съема (удаления) материала: с помощью полноразмерного прецизионного инструмента; с помощью малого инструмента; на оптических станках с числовым программным управлением; ножевым способом; способом «ретуши»; плазмо-химическим способом;

— наращивания материала — вакуумным напылением с использованием масок;

— перераспределения материала — моллированием (нагрев мастер-матрицы до температуры текучести);

— процесса прессования под давлением и с повышенной температурой.

Высокой производительностью и предельно низкой себестоимостью обладает способ формообразования АП путем прецизионного реплицирования на основе полимеризации холодного отверждения [3–8].

При помощи технологии прецизионного реплицирования (ТПР) рабочие поверхности КОЭ (линз, зеркал, дифракционных оптических элементов и других решеточных структур) получают с помощью высокоточных мастер-матриц в относительно тонких полимерных слоях на подложках из оптического стекла [3–8]. Такие КОЭ состоят из стеклянной основы с тонкими слоями полимера, имеющими внешние поверхности заданной формы или штриховой структуры. Использование малоусадочных фотополимерных композиций холодного отверждения гарантирует отсутствие термических и механических деформаций, высокую идентичность однотипных КОЭ в каждой партии и, самое главное, — предельно низкую их себестоимость.

В АО «НПО ГИПО» разработана универсальная ТПР, пригодная как для формообразования сферических и асферических поверхностей оптических элементов (линз и зеркал), так и для получения рельефно-фазовых структур элементов дифракционной оптики (синтезированных бинарных и многоуровневых голограммных оптических элементов, киноформов и рельефно-фазовых дифракционных решеток). Это позволяет основные звенья технологических цепочек (выбор и подготовку полимерных материалов, участки реплицирования, химической- и фотополимеризации, вакуумных и специальных покрытий и др.) реализовать как общие для обоих типов изделий. В обоих случаях возможна организация конвейерной формы серийного и массового производства соответствующих КОЭ.

Обсуждаются первые результаты применения КОЭ в реальных оптико-электронных устройствах.

Список источников

[1] *Карлин О.Г. и др.* Изготовление и контроль асферической оптики. М.: ЦНИИ информации, 1980. 272 с.

[2] *Окатов М.А. и др.* Справочник технолога-оптика. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.

[3] *Ахметов М.М. и др.* Научно-производственный комплекс серийной прецизионной репликации элементов асферической и дифракционной оптики // Контенант. 2016. Т. 15. № 3. С. 39–42.

[4] *Лукин А.В.* и др. Реплицированная асферическая оптика: основные аспекты организации серийного и массового производства // Контенант. 2017. Т. 16. № 2. С. 167–172.

[5] *Лукин А.В.* и др. Прецизионное реплицирование всех видов оптических поверхностей – научно-технологическая основа кардинальных преобразований в современном оптическом производстве // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 10. С. 42–50. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-42-50

[6] *Лукин А.В.* и др. Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве // Прикладная оптика – 2022: XV междунар. науч. конф.: сб. тез. СПб.: Изд-во Скифия-принт, 2023. С. 88–89.

[7] *Лукин А.В.* и др. Результаты ускоренных испытаний на сохраняемость линз с реставрированными асферическими рабочими поверхностям // ХОЛОЭКСПО 2024: XXI Междунар конф по голографии и прикладным оптическим технологиям: тез. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 370–372.

[8] *Лукин А.В.* и др. Опыт применения технологии прецизионного реплицирования для восстановления оптических деталей из брака при серийном производстве // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 107–115. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-107-115

Combined optical elements based on precision replication using low-shrinkage cold-setting polymer compositions: evidence of obtaining and application in serial optical production

M.M. Akhmetov[1], L.V. Bordyuzha[2], N.A. Gurin[3], S.B. Koskovsky[1], Y.G. Lisova[1], A.V. Lukin[1], A.N. Melnikov[1], N.G. Mirkhanov[1], I.A. Mogilyuk[1], D.R. Nurmukhametov[2], I.V. Samoylov[4], A.F. Skochilov[1], O.B. Yakovlev[4]

[1] *JSC "Scientific and Production Association "State Institute of Applied Optics", Kazan, Russia*
[2] *JSC "Kazan Optical-Mechanical Plant", Kazan, Russia*
[3] *JSC "Novosibirsk Instrument-Building Plant", Novosibirsk, Russia*
[4] *JSC "Production Association "Ural Optical and Mechanical Plant" named after E.S. Yalamov", Yekaterinburg, Russia*

This report presents the main technological operations and the list of consumables used to obtain combined optical elements (COE). It provides the results of complex accelerated environmental and conservation tests of various COE samples. It has been demonstrated that COE are close to their pure glass analogues with regard to durability, mechanical strength, resistance to a number of aggressive environments and other negative factors, while having a much lower prime cost. The first results of using COE in real optoelectronic devices are being discussed.

Keywords: *combined optical element, component, aspherical surface, precision replication, low-shrinkage polymer composition, photopolymer, master detail, eyepiece*

Оптоэлектронный осциллятор как ключевой компонент передовых сенсорных и инфокоммуникационных систем

Г.С. Воронков, И.В. Степанов, В.В. Иванов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Рассматриваются особенности применения оптоэлектронных осцилляторов (ОЭО), выполненных с использованием технологий интегральной фотоники, как важного компонента передовых инфокоммуникационных и сенсорных систем. В области беспроводной связи ОЭО позволяют добиться существенного диапазона перестройки частоты СВЧ-колебаний, превосходя по этому параметру традиционные схемы на основе GaAs-транзисторов. При этом важной остается задача снижения шага перестройки частоты выходных колебаний ОЭО. Показано, что для этой цели можно использовать дополнительные управляемые линии задержки в кольце обратной связи ОЭО. В сенсорных системах применение ОЭО, особенно при возможности реализации малого шага перестройки его выходной частоты, позволяет снизить уровень собственных шумов системы и повысить ее чувствительность.

Ключевые слова: *радиофотоника, интегральная фотоника, оптоэлектронный осциллятор, сенсорная система*

Введение

Бурное развитие технологий беспроводной связи диктует необходимость освоения все более высоких частотных диапазонов. Такие лидеры рынка беспроводных технологий и сверхвысокочастотных (СВЧ) систем как Qualcomm [1, 2] и Anritsu [3] подчеркивают необходимость применения частотных полос до 100 ГГц и выше в перспективных системах связи в дополнение к уже используемым в 5G New Radio (5G NR) частотам 24–28 ГГц. В отчете Anritsu также указываются сложности разработки устройств полупроводниковой электроники для субтерагерцового диапазона частот. Прежде всего, проблемы обусловлены свойствами материалов, применяемых для СВЧ-радиоэлектроники. Подвижность носителей заряда в кремниевых полупроводниках существенно ниже, чем в III-V-полупроводниках, прежде всего, в арсениде галлия GaAs. Показательна в этом отношении статистика, приведенная авторами [4]: современные усилители мощности на основе технологии КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник; англ. CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) в диапазоне частот выше 100 ГГц встречаются редко, уступая и арсениду и нитриду галлия GaAs и GaN, и фосфиду индия InP. Стоит также учитывать, что автогенераторы на основе GaAs-транзисторов, несмотря на свое широкое распространение обладают относительно малым диапазоном перестройки частоты [5, 6]. Методы радиофотоники же позволяют достичь существенного диапазона перестройки частот, при этом одной из самых простых и экономичных схем оптических генераторов СВЧ-колебаний является оптоэлектронный осциллятор (ОЭО) [7, 8], который можно реализовать и в интегральном исполнении. Одновременно ОЭО представляет интерес в сенсорных системах как устройство опроса (интеррогации) датчиков, поскольку его использование может снизить собственные шумы такой системы [9].

Схема ОЭО с малым шагом перестройки частоты

В основополагающих публикациях по ОЭО [7, 10] рассматривается перестройка его частоты за счет управления резонансной длиной волны режекторного фильтра. Шаг перестройки частоты ОЭО при этом оказывается значительно больше, чем у электрических аналогов [11, 12]. Предлагается устранить это ограничение (или снизить степень его влияния) за счет управления частотой на основе контроля задержки в петле обратной связи (рис. 1). Реализовать линию задержки на фотонной интегральной схеме можно непрерывным изменением вносимой временной задержки [13–15] с использованием волноводной брэгговской решетки, интерферометра Маха — Цандера (ИМЦ) или микрокольцевого резонатора (МКР).

Моделирование

Моделирование проводилось для структур на основе ИМЦ и МКР на платформе «кремний-на-изоляторе» в среде Ansys Lumerical. В качестве метода управления моделировался термооптический и электрооптический эффекты. В результате моделирования было выявлено, что линия задержки на ИМЦ обеспечивает шаги перестройки задержки 49,4 пс/В (термооптический ИМЦ), 8,25 пс/В (электрооптический ИМЦ), а на МКР — 28611,43 пс/В и 3,49 пс/В (термооптический и электрооптический, соответственно). Пример перестройки частоты с использованием МКР, управляемого элек-

трооптическим эффектом, обеспечивающим, как видно из приведенных результатов, минимальный шаг перестройки частоты, приведен на рис. 2. Красная линия соответствует ОЭО без управляемой линии задержки, голубая — при ее добавлении в цепь. Видно, что при управлении задержкой можно добиться перестройки частоты вблизи центральной частоты работы ОЭО. Диапазон перестройки составляет 4 ГГц. Минимальный шаг перестройки частоты при этом будет определяться шагом и методом возбуждения управляющего напряжения. Периодический характер графика объясняется кратностью 2π времени задержки в МКР.

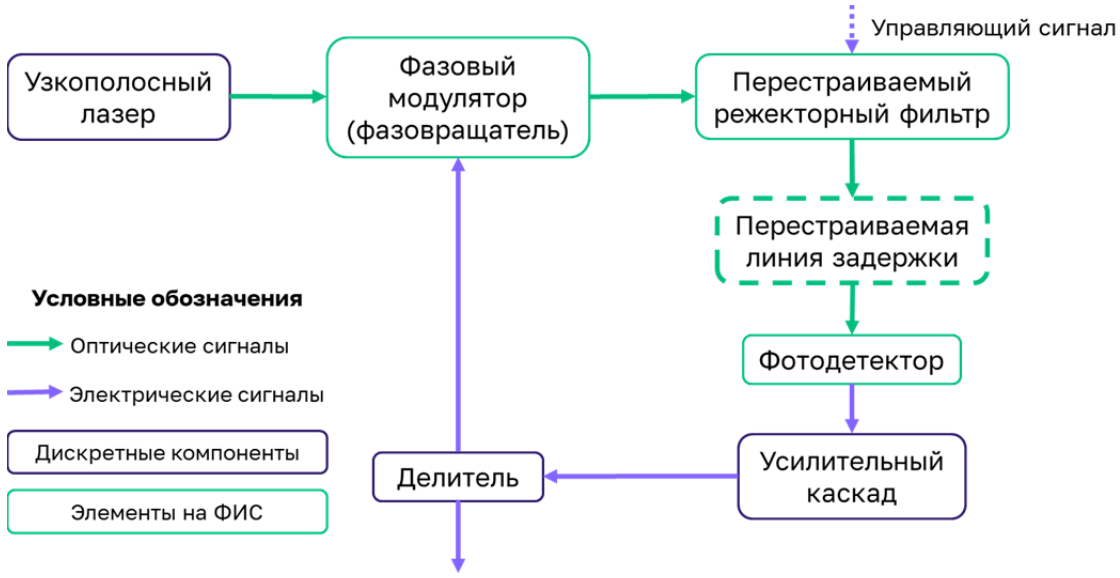


Рис. 1. Схема ОЭО с малым шагом перестройки частоты

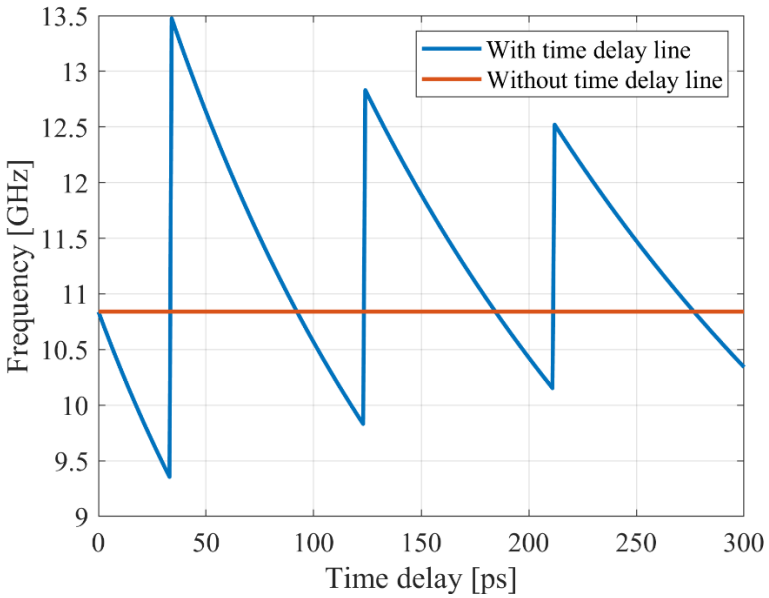


Рис. 2. Результаты моделирования перестройки частоты с малым шагом

Заключение

В работе описана схема плавной перестройки частоты интегрального оптоэлектронного осциллятора. Полученные результаты могут быть применены не только в инфокоммуникационных, но и в сенсорных системах. В этом случае сама линия задержки может выступать как чувствительный элемент, например, в рефрактометрической системе или в системе с брэгговскими датчиками растяжения. Такая схема может упростить методы частотной интеррогации и снизить требования к применяемой элементной базе. Тогда полученные результаты моделирования можно интерпрети-

ровать следующим образом. Для синтезаторов частоты на основе ОЭО требуется малый шаг перестройки частоты, поэтому наилучшим вариантом среди исследованных является использование в них в качестве элемента перестройки частоты линии задержки на основе МКР, управляемого электрооптическим эффектом. Для сенсорной системы же важна крутизна характеристики, определяющая ее чувствительность. И в этом случае наилучшим вариантом будет применение линии задержки на основе МКР, управляемого термооптическим эффектом. Предложенная схема ОЭО может иметь применение в различных телекоммуникационных и сенсорных системах, в том числе — в качестве элемента контроля и управления длиной волны лазеров.

Благодарность

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

Список источников

[1] Future of 5G. Qualcomm. URL: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/making-5g-nr-a-commercial-reality.pdf (дата обращения 01.05.2025).

[2] *Tseng D.* Why and what you need to know about 6G in 2022. URL: https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/web-why-and-what-you-need-to-know-about-6G-in-2022.pdf (дата обращения 01.05.2025).

[3] Anritsu technical review. 2022. № 30.

[4] *Markman B., Schröter M.* Indium-Phosphide Transistors: A Review of Current State and Suitability for Commercial > 100-GHz Wireless Communication Systems // IEEE Microwave Magazine. 2024. Vol. 25, № 10. P. 38–53.

[5] 24-24.5GHz Tx Multifunction. United Monolithic Semiconductors. 2012.

[6] 18.10 GHz to 26.60 GHz Quadband VCO. Analog Devices. 2020.

[7] *Maleki L.* The optoelectronic oscillator // Nature Photonics. 2011. Vol. 5, № 12. P. 728–730.

[8] *Li M. et al.* Tutorial on optoelectronic oscillators // APL Photonics. 2021. Vol. 6, № 6. Art. no. 061101.

[9] *Voronkov G.S. et al.* Enhancing the Performance of the Photonic Integrated Sensing System by Applying Frequency Interrogation // Nanomaterials. 2023. Vol. 13, № 1. Art. no. 193.

[10] *Yao X.S., Maleki L.* Optoelectronic microwave oscillator // J. Opt. Soc. Am. B. 1996. Vol. 13. № 8. P. 1725. https://doi.org/10.1364/JOSAB.13.001725

[11] *Yang B. et al.* A Wideband Frequency-Tunable Optoelectronic Oscillator Based on a Narrowband Phase-Shifted FBG and Wavelength Tuning of Laser // IEEE Photon. Technol. Lett. 2012. Vol. 24. № 1. P. 73–75. https://doi.org/10.1109/LPT.2011.2172789

[12] *Peng H. et al.* Wideband tunable optoelectronic oscillator based on the deamplification of stimulated Brillouin scattering // Opt. Express. 2017. Vol. 25, № 9. P. 10287. https://doi.org/10.1364/OE.25.010287

[13] *Melati D. et al.* Wideband Integrated Optical Delay Line Based on a Continuously Tunable Mach–Zehnder Interferometer // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2017. Vol. 24. № 1. P. 1–8. https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2723955

[14] *Megret P. et al.* Ring resonator-based Tunable Optical Delay Line in LPCVD Waveguide Technology // 10th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2005, pp. 79–82.

[15] *Zhang W., Yao J.* A fully reconfigurable waveguide Bragg grating for programmable photonic signal processing // Nature Communications. 2018. Vol. 9. № 1. P. 1396. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03738-3

Optoelectronic oscillator as a key component of advanced sensor and communication systems

G.S. Voronkov, I.V. Stepanov, V.V. Ivanov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

This examines the application of optoelectronic oscillators (OEOs) based on integrated photonics technologies as key components in advanced infocommunication and sensor systems. In wireless communications, OEOs enable a significantly wider range of microwave frequency tuning compared to traditional circuits based on GaAs transistors. Nevertheless, achieving finer frequency tuning steps for the OEO output remains a critical challenge. The study demonstrates that incorporating additional controllable delay lines into the OEO feedback loop can effectively address this issue. In sensor systems, the use of OEOs — particularly those capable of fine frequency tuning — contributes to reducing intrinsic system noise and enhancing sensitivity.

Keywords: *radiophotonics, integrated photonics, optoelectronic oscillator, sensor system*

Интеграция фотонных устройств в бортовые навигационные комплексы: архитектуры, модели ошибок и электромагнитная совместимость

И.В. Чекунов[1], В.И. Ермаков[2], Е.К. Юрьева[2]

1 МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена переходу от дискретных ВЧ-трактов к фотонным интегральным схемам (ФИС) с полупроводниковыми лазерами и электрооптическими модуляторами $LiNbO_3$ для бортовых навигационных приемников малых КА и БПЛА. Рассматривается реализация на платформе ниобата лития на изоляторе (LNOI): фотонный тракт «лазер – модулятор – фотоприем – цифровая обработка». Построена компактная модель суммарной погрешности и предложена сквозная методика верификации параметров. Расчетные оценки показывают достижимость временной точности ~0,1 нс при полосе модуляции > 30 ГГц и упрощение выполнения требований по электромагнитной совместимости (ЭМС). Интеграция на LNOI потенциально снижает массу и энергопотребление по сравнению с функционально эквивалентными дискретными РЧ-решениями.

Ключевые слова: *фотонные интегральные схемы, $linbo_3$-модулятор, полупроводниковый лазер, навигация, эмс, фазовый шум*

Введение

Повышение точности навигационных определений опирается на развитие средств частотно-временного обеспечения (ЧВО) и систем единого времени (СЕВ). Ключевыми факторами остаются стабильность опорного генератора и воспроизводимость фазовых измерений. Ограничения радиочастотных трактов (полоса, фазовые флуктуации, требования ЭМС и массогабаритные характеристики) и уязвимость к внешним воздействиям при дисциплинировании по спутниковым сигналам мотивируют перенос формирования и сличения синхросигналов в оптический домен, где высокая монохроматичность источников и широкополосная электрооптическая модуляция повышают точность и помехозащищенность. Фотонные методы уже применяются для передачи и сличения сигналов времени по волокну, для синтеза и деления частот на основе оптических гребенок и в интегрально-оптических модуляторах СВЧ-диапазона. Для бортовой аппаратуры это дает уменьшение паразитного РЧ-излучения и перекрестных помех, увеличение полосы и быстродействия при формировании пилотных сигналов и улучшение показателей по массе, габаритам и потребляемой мощности (SWaP).

Точностные требования к ЧВО/СЕВ и навигации

Точность навигационных определений определяется характеристиками ЧВО и СЕВ. Для задач высокого класса требуется обеспечивать временную погрешность порядка 0,1 нс при суточной стабильности опорного генератора 10^{-15}; для прикладных сценариев достаточно: для центров управления ГНСС — ≤ 1 мкс, для РСДБ и спутниковой геодезии — 1–10 нс, для цифровой связи — 1–10 мкс (в сетях 5G — до 1 мкс); для систем связи и энергетики характерен уровень 1 мкс, для транспортных задач — 1 мс, для систем часофикации — 1 с [1–3]. Перевод временной ошибки в пространственный эквивалент подчеркивает жесткость требований: 1 нс соответствует ≈ 0,3 м ошибки псевдодальности, а 0,1 нс — ≈ 3 см. Корректное формирование и передача импульсных или сигналов структур с фронтами порядка 1 нс требуют полосы около 1 ГГц; обеспечить ее в радиочастотных трактовках сложно как по физико-техническим пределам компонентов, так и по регуляторным ограничениям радиочастотного плана. Это мотивирует переход к оптическим трактам, где требуемые временные разрешения достижимы без конфликта с требованиями ЭМС и массогабаритов.

Модель ошибок фотонного навигационного тракта

Цель моделировния — количественно оценить вклад фотонного тракта в бюджет временной ошибки и стабильности. Предполагается, что механизмы возмущений некоррелированы (фазовый шум лазерного источника, температурный дрейф электрооптического модулятора на ниобате лития (LNOI), вибрационно-механические воздействия на волноводные и волоконные участки), поэтому дисперсия временной ошибки складывается аддитивно. Для сопоставления с требованиями используются нестабильность Аллана $\sigma_y(\tau)$ и эквивалентный джиттер σ_τ, связанные с фазой $\varphi(t)$ и несущей частотой f_c после фотодетекции как $\sigma_\tau \approx \sigma_\varphi/(2\pi f_c)$; интегрированный фазовый шум $L(f)$ в рабочей полосе пересчитывается в σ_τ [1].

Частотный шум представляется суперпозицией белого шума частоты (White FM) и случайного блуждания частоты (random-walk FM, 1/f2): $S_v(f) = h_0 + h_{-2}/f^2$ [1, 4]. Для нормированной частоты $y(t) = \Delta\nu/\nu_0$ получаем $S_y(f) = S_v(f)/\nu_0^2$; соответствующие вклады в нестабильность Аллана масштабируются как $\sigma_y(\tau) \propto \tau^{-1/2}$ (White FM) и $\sigma_y(\tau) \propto \tau^{+1/2}$ (random-walk FM). На малых периодах усреднения (1 с) доминирует белая составляющая (спектральная чистота и стабилизация тока лазера); на больших интервалах — медленные флуктуации, подавляемые термостабилизацией и стабильностью резонаторных параметров. Внешняя электрооптическая модуляция снижает перенос лазерного шума в РЧ-область после детекции.

Задержка оптического канала τ_{opt} зависит от эффективного показателя преломления и длины пути. При малых изменениях температуры ΔT относительное изменение задержки описывается температурным коэффициентом относительной задержки $\kappa_T \approx 1\,ppm/K$ для $LiNbO_3$/LNOI: $\Delta\tau \approx \kappa_T\,\tau_{opt}\,\Delta T$, а фазовый сдвиг $\Delta\varphi = 2\pi f_c\,\Delta\tau$ [5]. Минимизация τ_{opt} за счет интеграции на кристалле и удержание узлов в режиме активной стабилизации температуры ± 0,05 К ограничивают этот вклад.

Микродеформации (микроизгибы, акустооптические эффекты) изменяют n_{eff} и эффективную длину пути, формируя компоненту $\sigma_{\tau,vib}$, особенно заметную вблизи конструкционных резонансов [6]. Снижение достигается укорочением оптических трасс (интегральная реализация), демпфированием крепежных элементов и симметричными схемами модуляции push–pull [4]. При независимых вкладах и активной термостабилизации ± 0,05 К расчетный уровень кратковременной стабильности составляет $\sigma_y(1c) \approx 5 \times 10^{-14}$ с выходом до $\sigma_y(10^4\,\text{с}) \sim 10^{-16}$ на длительных интервалах; это согласуется с целевым внутренним бюджетом джиттера 0,3–1 нс на участке «источник – модулятор – световод – фотоприемник».

Опираясь на вышеуказанные положения, предлагается сквозная методика, совмещающая обеспечение режимов и проверку метрик. Тракт переводится в термостабилизированный режим для цепочки «лазер – модулятор – оптопакет» с установкой ± 0,05 К при минимизированной оптической длине; выполняется двунаправленная калибровка задержки «конец – к – концу» эталонного пилотного сигнала с декомпозицией на сегменты и подстановкой в модель суммарной дисперсии. Фазовый шум $L(f)$ после фотодетекции измеряется в рабочей полосе, интегрируется и пересчитывается в σ_τ с сопоставлением с целевым бюджетом 0,3–1 нс; температурный вклад оценивается по $\Delta\tau_T = \kappa_T\,\tau_{opt}\,\Delta T$ при $\kappa_T \approx 1\,ppm/K$, вибровклад — по отсутствию признаков резонансно-индуцированного ухудшения параметров на частоте пилот-сигнала [1, 4]. Приемка выполняется по кривым $\sigma_y(\tau)$ для $\tau = 1\,\text{с}$ и $\tau \approx 10^4$ совместно с протоколом калибровки и температурными трассировками; соответствие критериям $\sigma_\tau \leq 1\,\text{нс}$, $\sigma_y(1\,\text{с}) \approx 5 \times 10^{-14}$ и $\sigma_y(10^4\,\text{с}) \sim 10^{-16}$ считается достаточным для приемки [1].

Электромагнитная совместимость

Оптический тракт как носитель синхросигналов не формирует значимого электромагнитного излучения в диапазоне 0,1–18 ГГц. Потенциальные пути паразитного воздействия ограничиваются остаточными РЧ-переходами вблизи фотоприемника, путевыми электродами электрооптического модулятора и токовыми петлями питания сопутствующей электроники. Исключение протяженных коаксиальных линий и согласующих отрезков разрывает эффективные излучающие контуры, а локализация высокочастотной энергии на путевых электродах, согласованных по фазовой скорости с оптической модой волновода, снижает уровни побочных излучений и перекрестных помех. В компоновке «лазер – LNOI-модулятор – фотоприем – цифровая обработка» уменьшается объем экранирования и число фильтров на линиях питания и сигнала, упрощается разводка заземления и сокращается длина токовых перемычек, что дополнительно улучшает массогабаритные характеристики изделия. Контроль соответствия проводится на испытаниях на излучение и на восприимчивость: измеряются уровни побочных излучений в штатных режимах, проверяется отсутствие паразитных резонансов корпуса и жгутов, а также устойчивость к нормированным внешним полям [7, 8]. Критерий — отсутствие превышений по излучению и деградации временных метрик (джиттер, нестабильность Аллана) при воздействии, что облегчает выполнение требований по ЭМС для бортовой РЭА [7, 8].

Технологическое и конструкторское исполнение и SWaP-показатели

Полупроводниковый лазер работает во внешней модуляции с токовой стабилизацией и локальным термоконтуром; LNOI-модулятор с путевыми электродами согласуется по фазовой скорости с мо-

дой волновода и обеспечивает широкую полосу при низком $V_\pi L$. Применяются схема push–pull, укороченные оптические трассы и интегральные светоделители; интерфейсы ввода-вывода выполняются короткими (решетчатые вводы или сборки фиксированного радиуса), переходы между чипом и волокном минимизируются. Электрические межсоединения путевых электродов трассируются коротко с контролем импеданса; узлы «лазер – модулятор – фотоприем» термостабилизируются на уровне ± 0,05 К с отводом тепла на плиту. Конструкция обеспечивает демпфирование вибраций, исключение свободных длин волокна и отсутствие паразитных отражений. Питание узлов разведено по отдельным шинам с фильтрацией, цифровая часть топологически и гальванически развязана от аналоговой; встроенные пилотные режимы обеспечивают регулярный контроль джиттера и нестабильности Аллана.

По SWaP полностью интегрированное исполнение снижает массу приемного тракта с ≈ 420 г до ≈ 270 г (≈ −36 %) и потребляемую мощность с ≈ 5,4 Вт до ≈ 3,9 Вт (≈ −28 %) путем исключения коаксиального жгута, части согласующих и фильтрующих каскадов и уменьшения экранирования; добавочная мощность термостабилизации компенсируется исчезновением потерь в РЧ-линиях [9–11]. Это упрощает размещение в малых КА и БПЛА, улучшает тепловой режим, снижает требования к жесткости панелей и уменьшает количество кабельных вводов при сохранении повторяемости параметров.

Заключение

В работе предложена концепция фотонного навигационного тракта на базе полупроводникового лазера, LNOI-модулятора и интегральных оптических межсоединений. Сформулированы требования к частотно-временному обеспечению для бортового применения, обоснованы причины перехода к оптическому домену, сопоставлены две архитектуры (гетерогенная и полностью интегрированная LNOI) и построена модель ошибок, учитывающая фазовый шум источника, температурный дрейф электрооптического модулятора и виброиндуцированные эффекты. На основе этой модели предложена сквозная методика верификации, предназначенная для последующих стендовых и натурных испытаний.

Расчеты показывают, что при термостабилизации на уровне ± 0,05 К и интеграции оптических трасс на кристалле достижим внутренний бюджет ошибки времени порядка 0,3–1 нс и целевые уровни нестабильности Аллана $\sigma_y(1\text{ с}) \approx 5 \times 10^{-14}$ с выходом к $\sigma_y(10^4\text{ с}) \sim 10^{-16}$. Переход к полностью интегрированному исполнению потенциально упрощает соблюдение требований по ЭМС и обеспечивает выигрыш по SWaP (снижение массы ≈ 36 % и потребляемой мощности ≈ 28 % по сравнению с функционально эквивалентной РЧ-реализацией). Эти выводы носят прогнозный характер и опираются на принятые допущения модели (некоррелированность вкладов, температурная уставка, отсутствие резонансных возбуждений).

Список источников

[1] *Riley W.J.* Handbook of Frequency Stability Analysis. Gaithersburg: MD, NIST, 2008. 140 p. (NIST Special Publication 1065).

[2] IEEE Std 1139–2022. IEEE Standard for Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology — Random Instabilities. Piscataway, NJ: IEEE, 2022. 64 p.

[3] *Boes A., Corcoran B., Chang L., Bowers J. E., Mitchell A.* Status and Potential of Lithium Niobate on Insulator (LNOI) for Photonic Integrated Circuits // Laser & Photonics Reviews. 2018. Vol. 12, № 4. Art. no. 1700256.

[4] *Rubiola E.* Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 310 p.

[5] *Jundt D.H.* Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n^e, in congruent lithium niobate // Optics Letters. 1997. Vol. 22, № 20. P. 1553–1555.

[6] *Калачевский Н.Н., Хабарова К.Ю., Калганова Е.С.* Передача точных сигналов частоты и времени в оптическом диапазоне // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 2. С. 97–122.

[7] ГОСТ Р 51317.4.3–2008 (IEC 61000-4-3:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Методы испытаний и измерений. Испытания на устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. М.: Стандартинформ, 2008.

[8] ГОСТ Р 51318.22–2012 (CISPR 22:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Нормы и методы измерений радиопомех. М.: Стандартинформ, 2013.

[9] *Marpaung D., Yao J., Capmany J.* Integrated microwave photonics // Nature Photonics. 2019. Vol. 13, № 2. P. 80–90.

[10] *Malagoli M., Cosquéric L.* Space Harness Design Optimization: Opportunities on ECSS Derating Rules Astrium (Airbus Defence and Space), 2013. 9 p.

[11] NASA-STD-8739.4A. Workmanship Standard for Crimping, Interconnecting Cables, Harnesses, and Wiring. Washington, DC: NASA, 2016. 178 p.

Integration of photonic devices into onboard navigation systems: architectures, error models, and electromagnetic compatibility

I.V. Chekunov[1], V.I. Ermakov[2], E.K. Iureva[2]

[1] *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*
[2] *Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, Russia*

The work is devoted to the transition from discrete RF circuits to photonic integrated circuits (PICs) with semiconductor lasers and $LiNbO_3$ electro-optical modulators for onboard navigation receivers of small satellites and UAVs. The implementation on a lithium niobate on insulator (LNOI) platform is considered: a photonic path "laser – modulator – photodetector – digital processing." A compact model of total error has been constructed, and a through-verification method for parameters has been proposed. Calculations show that a temporal accuracy of ~0.1 ns can be achieved with a modulation bandwidth > 30 GHz and that electromagnetic compatibility requirements can be simplified. Integration on LNOI potentially reduces weight and power consumption compared to functionally equivalent discrete RF solutions.

Keywords*: photonic integrated circuits, linbo₃ modulator, semiconductor laser, navigation, emc, phase noise*

Секция 14
Нейросетевые технологии в фотонике

Применение архитектуры типа трансформер для решения задачи детекции объектов в мультимодальных данных сенсоров беспилотных авто

А.В. Таламанова, Е.Ю. Злоказов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Данная работа посвящена обзору решений задачи детекции объектов в данных лидара и камеры с помощью модели глубокого обучения типа трансформер. Приведен подробный обзор и систематический анализ существующих архитектур, выявляющий ключевые ограничения в обработке пространственно-временных корреляций между сенсорами. Определены перспективные направления поиска более точных решений задачи.

Ключевые слова: *беспилотные технологии, детекция объектов, архитектура трансформер, лидар, камера*

Введение

Несмотря на то, что беспилотные транспортные средства уже достигли 4 уровня автономности, (SAE International [1]), существующие системы пилотирования все еще сталкиваются с проблемами точной интерпретации дорожной обстановки, что требует совершенствования технологий восприятия окружающей среды. Ключевой задачей является детекция объектов на основе мультимодальных данных, осложненная различиями в форматах сенсоров, жесткими временными ограничениями и необходимостью детектирования мелких препятствий, часто игнорируемых в существующих решениях. Трансформерные архитектуры демонстрируют передовые результаты в этой области, что подтверждается опытом крупнейших игроков рынка беспилотных технологий [2–4]. В данной работе проводится анализ современных трансформерных архитектур для детекции объектов в данных оптических сенсоров — лидара и камеры, их сравнительная оценка по ключевым метрикам производительности, а также определяются перспективные направления развития для повышения точности и быстродействия систем в условиях реального времени.

Общие сведения

Трансформерные архитектуры демонстрируют значительный прогресс в этой области благодаря механизмам кросс-модального внимания и единому представлению данных. Их ключевое преимущество заключается в способности моделировать глобальные зависимости в данных без жестких индуктивных предпосылок, характерных для традиционных сверточных и рекуррентных сетей. Это достигается за счет механизма самовнимания, который динамически вычисляет значимость каждого элемента последовательности относительно других через параметризованные линейные проекции.

Для оценки качества работы моделей детекции используются стандартные метрики компьютерного зрения. Метрика отношения пересечения к объединению (Intersection over Union, IoU) измеряет степень перекрытия между предсказанным и истинным ограничивающим боксом. Более комплексная метрика mean Average Precision (mAP) учитывает баланс между точностью и полнотой детекции для всех классов объектов, что особенно важно в условиях дисбаланса классов в реальных дорожных сценариях. Эти метрики позволяют объективно сравнивать эффективность различных архитектур.

Обзор существующих решений

TransFusion [5] реализует двухэтапное слияние: начальная детекция происходит с использованием только лидарных данных, затем предсказание уточняется трансформерным декодером, выполняющим адаптивное кросс-модальное внимание между объектными токенами данных лидара и региональными признаками изображения. Метод достигает 68,9 % mAP (nuScenes), но характеризуется высокой вычислительной сложностью.

BEVFusion [6] преодолевает геометрическое несоответствие модальностей проекцией данных камеры в Bird’s Eye View пространство. Единое представление обеспечивает баланс скорости (8,4 FPS) и точности (76,8 % mAP), однако чувствительно к погрешностям калибровки и не сохраняет высокочастотные детали.

UniTR [7] вводит унифицированный трансформер для совместной обработки лидара, камеры и радара через общие токены и кросс-модальное внимание. Архитектура поддерживает мультизадачность (70,9 % mAP), но требует сложной оптимизации гиперпараметров из-за высокой размерности признакового пространства.

DeepInteraction [8] сохраняет модальную специфичность: независимые кодировщики обмениваются контекстом через двунаправленное внимание, а декодер итеративно уточняет 3D-предсказания чередованием признаков. Реализация достигает 75,7 % mAP за счет комплементарности модальностей, но ресурсоемка и критична к точности карт глубины.

По итогам обзора можно видеть, что модель BEVFusion [6] демонстрирует самое высокое среди приведенных значений mAP, что может дать основание полагать, что для дальнейшего прогресса в решении данной задачи необходимо модифицировать данную модель. Однако помимо улучшения количественных результатов необходимо рассматривать и улучшение их качества. В будущем вполне вероятно появление новых датасетов, в которых, наряду с относительно крупными объектами, такими как грузовик и пешеход, будут фигурировать и менее масштабные, как, например, неровности дорожного покрытия и объекты дорожной инфраструктуры. Решение задачи для расширенных наборов данных, включающих небольшие объекты, требует поиска и внедрения новых идей развития существующих архитектур.

Возможные направления улучшения решения

Архитектура CMDFusion [9] изначально разработана для мультимодальной семантической сегментации, ее ключевой особенностью является механизм асимметричной дистилляции знаний, однако данная идея может быть использована и для улучшения детекции объектов.

Другое направление развития в решении задачи — внедрение в модель трансформера элементов архитектуры графовых нейронных сетей для моделирования связей между объектами.

Заключение

Проведенный обзор современных методов детекции объектов на основе трансформеров для мультимодальных данных лидара и камеры демонстрирует значительный прогресс в решении поставленной задачи. Однако, количественное и качественное улучшение результатов крайне желательно и может быть достигнуто в ближайшее время, в частности с использованием идей, предложенных в данной работе.

Список источников

[1] SAE International — Advancing Mobility Knowledge and Solutions. URL: https://www.sae.org/ (дата обращения 11.06.2025).

[2] Waymo Team. Introducing EMMA: Waymo's Next-Generation Autonomous Driving Model. URL: https://waymo.com/blog/2024/10/introducing-emma (дата обращения 02.05.2025).

[3] *Zhang L., Wang Y., Chen X.* Advanced Autonomous Vehicle Perception Systems. URL: https://www.researchgate.net/publication/357918913_Autonomous_Vehicles_Perception_AVP_Using_Deep_Learning_Modeling_Assessment_Challenges (дата обращения 02.05.2025).

[4] V7 Labs. Vision Transformers (ViT) Guide: How They Work & Why They’re Better than CNNs? URL: https://www.v7labs.com/blog/vision-transformer-guide (дата обращения 02.05.2025).

[5] *Bai X., Hu Z., Zhu X., Huang Q., Chen Y., Fu H., Tai C.-L.* TransFusion: Robust LiDAR-Camera Fusion for 3D Object Detection with Transformers. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2022/papers/Bai_TransFusion_Robust_LiDAR-Camera_Fusion_for_3D_Object_Detection_With_Transformers_CVPR_2022_paper.pdf (дата обращения 01.05.2025).

[6] *Liu Z., Tang H., Amini A., Yang X., Mao H., Rus D.L., Han S.* BEVFusion: Multi-Task Multi-Sensor Fusion with Unified Bird's-Eye View Representation. URL: https://paperswithcode.com/paper/bevfusion-multi-task-multi-sensor-fusion-with (дата обращения 01.05.2025).

[7] *Wang Y., Guizilini V., Zhang T., Yang Y., Zhao H.* UniTR: A Unified and Efficient Multi-Modal Transformer for Bird’s-Eye-View Representation. URL: https://openaccess.thecvf.com/content/ICCV2023/papers/Wang_UniTR_A_Unified_and_Efficient_Multi-Modal_Transformer_for_Birds-Eye-View_Representation_ICCV_2023_paper.pdf (дата обращения 01.05.2025).

[8] *Wang Y., Mao H., Chen Y., Wang D., Yang X., Liu Z., Zhou D.* DeepInteraction: 3D Object Detection via Modality Interaction. URL: https://www.researchgate.net/publication/362887059_DeepInteraction_3D_Object_Detection_via_Modality_Interaction (дата обращения 02.05.2025).

[9] *Cen J. et al.* CMDFusion: Bidirectional Fusion Network with Cross-Modality Knowledge Distillation for LiDAR Semantic Segmentation. URL: https://arxiv.org/pdf/2307.04091 (дата обращения 02.05.2025).

Application of Transformer-Based Architectures for Object Detection in Multimodal Sensor Data of Autonomous Vehicles

A.V. Talamanova, E.U. Zlokazov

[1] *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

This study focuses on addressing the problem of object detection in LiDAR and camera data using a transformer-based deep learning model. A detailed review and systematic analysis of existing architectures are provided, identifying key limitations in processing of spatiotemporal correlations between sensors. Building upon the analyzed solutions, a series of improvements is proposed, and candidate architectures are developed. The results of testing the proposed architectures are presented and analyzed.

Keywords: *automotive technologies, object detection, transformer architecture, lidar, camera*

Оперативный синтез компьютерных голограмм 3D-сцен с использованием нейронных сетей

Д.А. Рымов, Т.А. Гататдинов, А.В. Шифрина, Е.Ю. Злоказов, П.А. Черемхин, Р.С. Стариков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Представлен разработанный неитеративный нейросетевой метод синтеза фазовых компьютерных голограмм 3D-сцен. Для обучения нейронной сети использовался набор случайно сгенерированных простых объектов (кругов). Применение обученной нейросети в несколько раз превосходит традиционный итеративный алгоритм синтеза по быстродействию без потери качества. Результаты подтверждаются при анализе качества изображений, численно и оптически восстановленных из синтезированных голограмм.

Ключевые слова: *голография, дифракционные оптические элементы, нейронные сети, машинное обучение*

Введение

Широко используемые методы синтеза компьютерных голограмм (КГ), такие как алгоритм Герчберга-Сэкстона (ГС) [1], это итеративные алгоритмы, не подходящие для оперативного синтеза КГ, особенно это касается синтеза голограмм 3D-сцен, где необходим расчет нескольких плоскостей сцены. Применение неитеративных методов, основанных на использовании нейронный сетей (НС), могут позволить значительно ускорить процесс синтеза КГ. Однако существующие нейросетевые методы синтеза КГ [2] не позволяют использовать уже обученную модель для создания КГ с изменяющимися физическими параметрами, такими как длина волны излучения, размер пикселя пространственно-временного модулятора света (ПВМС), расстояние от плоскости ПВМС до плоскостей восстановления 3D-сцены. Таким образом требуется создание нейросетевой модели, которая способна синтезировать КГ с различными физическими параметрами без необходимости переобучения.

Методология

В основе метода лежит глубокая двухканальная [3] сверточная НС с промежуточными связями на основе U-net [4]. Обучение происходит по непарному принципу, то есть для обучения применяется только набор исходных объектов. Пример используемых для обучения объектов представлен на рис. 1.

Рис. 1. Пример объектов, используемых для обучения

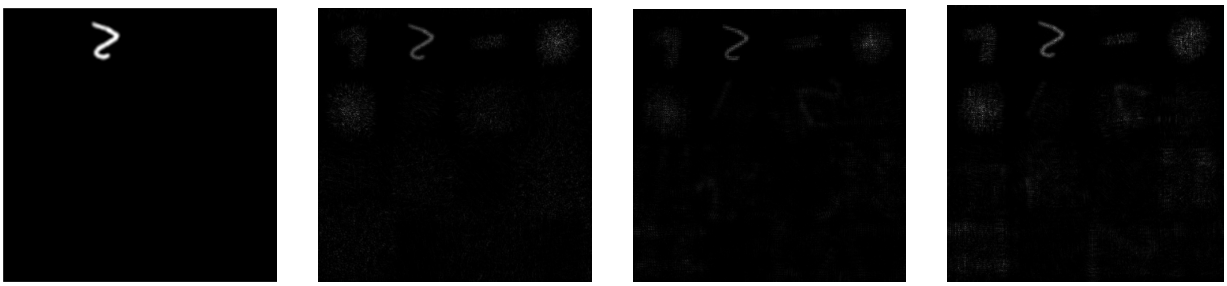
В процессе обучения нейросеть производит расчет дифракции с использованием заданных физических параметров — длиной волны излучения, размером пикселя ПВМС, расстояния от плоскости ПВМС до плоскостей восстановления 3D-сцены. Таким образом, за счет их непосредственного использования в процессе обучения эти физические параметры могут быть изменены при использовании обученной модели при синтезе КГ без необходимости дополнительного или повторного обучения.

Численные эксперименты

На рис. 2 показан пример изображений, восстановленных из КГ, синтезированных с использованием алгоритма ГС и обученной НС, обучение проводилось при заданной длине волны излучения 533 нм. Для демонстрации применения обученной НС с различными физическими параметрами обученная НС была использована для синтеза КГ длинами волн излучения 532 и 632 нм. Проведена

численная оценка предложенного метода в сравнении с алгоритмом ГС, результаты представлены в таблице. Для численного сравнения использовались следующие метрики:

– время синтеза КГ;
– коэффициент корреляции (КК);
– нормированное среднеквадратическое отклонение (НСКО).



а б в г

Рис. 2. Пример оригинальной 3D-сцены из 16 объектных плоскостей (а); плоскости, восстановленной из КГ, синтезированных алгоритмом ГС (б) и обученной НС при длине волны излучения 533 нм (в) и 633 нм (г)

Численное сравнение изображений, восстановленных из КГ, синтезированных алгоритмом ГС и обученной НС

Метод	Время синтеза, сек	НСКО	КК
ГС	1,8	0,34 ± 0,02	0,928 ± 0,009
НС, 532 нм	0,2	0,34 ± 0,02	0,927 ± 0,012
НС, 633 нм	0,2	0,35 ± 0,02	0,925 ± 0,013

Как видно на рис. 2 и исходя из данных таблицы, изображения, восстановленные из КГ, синтезированных обученной НС не уступают по качеству изображениям, полученным с использованием традиционного метода, при этом достигается преимущество по скорости синтеза в 9 раз, и сохраняется качество изображений и при использовании длины волны, не задействованной в процессе обучения.

Заключение

Разработанный нейросетевой метод синтеза компьютерных голограмм продемонстрировал качество восстановленных изображений, не уступающее современному итеративному алгоритму (КК=0,927). При этом подобный уровень качества реконструкции также сохраняется при использовании длины волны излучения, не задействованной в численной модели расчета дифракции в процессе обучения, что показывает возможность применения обученной НС с различными физическими параметрами без необходимости повторного обучения модели.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список источников

[1] *Gerchberg R.W.* A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik (Stuttg). 1972. Vol. 35. P. 237–246.

[3] *Черемхин П.А. и др.* Нейросетевые методы в цифровой и компьютерной голографии. Обзор // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 62–78. https://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-62-78

[3] *Rymov D.A. et al.* 3D-CGH-Net: Customizable 3D-hologram generation via deep learning // Opt. Lasers Eng. 2025. Vol. 184. Art. no. 108645. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108645

[4] *Ronneberger O. et al.* U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9351. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28

Rapid generation of 3D-scenes computer holograms using neural networks

D.A. Rymov, T.A. Gatatdinov, A.V. Shifrina, E.Yu. Zlokazov, P.A. Cheremkhin, R.S. Starikov

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

A non-iterative neural network-based method for generation of phase-only computer holograms of 3D-scenes is presented. A set of randomly generated simple objects (circles) was used to train the neural network. The trained neural network is several times faster than the traditional iterative generation algorithm without sacrificing hologram quality. The results are confirmed by analyzing the numerically and optically reconstructed 3D-scenes.

Keywords: *holography, diffractive optical elements, neural networks, machine learning*

Набор процедурно генерируемых биологических клеток для обучения нейронных сетей в цифровой голографии

А.С. Свистунов, Д.А. Рымов, Р.С. Стариков, П.А. Черемхин, Н.Н. Евтихиев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Создан набор данных, состоящий из процедурно сгенерированных биологических клеток, основанный на реальных изображениях клеток, для обучения нейронных сетей в медицинских и биологических задачах. Проведены эксперименты по классификации клеток и реконструкции изображений с цифровых голограмм. Точность классификации была выше 99 % как при использовании изображений клеток, так и их голограмм. Задача реконструкции изображений была успешно решена.

Ключевые слова: *цифровая голография, наборы данных, глубокое обучение, нейронные сети, биологические клетки, реконструкция изображений, компьютерная голография*

Введение

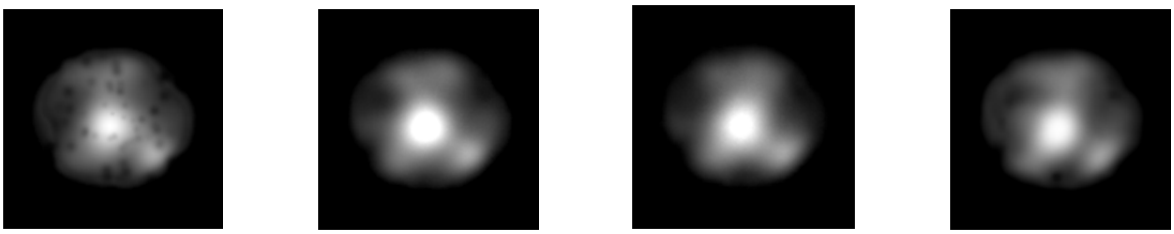
На сегодняшний день цифровая голография активно применяется в различных областях науки и техники: экология, биология, медицина и прочих. Параллельно с этим стремительно растет количество статей по применению нейронных сетей в цифровой голографии для различных задач, в том числе: восстановление изображений, классификация и детектирование объектов, приведение фазы к абсолютному виду, компенсация аберраций и других. Однако обычно для обучения нейронных сетей используются стандартные наборы данных, такие как MNIST [1, 2], которые далеки от области практических применений цифровой голографии. Таким образом, очевидна нехватка численно синтезируемого набора данных, который бы был близок к практическим применениям и при этом легко масштабировался и подстраивался под решаемые задачи. В работе предложена разработка варианта такого набора данных.

Набор данных

За основу предлагаемого датасета была взята статья [3], где авторы детектируют и классифицируют биологические клетки непосредственно с цифровых голограмм. В качестве примера для моделирования использовались клетки двух классов: здоровая клетка кожи человека (HS895.Sk) и меланома (HS895.T). Набор данных предлагает процедурную генерацию изображений клеток двух классов с возможностью настройки, возможность создания среды с клетками в ней и запись голографического видео с их движением.

Данный набор данных тестировался в различных задачах. Первой из них стала задача классификации изображений клеток. Классификация изображений непосредственно с изображения их фазовой задержки после обучения удавалась со 100 % точностью. Точность классификации непосредственно с цифровых голограмм Френеля была также близка к 100 %.

Более сложной задачей является восстановление изображения фазового распределения поля с цифровой голограммы. Данная задача успешно решалась с помощью различных вариантов нейросетей таких как U-Net, U-Net с добавлением остаточных блоков и более глубокая нейросеть, подобная последней. На рисунке приведены примеры изображений, восстановленных с голограмм. Индекс структурного сходства с оригинальным изображением составил 0,92 ± 0,03 (б, U-Net), 0,93 ± 0,01 (в, U-Net с остаточными блоками) и 0,95 ± 0,01 (г, глубокая U-Net с остаточными блоками). Важно отметить, что одновременно решалась и задача приведения фазы к абсолютному виду, так как оригинальная глубина модуляции была 20 π.



а б в г

Оригинальное изображение (а) и примеры восстановления изображения фазовой задержки клетки при помощи НС: U-Net (б), U-Net с остаточными блоками (в) и глубокой U-Net с остаточными блоками (г)

Заключение

Таким образом, созданный набор данных может быть успешно применен для обучения нейронных сетей при решении различных задач в области цифровой голографии.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 24-19-00899.

Список источников

[1] *Sun X. et al.* Unpaired learning for digital holographic reconstruction and generation // Optics Express. 2025. Vol. 33. № 2. P. 3414–3428. https://doi.org/10.1364/OE.551211

[2] *Svistunov A. et al.* HoloForkNet: Digital Hologram Reconstruction via Multibranch Neural Network // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. № 10. Art. no. 6125. https://doi.org/10.3390/app13106125

[3] *Dudaie M. et al.* On-chip label-free cell classification based directly on off-axis holograms and spatial-frequency-invariant deep learning // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. № 1. Art. no. 12370. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38160-3

Dataset of biological cells for neural network training in digital holography

A.S. Svistunov, D.A. Rymov, R.S. Starikov, P.A. Cheremkhin, N.N. Evtikhiev

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

We propose to use a dataset consisting of procedurally generated biological cells of two types based on real cell images for neural networks training. Experiments were conducted to classify cells and reconstruct images from digital holograms. The classification accuracy was above 99 % using both cell images and cell holograms. The image reconstruction task was also successfully solved. Thus, the proposed dataset can be applied to NN training in fields such as medicine and biology.

Keywords: *digital holography, dataset, deep learning, neural network, biological cells, image reconstruction, computer-generated holography*

Библиотека для моделирования и оптимизации систем дифракционной оптики, оптических вычислителей и дифракционных нейросетей с открытым исходным кодом

С.С. Чугунов, В.Д. Игошин, Д.И. Сахно, А.Ю. Кохановский, А.А. Щербаков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

В работе описана библиотека с открытым исходным кодом на языке Python, предназначенная для моделирования распространения оптических пучков и дифракционных оптических нейронных сетей. Представлены примеры применения библиотеки как для классических задач дифракционной оптики, так и для проектирования различных архитектур полностью оптических аналогов искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: *дифракционные оптические элементы, дифракционные нейронные сети, нейроморфные вычислители*

Последние несколько лет наблюдается резкое увеличение количества научных исследований в области построения полностью оптических систем искусственного интеллекта [1]. Два основных направления исследований включают изучение нейроморфных применений оптических систем на чипе, по большей части, основанных на волноводных интегральных интерферометрах Маха — Цендера, и систем с распространением оптических пучков в свободном пространстве, основанных на классических дифракционных элементах и пространственных модуляторах света. Оба подхода обладают своими преимуществами и недостатками.

Так, дифракционные вычислители предоставляют возможность рассматривать системы с миллионами и более степеней свободы. Кроме того, они естественным образом задаются в виде многослойных структур, что позволяет провести прямые аналогии между ними и искусственными нейронными сетями. По сути, они представляют собой классические, по большей части, линейные оптические схемы, содержащие дифракционные элементы, пространственные модуляторы света, или адаптивные массивы микрозеркал, сложным образом изменяющие пространственное распределение амплитуды и фазы световых пучков, распространяющихся в этих схемах. Поэтому любое исследование в области новых применений дифракционных нейронных сетей или новых архитектур таких сетей основывается на одних и тех же методах расчета прямого распространения света в оптических схемах и обратного распространения ошибки в оцифрованных дифракционных системах, которое позволяет тренировать нейронные сети, то есть, решать сложную оптимизационную задачу. При этом в подавляющем большинстве исследований применяются одни и те же заново реализованные блоки кода, и в случаях, когда авторы выкладывают свой код в открытый доступ, он почти всегда не документирован и сложно читаем, так что не подходит для использования широкой аудиторией.

В данной работе мы попытались закрыть указанный пробел и разработать структурированную и документированную библиотеку для моделирования систем дифракционной оптики и дифракционных нейроморфных вычислителей [2]. Библиотека подходит как для моделирования уже предложенных архитектур дифракционный нейросетей, включая, например, различные варианты полносвязных, сверточных и рекуррентных сетей, так и предоставляет возможности включения новых функций, необходимых для пользователя. Сама библиотека основана на фреймворке PyTorch, широко применяемом при проектировании и анализе искусственных нейронных сетей. Код библиотеки сопровождается различными примерами, так что может быть полезен как исследователям в области оптических нейроморфных вычислителей, так и инженерам-оптикам.

Благодарность

Разработка строгих методов моделирования дифракции была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00153-П).

Список источников

[1] *Chen H. et al.* Diffractive deep neural networks: theories, optimization, and applications // Applied Physics Reviews. 2024. Vol. 11. Art no. 021332.

[2] SVETlANNa. URL: https://github.com/CompPhysLab/SVETlANNa (accessed 30.05.2025).

Open-source library for simulation and optimization of diffractive optical systems, optical computing systems and diffractive neural networks

S.S. Chugunov, V.D. Igoshin, D.I. Sakhno, A.Yu. Kokhanovkiy, A.A. Shcherbakov

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

We present an open-source library in Python designed for modeling the propagation of optical beams and diffractive optical neural networks. Examples of the use of the library are presented both for classical problems of diffraction optics and for the design of various architectures of all-optical analogues of artificial neural networks.

Keywords: *diffraction optical elements, diffractive neural networks, neuromorphic computers*

Решение обратной задачи дифракции для пространственных модуляторов света с учетом структуры ячейки с помощью машинного обучения

С.С. Чугунов, С.И. Спиридонов, А.А. Щербаков

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Продемонстрирована возможность решения обратной задачи дифракции с использованием нейронной сети, предсказывающей функцию пропускания пространственного модулятора света, которая учитывает влияние возникающих на границах соседних ячеек краевых эффектов. С учетом влияния окружения оптимизирована маска состояний, позволяющая генерировать распределение интенсивности в форме однородного кольца при решении прямой задачи дифракции. С помощью Фурье-модального метода, строго решающего уравнения Максвелла со всеми граничными условиями, сгенерирован набор данных, содержащий фазовые набеги для различных заданных состояний двумерной структуры, состоящей из девяти ячеек модулятора. Созданный набор данных применен для обучения и валидации нейросетевой модели.

Ключевые слова: *оптика, пространственные модуляторы света, машинное обучение, нейронные сети, эффект окаймляющего поля*

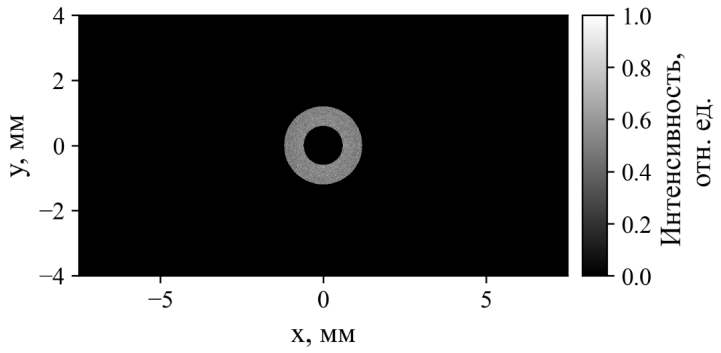
Пространственный модулятор света — технология, которая позволяет манипулировать фазовым распределением падающего на поверхность устройства светового пучка. Его функционал применяется для генерации пучков заданной формы, коррекции аберраций, в задачах шифрования, реконструкции изображений и в набирающих популярность дифракционных нейронных сетях. Модулятор представляет собой двумерную ячеистую структуру, каждый элемент которой задает определенный набег фазы. Его действие на световой пучок описывается с помощью функции пропускания, которая определяется двумерной маской состояний. В большинстве модуляторов размер одной ячейки по порядку совпадает с длиной волны падающего света, из-за чего на границах соседних ячеек возникают краевые эффекты, искажающие ожидаемую дифракционную картину.

В данной работе разработана и протестирована архитектура нейронной сети, позволяющая предсказывать функцию пропускания модулятора по заданным состояниям маски с учетом возникающих краевых эффектов. Набор данных для ее обучения был сгенерирован с использованием Фурье-модального метода [1], который применялся для строго решения уравнений Максвелла с заданными граничными условиями для двумерной квадратной структуры, состоящей из девяти ячеек модулятора.

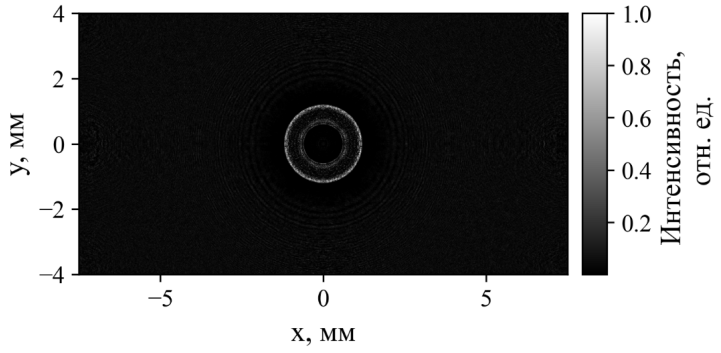
Проведено сравнение разработанной нейросетевой модели функции пропускания с моделью, не учитывающей возникающие краевые эффекты на границах, и с моделью, эффективно описывающей их влияние с помощью фильтра высоких частот [2]. С помощью алгоритма Герчберга — Сакстона [3] была подобрана маска состояний для модели функции пропускания, не учитывающей возникающие краевые эффекты, которая позволяет генерировать распределение интенсивности, заданное однородным кольцом. Эта же маска использовалась для задания функций пропускания, учитывающих влияние соседних ячеек. Для трех моделей результаты решения прямой задачи дифракции представлены на рис. 1 (а–в). Функция пропускания, заданная обученной нейронной сетью и ядром свертки [2], похожим образом искажают дифракционную: нарушается однородность распределения интенсивности внутри кольца и возникает шум за его пределами.

Вместе с тем была продемонстрирована возможность использования разработанной нейросетевой модели для решения обратной задачи дифракции. С учетом влияния соседних ячеек была оптимизирована маска состояний, позволяющая генерировать распределение интенсивности в форме однородного кольца. Результат решения прямой задачи дифракции с ее использованием представлен на рис. 2.

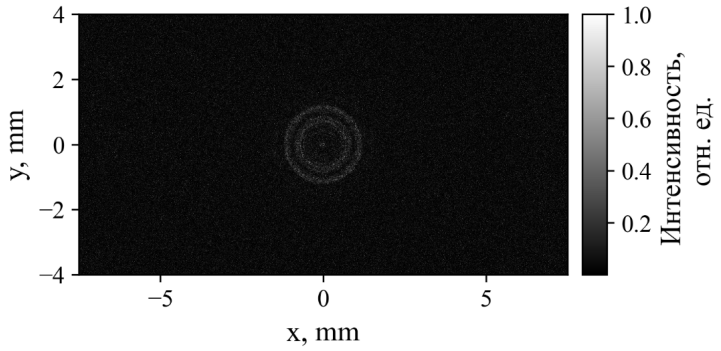
Благодаря результатам исследования расширен функционал открытой библиотеки SVETLANNA [4], которая используется для проектирования дифракционных нейронных сетей и решения прямой задачи дифракции для оптических систем, состоящих из большого числа различных дифракционных элементов.



а)



б)



в)

Рис. 1. Пример решения прямой задачи дифракции с использованием маски состояний, оптимизированной алгоритмом Герчберга — Сакстона [3]: а) функция пропускания, не учитывающая краевые эффекты, б) функция пропускания, учитывающая краевые эффекты с помощью ядра свертки [2], в) функция пропускания, учитывающая краевые эффекты с помощью нейронной сети

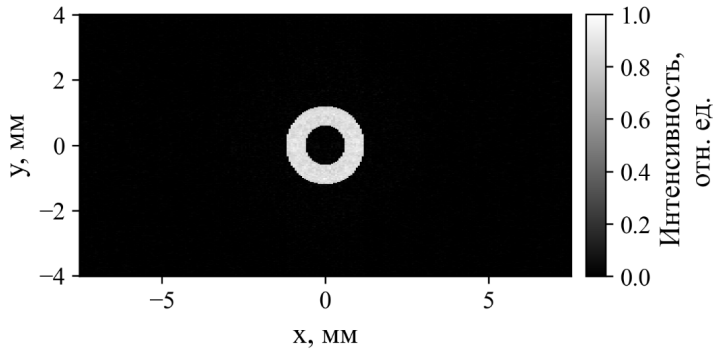


Рис. 2. Результат решения прямой задачи дифракции с использованием оптимизированной маски состояний

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-11-00153-П).

Список источников

[1] *Spiridonov S. et al.* Reformulated Fourier Modal Method with improved near field computations // Journal of Computational Science. 2023. Vol. 67. Art. no. 101936. https://doi.org/0.1016/j.jocs.2022.101936

[2] *Moreno I. et al.* Simple method to evaluate the pixel crosstalk caused by fringing field effect in liquid-crystal spatial light modulators // Journal of the European Optical Society-Rapid Publications. 2021. Vol. 17. № 1. Art. no. 27. https://doi.org/0.1186/s41476-021-00174-7

[3] *Zalevsky Z. et al.* Gerchberg — Saxton algorithm applied in the fractional Fourier or the Fresnel domain // Optics Letters. 1996. Vol. 21. № 12. P. 842–844. https://doi.org/10.1364/OL.21.000842

[4] Открытая библиотека для проектирования дифракционных нейронных сетей SVETLANNA. URL: https://pypi.org/project/svetlanna/ (дата обращения 27.06.2025).

Solution of the inverse diffraction problem for spatial light modulators *considering* the cell structure using machine learning

S. Chugunov, S. Spiridonov, A. Shcherbakov

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

A neural network is developed that predicts the transmission function of phase-space light modulators, considering the interaction between pixels. The Fourier-modal method calculates the phase run-up of the central pixel, considering the influence of eight neighboring pixels. Using this method, a dataset containing phase overlaps for different given states of a two-dimensional structure is generated. The structure consists of nine modulator pixels arranged in a square shape. The trained model can predict the permittivity function for modulators consisting of many pixels in a short time. The model is applied to find a numerical solution to the direct diffraction problem and the problem of beam shaping of a given shape.

Keywords: *optics, spatial light modulators, machine learning, neural networks, fringing field effect*

Оптическая классификация изображений на различных длинах волн с использованием спектральных дифракционных нейронных сетей

Г.А. Мотз[1, 2], Д.В. Сошников[1, 2], Л.Л. Досколович[1, 2], Е.В. Бызов[1, 2], Е.А. Безус[1, 2], Д.А. Быков[1, 2], Н.В. Головастиков[1, 2]

[1] *Институт систем обработки изображений, НИЦ «Курчатовский институт», Самара, Россия*
[2] *Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия*

Предложен метод расчета дифракционной нейронной сети (ДНС) для решения различных задач классификации изображений на различных длинах волн. В рамках метода задача расчета ДНС формулируется как задача минимизации функционала, зависящего от функций высот микрорельефа дифракционных оптических элементов (ДОЭ), образующих ДНС, и представляющего ошибку решения заданных задач классификации на расчетных длинах волн. Для производных функционала получены явные выражения, и на этой основе сформулирован градиентный метод расчета дифракционной нейронной сети. С использованием предложенного градиентного метода рассчитаны ДНС для решения трех различных задач классификации изображений на трех длинах волн. Представленные результаты моделирования работы рассчитанных ДНС демонстрируют хорошие рабочие характеристики предложенного метода.

Ключевые слова: *задача классификации изображений, дифракционная нейронная сеть, каскадный дифракционный оптический элемент, дифракционный микрорельеф, скалярная теория дифракции, оптимизация, градиентный метод*

Введение

Применение каскадных ДОЭ для оптического решения задач машинного обучения впервые было рассмотрено в 2018 году [1]. В большинстве последующих работ расчет ДНС осуществляется для работы с излучением одной заданной длины волны. В то же время, больший исследовательский и практический интерес представляют ДНС решающие задачи классификации с применением нескольких расчетных длин волн. При этом элементы ДОЭ позволяют изменять собственную функциональность в зависимости от длины волны светового поля, падающего на данные элементы. Существует несколько работ [2, 3], исследующих использование нескольких длин волн для решения задач классификаций. Однако в данных работах многоволновое излучение использовалось исключительно для улучшения качества решения одной задачи. В связи с чем представляет интерес рассмотрение использования нескольких длин волн для решения нескольких различных задач.

Задача расчета спектральных ДНС для решения различных задач классификации

Рассмотрим задачу расчета спектральной ДНС (каскадного ДОЭ), предназначенной для решения различных задач классификации P_q, $q = 1, \ldots, Q$ на различных длинах волн λ_q, $q = 1, \ldots, Q$, так что каждая задача классификации решается на соответствующей длине волны. Будем считать, что каскадный ДОЭ состоит из n фазовых ДОЭ, расположенных в плоскостях $z = f_1, \ldots, f_n$ ($f_1 < \ldots < f_n$) и задаваемых функциями высоты дифракционного микрорельефа $h_1(\boldsymbol{u}_1), \ldots, h_n(\boldsymbol{u}_n)$, где $\boldsymbol{u}_j = (u_j, v_j)$ — декартовы координаты в плоскостях $z = f_1, \ldots, f_n$.

Опишем сначала требуемое функционирование ДНС на одной длине волны λ. Обозначим $w_{0,q,j}(\boldsymbol{u}_0)$ комплексную амплитуду светового поля объекта j-го класса задачи P_q, состоящей из N_q классов, во входной плоскости $z = 0$, сформированного плоской волной с длиной волны λ_q.

Сформированное световое поле распространяется через каскадный ДОЭ в выходную плоскость $z = f_{n+1}$. Будем считать, что распространение в свободном пространстве (между ДОЭ) описывается интегралом Френеля — Кирхгофа скалярной теории дифракции, а прохождение светового поля через ДОЭ описывается в приближении тонкого оптического элемента как умножение на функцию комплексного пропускания (ФКП) ДОЭ:

$$T_{m,q}(\boldsymbol{u}_\mathrm{m}) = \exp\{i\gamma_q h_m(\boldsymbol{u}_m)\},$$

где $\gamma_q = (2\pi / \lambda_q)(n(\lambda_q) - 1)$, $n(\lambda_q)$ — показатель преломления материала ДОЭ.

Таким образом, распространение поля через каскадный ДОЭ может быть описано следующей формулой:

$$w_{m+1,q,j}(\boldsymbol{u}_m) = C_{q,m+1} \iint w_{m,q,j}(\boldsymbol{u}_m) T_{m,q}(\boldsymbol{u}_m) \exp\left\{i \frac{\pi}{\lambda_q d_{m+1}} (\boldsymbol{u}_{m+1} - \boldsymbol{u}_m)\right\} d^2\boldsymbol{u}_m,$$

$$m = 0, \ldots, n,$$

где $C_{q,m} = (i\lambda_q d_m)^{-1} \exp\{i2\pi d_m / \lambda_q\}$, $d_{m+1} = f_{m+1} - f_m$ — расстояния между плоскостями. $T_{0,q}(\boldsymbol{u}_0) \equiv 1$.

Пусть в выходной плоскости заданы N_q пространственно разделенных «целевых областей» $G_{q,k}$, $k = 1, \ldots, N_q$, соответствующих N_q различным классам задачи P_q. При каждом входном изображении в данных областях формируется распределение «энергий» $E_{q,k}$, $k = 1, \ldots, N_q$, соответствующее интегралам от сформированного распределения интенсивности $I_{n+1,q,j}(\boldsymbol{u}_{n+1}) = |\, w_{n+1,q,j}(u_{n+1})\,|^2$ по данным областям:

$$E_{q,k} = \iint I_{n+1,q,j}(u_{n+1})\chi_{q,k}(\boldsymbol{u}_{n+1})d^2\,\boldsymbol{u}_{n+1}, k = 1, \ldots, N_q,$$

где $\chi_{q,k}(\boldsymbol{u}_{n+1})$ — индикаторная функция множества $G_{q,k}$. Для решения задачи классификации P_q требуется, чтобы при «входном сигнале» $w_{0,q,j}(\boldsymbol{u}_0)$, соответствующем изображению объекта j-го класса, каскадный ДОЭ формировал такое распределение интенсивности в выходной плоскости, для которого максимум из формируемых энергий $E_{q,k}$ достигается в соответствующей целевой области $G_{q,k}$ [1].

Следовательно, задача состоит в расчете таких функций микрорельефа $h_0(\boldsymbol{u}_0)$, …, $h_n(\boldsymbol{u}_n)$ каскадного ДОЭ, что при любом входном сигнале, соответствующем изображению объекта задачи P_q, формируемом при длине волны λ_q, в выходной плоскости формируется распределение светового поля, для которого максимум энергии достигается в целевой области.

Градиентный метод расчета спектральных ДНС

Для решения описанной задачи расчета каскадного ДОЭ будем использовать стохастический градиентный метод. Пусть ошибка формирования заданного распределения энергий представляется следующим квадратичным функционалом:

$$\varepsilon_{q,j}(h_1, \ldots, h_n) = \sum_{k=1}^{N_q}\left(E_{q,k} - E_{\max}\delta_{k,j}\right)^2 \to \min_{h_1,\ldots,h_n}, \quad (1)$$

где $E_{\max}$ — требуемое значение энергии в целевой области, $\delta_{k,j}$ — символ Кронекера.

Производная для (1) по функционалу $h_1(\boldsymbol{u}_1)$, …, $h_n(\boldsymbol{u}_n)$ будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial\varepsilon_{q,j}(h_1,\ldots,h_n)}{\partial h_m} = -2\gamma_q \mathrm{Im}\left[w_{m,q,j}(\boldsymbol{u}_m)T_{m,q}(\boldsymbol{u}_m)F^*_{m,q,j}(\boldsymbol{u}_m)\right],$$

где $F_{m,q,j}(\boldsymbol{u}_m)$ — поле ошибки в плоскости $z = f_m$, полученного обратным распространением

$$F_{n+1,q,j}(\boldsymbol{u}_{n+1}) = 2w_{n+1,q,j}(\boldsymbol{u}_{n+1})\sum_{k=1}^{N_q}\chi_{q,k}(\boldsymbol{u}_{n+1})\left(E_{q,k} - E_{\max}\delta_{k,j}\right).$$

Отметим, что при расчете каскадного ДОЭ функции высот дифракционного микрорельефа $h_1(\boldsymbol{u}_1)$, …, $h_n(\boldsymbol{u}_n)$ обычно предполагаются заданными в некотором интервале $[0, h_{\max})$, где $h_{\max}$ — максимальная высота дифракционного микрорельефа, используемая при изготовлении ДОЭ.

Примеры расчета спектральных ДНС

Приведем пример рассчитанной спектральной ДНС, состоящей из каскада двух ДОЭ и решающей три задачи классификации изображений из стандартных наборов данных: P_1 — MNIST ($\lambda_1 = 457$ нм); P_2 — FashionMNIST ($\lambda_2 = 532$ нм); P_3 — EMNIST, алфавит от A до J ($\lambda_3 = 633$ нм).

При расчете ДНС использовались следующие параметры. Входные изображения задавались на сетке 56×56 отсчетов с шагом 10 мкм. Расстояния между расчетными плоскостями считались одинаковыми $d_m = 160$ мм, $m = 1, \ldots, n+1$. Функции высоты микрорельефа ДОЭ задавались на сетках 512×512 с шагом 10 мкм. Максимальная высота дифракционного микрорельефа составляла $h_{\max} = 6$ мкм. Показатели преломления соответствуют показателю преломления плавленого кварца на расчетных длинах волн $n(\lambda_1) = 1{,}465$, $n(\lambda_2) = 1{,}461$, $n(\lambda_3) = 1{,}457$. Целевые области соответствуют квадратам с размером стороны 0,25 мм. Вычисления производных функций ошибок выполнялись численно с помощью метода углового спектра [4].

Для рассчитанной ДНС получены рабочие характеристики: общая точность классификации (accuracy) и минимальный контраст, вычисляемый по следующей формуле:

$$K_{\min,q} = \min_j \frac{\bar{E}_{q,j,j} - \max_{k\neq j}\bar{E}_{q,j,k}}{\bar{E}_{q,j,j} + \max_{k\neq j}\bar{E}_{q,j,k}}.$$

В левой части таблицы приведены общие точности классификации и значения минимального контраста для спектральной ДНС из каскада двух ДОЭ. В правой части таблицы приведены рабочие характеристики «обычной» ДНС, решающей три задачи классификации, но при одной длине волны. Данная ДНС были рассчитана градиентным методом при длине волны $\lambda_1 = 457$ нм и при указанных выше параметрах.

Общая точность и минимальный контраст для рассчитанной спектральной ДНС, состоящей из каскада двух ДОЭ, а также ДНС, состоящей из каскада двух ДОЭ, работающей на одной фиксированной длине волны

Задачи классификации	**Спектральные ДНС**			**ДНС, работающие при фиксированной длине волны 457 нм**	
	Длина волны (нм)	**Общая точность (%)**	**Мин. контраст**	**Общая точность (%)**	**Мин. контраст**
P1 (MNIST)	457	97,85	0,17	95,19	0,19
P2 (Fashion MNIST)	532	87,06	0,11	86,73	0,10
P3 (EMNIST)	633	93,08	0,12	88,78	0,14

Отметим, что достигнутые точности классификации являются высокими и превышают значения, приведенные в других работах [1, 5, 6] для ДНС, работающих на одной длине волны.

Заключение

Рассмотрено решение нескольких различных задач классификации изображений на нескольких различных длинах волн с помощью спектральной ДНС, состоящей из набора фазовых ДОЭ. Для расчета спектральной ДНС разработан градиентный метод. В рамках метода задача расчета ДНС сформулирована как задача минимизации функционала, зависящего от функций высот дифракционного микрорельефа ДОЭ, образующих ДНС, и представляющего ошибку решения заданных задач классификации на расчетных длинах волн. Для производных функционала получены явные и компактные выражения. С использованием предложенного градиентного метода рассчитаны спектральные ДНС для решения трех задач. Представленные результаты расчета и моделирования спектральных ДНС демонстрируют их хорошие рабочие характеристики и подтверждают хорошую работоспособность предложенного метода.

Благодарность

Исследование было выполнено за счет средств государственного задания в сфере научной деятельности (проект FSSS-2024-0016) в части создания программных средств для численного моделирования работы каскадных ДОЭ и за счет средств гранта РНФ (проект № 24-19-00080) в части разработки градиентного метода расчета спектральных ДНС.

Список источников

[1] *Lin X. et al.* All-optical machine learning using diffractive deep neural networks // Science. 2018. Vol. 361. № 6406. P. 1004–1008. https://doi.org/10.1126/science.aat8084

[2] *Shi J. et al.* Broad-spectrum diffractive network via ensemble learning // Optics Letters. 2022. Vol. 47. № 3. P. 605–608. https://doi.org/10.1364/OL.440421

[3] *Feng J. et al.* Multi-wavelength diffractive neural network with the weighting method // Optics Express. 2023. Vol. 31. № 20. P. 33113–33122. https://doi.org/10.1364/OE.499840

[4] *Schmidt J.D. et al.* Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with Examples in MATLAB. Bellingham: SPIE, 2010. 212 p.

[5] *Zhou T. et al.* In situ optical backpropagation training of diffractive optical neural networks // Photon Res. 2020. Vol. 8. № 6. P. 940–953. https://doi.org/10.1364/PRJ.389553

[6] *Chen H. et al.* Diffractive deep neural networks at visible wavelengths // Engineering. 2021. Vol. 7. № 10. P. 1483–1491. https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.032

Optical classification of images at different wavelengths using spectral diffractive neural networks

G.A. Motz[1, 2], D.V. Soshikov[1, 2], L.L. Doskolovich[1, 2], E.V. Byzov[1, 2], E.A. Bezus[1, 2], D.A. Bykov[1, 2], N.V. Golovastikov[1, 2]

[1] *Image Processing Systems Institute, NRC "Kurchatov Institute", Samara, Russia*
[2] *Samara National Research University, Samara, Russia*

A diffractive neural network (DNN), consisting of a sequence of phase diffractive optical elements (DOEs), is used to solve several different image classification problems at various wavelengths. The DNN design is formulated as a minimization problem, involving functions of the DOE microrelief heights, which represent classification errors at the operating wavelengths. Explicit expressions for the functional derivatives are derived, resulting in a gradient-based method for calculating the DNN's parameters. Simulations demonstrate that the calculated DNN effectively solves three different classification problems at three different wavelengths, confirming the effectiveness of the proposed method.

Keywords: *image classification problem, diffractive neural network, cascaded diffractive optical element, diffractive microrelief, scalar diffraction theory, optimization, gradient method*

Содержание

Пленарные доклады «Тенденции развития оптических технологий»

1. Интегральные устройства на платформе КНИ. *Драчев В.П.* 9
2. Оптические квантовые вычисления в дискретных переменных. *Вашукевич Е.А., Леонов В.А., Сурмай Р., Башмакова Е.Н., Голубева Т.Ю.* 10
3. Тенденции в развитии сенсибилизаторов фотополимерных материалов. *Шелковников В.В.* 12
4. Голографическое TV и 3D-дополненная реальность в зеркале ГОЛОЭКСПО. *Шойдин С.А.* 13

Секция 1. Дифракционные и градиентные оптические элементы и системы

5. Компактное устройство для коллимации лазерного пучка для межспутниковой связи на основе дифракционных оптических элементов. *Ханенко Ю.В., Скиданов Р.В., Пронин И.С.* 19
6. Метод опорных квадрик в задаче синтеза дифракционных оптических элементов в приближении скалярной теории дифракции. *Сошников Д.В., Досколович Л.Л., Мингазов А.А., Безус Е.А., Быков Д.А.* 22
7. Метод формирования гиперспектральных слоев на основе набора изображений, сформированных матрицей гармонических линз. *Пронин А.С., Скиданов Р.В., Успленьев Г.В., Подтихова С.С.* 27
8. Оптические элементы для реализации логических операций в свободном пространстве. *Сорокин Д.М., Досколович Л.Л., Скиданов Р.В.* 30
9. Оптические линии задержки на основе дифракционных оптических элементов. *Подтихова С.С., Скиданов Р.В., Успленьев Г.В.* 33
10. Определение угловых координат точечного светящегося объекта с использованием дифракционных оптических элементов. *Морозов А.Е., Скиданов Р.В., Пронин А.С., Сорокин Д.М., Ханенко Ю.В., Фомченков С.А., Овчинников К.В.* 36
11. Современные аддитивные технологии в оптике. *Грейсух Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г.* 38
12. Метод создания фазовых голограмм через предварительно итеративно вычисляемые функции модуляции для эффективного структурирования света. *Ревякин А.А., Гервазиев М.Д., Харенко Д.С.* 41
13. Дифракционная эффективность двухслойных двухрельефных микроструктур при перепаде температур. *Грейсух Г.И., Антонов А.И.* 44
14. Зависимости нагрузочной добротности от ширины волновода микрокольцевого резонатора и gap. *Кузьминых И.О., Кузин А.Ю., Флоря И.Н., Ан П.П., Ковалюк В.В., Чулкова Г.М., Гольцман Г.Н.* 49

Секция 2. Оптика лазерных пучков и структурированного света

15. Геометрия траекторий структурированных пучков Лагерра — Гаусса на орбитальной сфере Пуанкаре: экспериментальный подход. *Брецько М.В., Воляр А.В., Акимова Я.Е.* 57
16. Влияние нулевого порядка дифракции на бесселевы пучки, сформированные спиральными бинарными фазовыми аксиконами. *Осинцева Н.Д., Николаев Н.А.* 61
17. Использование отражающих аксиконов для создания терагерцевых бесселевых пучков. *Баздырев Н.А., Герасимов В.В., Павельев В.С., Агафонов А.Н., Тукмаков К.Н.* 64
18. Топологические свойства мод петлевых дефектов в двумерных фотонных кристаллах. *Смолина Е.О.* 66
19. Самовосстановление поляризационной структуры векторных пучков света при секторном возмущении. *Якубов С.И., Брецько М.В., Халилов С.И., Акимова Я.Е.* 68
20. Преобразование поляризационной структуры векторного структурированного пучка света при астигматическом преобразовании. *Халилов С.И., Брецько М.В., Якубов С.И., Акимова Я.Е., Воляр А.В.* 72
21. Фурье-модальный метод с аналитическими кусочно-непрерывными функциями для эффективного анализа дифракции на одномерных решетках с произвольными профилями. *Спиридонов С.И., Щербаков А.А.* 75
22. Влияние аберраций волнового фронта на ФРТ при острой фокусировке для различных типов поляризации. *Хорин П.А., Ивлиев Н.А., Черных А.В., Хонина С.Н.* 78
23. Перестраиваемый генератор оптических вихрей на основе кубических уголковых отражателей. *Решетников Д.Д., Рыжая А.А., Павелина М.Е., Юрьева Е.К., Севрюгин А.А., Соколов А.Л., Петров В.М., Венедиктов В.Ю.* 81
24. Голографический датчик волнового фронта. *Горелая А.В., Масыгин Д.В., Рыжая А.А., Юрьева Е.К.* 84

Секция 3. Системы визуализации и отображения информации для AR/VR

25. Нейрофизиологические и оптические аспекты восприятия AR: от конфликта к комфорту. *Шаров Д.Д., Стафеев С.К., Алексеев А.М., Алексеев Е.М.* 89
26. Асимметричные схемы мультипликации выходного зрачка HMD систем. *Путилин А.Н., Копенкин С.С., Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Бородин Ю.П.* 92
27. Исследование аберраций в оптических схемах с волноводным распространением излучения: ограничения и возможные преимущества волноводной голографии. *Путилин Н.А., Дубынин С.Е., Путилин А.Н., Копенкин С.С., Бородин Ю.П.* 95

Секция 4. Оптические защитные технологии

28. Нанофотонные физически неклонируемые защитные метки: создание, оптические свойства и протоколы считывания. *Кустов П.Н., Сандомирский М.П., Петрова Е.А., Зуев Д.А.* 103

Секция 5. Интегральная фотоника

29. Поляризующие интегрально-оптические волноводы на основе тонкопленочного ниобата лития. *Булатова А.В., Москалев Д.Н., Козлов А.А., Журавлев В.А., Ветошкин М.А., Вобликов Е.Д., Салгаева У.О., Криштоп В.В.* 107
30. Отожженные протонообменные волноводы в смешанных кристаллах твердого раствора ниобата-танталата лития. *Сосунов А.В., Корнилицын А.Р., Паньков А.С., Пономарев Р.С., Москалев Д.Н., Вобликов Е.Д., Мололкин А.А., Фахртдинов Р.Р., Савельев Е.Д., Ахматханов А.Р., Шур В.Я., Кунева М.* 109
31. Исследование оптического эффекта самовоздействия в гибридных наноструктурах типа металл-полупроводник. *Ларин А.О., Агеев Э.И.* 111
32. Многоуровневое переключение фазоизменяемой ячейки в интегральной фотонной схеме. *Невзоров А.А., Проходцов А.И., Ковалюк В.В., Лазаренко П.И., Голиков А.Д., Козюхин С.А., Гольцман Г.Н.* 113
33. Узкополосный лазерный источник на основе РОС-лазера с интегральным кремниевым кольцевым резонатором. *Вергулес А.И., Земцов Д.С., Земцова А.К., Смирнов А.С., Жигунов Д.М., Гарбузов К.Н., Косолобов С.С., Драчев В.П., Фотиади А.А., Иванов А.В., Ладугин М.А., Кицюк Е.П., Светухин В.В.* 117
34. Излучающие свойства топологических дефектов в фотонных кристаллах, сформированных на кремниевых структурах с наноостровками Ge(Si). *Смолина Е.О., Перетокин А.В., Чуприн И.А., Степихова М.В., Шалеев М.В., Родякина Е.Е., Шенгуров Д.В., Новиков А.В.* 120
35. Волоконные лазеры на основе эффектов захвата частоты. *Паняев И.С., Итрин П.А., Рибенек В.А., Коробко Д.А., Фотиади А.А.* 123

Секция 6. Интерферометрия и оптическая метрология

36. Спектральная интерферометрия: от классической к квантовой и далее к квантово-вдохновленной. *Маковецкая Т.А., Хунцюнь Ю., Маркварт А.А., Ушаков Н.А.* 127
37. Исследование процесса регистрации спекл-интерферограмм вибрирующего объекта при использовании цифровой камеры с кольцевой апертурной диафрагмой. *Ивченко А.В., Жужукин А.И., Сергеев Р.Н.* 129
38. Эффект одновременного получения теневой, шлирен и интерферометрической фотографии при применении классических фотоматериалов для голографической интерферометрии плазмы. *Павлов А.В.* 132
39. Особенности и преимущества интерферометрического контроля асферических поверхностей с применением компьютерно-синтезированных голограмм. *Куц Р.И., Корольков В.П., Белоусов Д.А.* 135
40. Интерферометрия приповерхностных слоев, возникающих при светоэрозии материалов. *Павлов А.В., Протасов Ю.Ю., Телех В.Д.* 137
41. Метрологическое обеспечение средств измерений коэффициента передачи модуляции объективов. *Вишняков Г.Н.* 139
42. Возможности применения спекл-интерферометрии при доводке конструкций турбомашин. *Жужукин А.И., Шарафутдинова О.Г., Репкин И.Е.* 141
43. Исследование поля поверхностных волн на металлических и углеродсодержащих пленках в терагерцевом диапазоне. *Кукотенко В.Д., Герасимов В.В., Ванда В.С., Лемзяков А.Г., Иванов А.И., Красников Д.И., Рагинов Н.И., Никитин А.К.* 143
44. Экспериментальные исследования двухволнового лазерного интерферометра. *Лавров Е.А.* 148

Секция 7. Квантовые оптические технологии

45. Квантовая коррекция ошибок в непрерывных переменных. *Голубева Т.Ю., Башмакова Е.Н., Королев С.Б.* 153
46. Применение сжатых состояний Фока в квантовых кодах коррекции ошибок. *Башмакова Е.Н., Голубева Т.Ю., Королев С.Б.* 155
47. Экспоненциальное сужение линий Рэмси-резонанса в оптически плотной резонансной среде. *Моисеев С.А., Герасимов К.И., Миннегалиев М.М., Брекоткин И.В., Моисеев Е.С.* 157
48. Исследование криптографической стойкости протокола квантовой криптографии на основе пучков с аксиально-симметричной поляризационной структурой. *Решетников Д.Д., Вашукевич Е.А.* 158
49. Реалистичная атака с безошибочными измерениями на системы КРК. *Сущев И.С., Бугай К.Е., Булавкин Д.С., Сидельникова А.С., Бондарь К.Д., Вахрушева В.М., Мелконян Д.М., Дворецкий Д.А.* 160
50. Параметрическая генерация многомодового сжатого излучения при наличии дисперсии внутри резонатора. *Тихонов К.С., Малышев Д.М., Аверченко В.А.* 163
51. Нелинейные сегнетоэлектрические кристаллы титанил-фосфата калия. *Шандаров С.М., Мельник К.П., Тик А.А., Кулешов Ю.В., Дю В.Г., Савченков Е.Н., Буримов Н.И., Ахматханов А.Р., Чувакова М.А., Шур В.Я.* 166
52. Квантовое моделирование химической связи с помощью атомов-бозонов в оптических решетках. *Мороз Н.А., Тихонов К.С., Герасимов Л.В., Манухова А.Д., Бобров И.Б., Страупе С.С., Куприянов Д.В.* 167

53. Оптимизация импульсов управляющего излучения для выполнения перепутывающих квантовых логических операций в системах нейтральных атомов. *Усольцев А.С., Герасимов Л.В., Куприянов Д.В., Тихонов К.С., Страупе С.С.* 169
54. Исследование свойств мультимодовых интерферометров из нитрида кремния при криогенных температурах. *Лебедева Е.С., Венедиктов И.О., Коровин В.А., Кобцев Д.М., Голиков А.Д., Ан П.П., Ковалюк В.В., Гольцман Г.Н.* 172
55. Характеристики сверхпроводникового однофотонного детектора под воздействием радиочастотного поля поверхностной ионной ловушки. *Седых К.О., Сулеймен Е., Святодух С.С., Ан П.П., Голиков А.Д., Ковалюк В.В., Гольцман Г.Н.* 175
56. Создание оптических котов Шредингера с управляемым сжатием с помощью светоделителя и негауссовых ресурсных состояний: состояния кубической фазы и состояния Фока. *Баева А.В., Лосев А.С., Соколов И.В.* 177
57. Метод временной синхронизации для сеансов спутниковой квантовой связи. *Чернов А.Н., Хмелев А.В., Курочкин В.Л.* 179
58. Использование машинного обучения для управления линейным оптическим интерферометром. *Кузьмин С.С., Дьяконов И.В., Страупе С.С.* 181
59. Построение собственных мод оптического параметрического генератора при наличии дисперсии групповых скоростей. *Малышев Д.М., Тихонов К.С., Аверченко В.А.* 184
60. Описание временной эволюции негауссовых квантовых состояний света с помощью кумулянтов. *Луна Веронико Х.К.Б., Тихонов К.С.* 186
61. Сравнение полуклассической и квантовой схем генерации случайных чисел для использования в фундаментальных тестах и приложениях. *Кретова А.А., Решетников Д.Д., Фоминова А.А., Тихонов К.С.* 189
62. Влияние параметров лазерного излучения на вероятность переизлучения однофотонного лавинного фотодиода. *Сидельникова А.С., Бондарь К.Д., Бугай К.Е., Булавкин Д.С., Вахрушева В.М., Лохматов Р.Ю., Мелконян Д.М., Сущев И.С., Зызыкин А.П., Дворецкий Д.А.* 191
63. Перепутывающие двухкудитные операции в протоколе квантового неразрушающего взаимодействия многомодового света и атомного ансамбля. *Сурмай Р., Леонов В.А., Вашукевич Е. А.* 194

Секция 8. Технологии микро- и наноструктурирования

64. Алмазная дифракционная оптика ТГц диапазона. *Комленок М.С., Кононенко Т.В., Павельев В.С., Князев Б.А., Командин Г.А., Ральченко В.Г., Конов В.И.* 199
65. Процессы структурирования высокоразрешающих материалов, свойства и применение структурированных элементов. *Ворзобова Н.Д.* 204
66. Развитие метода контроля формы крупногабаритных асферических зеркал на основе применения цилиндрических рельефно-амплитудных синтезированных голограммных оптических элементов. *Лукин А.В., Мельников А.Н.* 206
67. Гибкие дифракционные оптические элементы на основе лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур для оптических датчиков деформаций. *Васильев М.Д., Синев Д.А.* 209
68. Запись волноводов в объеме плавленого кварца с помощью ультракоротких лазерных импульсов. *Рупасов А.Е., Кудряшов С.И., Богацкая А.В.* 212
69. Инновационные подходы к лазерной защите металлов от химического и биологического воздействия. *Давыдова Е.А., Михалевич М.А., Суслов Р.Р., Москвин М.К., Романова Г.В.* 215
70. Исследование формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на никеле при наносекундном воздействии. *Москвин М.К., Мартиросян Г.А., Учанова Д.Д., Долгополов А.Д.* 217
71. Шаблонный синтез для получения упорядоченных массивов магнитоплазмонных нанопроволок. *Кожина Е.П., Бедин С.А., Долуденко И.М., Косолобов С.С., Драчев В.П.* 219

Секция 9. Цифровая голография и методы визуализации

72. Регистрация и визуализация многомодового колебательного процесса методом прямого фазового восстановления во времени в цифровой голографической интерферометрии. *Алексеенко И.В., Кожевникова А.М.* 223
73. Исследование амплитудно-фазовой поляризационной анизотропии пленок ZnO:Ag методом цифровой голографии. *Черных А.В., Гресько В.Р., Езерский А.С., Резцов Т.В., Циплакова Е.Г., Сергеев М.М., Петров Н.В.* 226
74. Метод синтеза бинарных дифракционных оптических элементов с адаптивным применением прямого поиска. *Овчинников А.С., Черемхин П.А., Шифрина А.В.* 229
75. Особенности применения ИИ для анализа изображений частиц, восстановленных из цифровых голограмм. *Демин В.В., Курков М.М., Калайда В.Т.* 231
76. Фурье спектроскопия планктонных концентраций по данным in situ цифрового голографического мониторинга. *Демин В.В., Куркова Д.В., Половцев И.Г., Давыдова А.Ю.* 234
77. Метрики для оценки качества изображений восстановленных из голограмм. *Баландин Е.К., Черемхин П.А., Козлов А.В., Евтихиев Н.Н.* 237
78. Технология измерений и визуализации микрометровых дефектов методом двухдлинноволновой цифровой голографии. *Сементин В.В., Гавриш М.В., Розанов П.К., Прохорова У.В., Погода А.П., Борейшо А.С.* 240
79. Исследование топологических структур в хиральных нематических жидких кристаллах в реальном времени методом поляризационной цифровой голографии. *Резцов Т.В., Черных А.В., Петров Н.В., Орлова Т.* 243

Секция 10. Современные функциональные оптические материалы

80. Сенсибилизация голографических фотополимерных материалов комплексами с переносом заряда. *Шелковников В.В., Деревянко Д.И., Орлова Н.А., Бардин В.В.* 247
81. Фазовая модуляция света в пространственных модуляторах на основе сегнетоэлектрических и ферриэлектрических жидких кристаллов. *Котова С.П., Пожидаев Е.П., Самагин С.А.* 248
82. Объединение технологий фото-термо-индуцированной кристаллизации и ионного обмена для создания фотонных интегральных устройств на основе ФТР стекла. *Никоноров Н.В., Попова В.А., Сгибнев Е.М., Песняков В.В., Алексеев А.М., Алексеев Е.М.* 251
83. Голографический спекл-экран в фото-термо-рефрактивном стекле. *Гавриш М.В., Розанов П.К., Погода А.П., Никоноров Н.В.* 253
84. Особенности спектров фотолюминесценции легированных кристаллов фосфида галлия. *Скворцова А.А., Каленков С.Г.* 256
85. Алмазная ТГц антенна. *Комленок М.С., Кононенко В.В., Кононенко Т.В., Ушаков А.А., Большаков А.П.* 259
86. Газогирохромизм оксидированных нанопленок пермаллоя. *Куликова Д.П., Афанасьев К.Н., Барышев А.В.* 261
87. Гибридный фоторезистивный материал на основе гидролитически устойчивых тиол-силоксановых олигомеров. *Деревянко Д.И., Шелковников В.В.* 264
88. Органические фототранзисторы на основе полииндола и пирролидинофуллерена: структура и вольтамперные характеристики. *Салихов Р.Б., Остальцова А.Д., Муллагалиев И.Н., Салихов Т.Р.* 266
89. Материал «Диффен» за границами стандартных условий получения голограмм. *Андреева О.В., Парамонов А.А., Андреева Н.В., Сизова С.А.* 268
90. Фторфосфатные стекла с квантовыми точками сульфидов и селенидов свинца для лимитеров фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона. *Асеев В.А., Никоноров Н.В., Цыпкин А.Н., Колобкова Е.В., Исмагилов А.О., Опарин Е.Н.* 272
91. Оптическое устройство на основе MAX-фазы и способ определения остаточной MAX-фазы в максенах. *Сюй А.В., Арсенин А.В., Волков В.С.* 275
92. Перенос энергии электронного возбуждения между молекулами органических красителей и бактериородопсином. *Лантух Ю.Д.* 277
93. Оптические особенности голограмм китайских магических зеркал. *Шаров Д.Д., Стафеев С.К., Анисимова Н.Г., Вавилова Ю.А.* 280
94. Ag и Mn-содержащие фотокаталитические наноматериалы системы $ZnO\text{-}ZnAl_2O_4$ для экологических приложений. *Евстропьев С.К., Шелеманов А.А., Полищук Г.С., Гаврилова Д.А., Никоноров Н.В., Дукельский К.В.* 283
95. Влияние фото-термо-индуцированной кристаллизации на ионный обмен в фото-термо-рефрактивном стекле. *Попова В.А., Никоноров Н.В., Сгибнев Е.М., Песняков В.В.* 285
96. Синтез и свойства наночастиц диселенида вольфрама, полученных методами фемтосекундной лазерной абляции и фрагментации в жидкости. *Дюбо Д., Ушков А., Белозерова Н., Сюй А., Новиков С., Большаков А.Д., Арсенин А., Волков В., Целиков Г.И.* 288

Секция 11. Биофотоника

97. Оптические когерентные методы в диагностике сахарного диабета и его осложнений. *Тучин В.В., Сурков Ю.И., Харченко А.А., Серебрякова И.А., Тимошина П.А., Тучина Д.К., Генина Э.А.* 293
98. Конфокальный голографический сканирующий микроскоп на базе Olympus и его применение в биомедицинской оптике. *Захаров Ю.Н.* 295
99. Резонансные наноструктуры для нанофотонных биосенсоров. *Зуев Д.А.* 298
100. Гибридные плазмонные наноалмазы для оптического нагрева и контроля температуры в биологических объектах. *Зюзин М.В., Герасимова Е.Н., Михайлова Л.В.* 300
101. Оптотермические пинцеты для биомедицинских применений. *Майорова А.М., Котова С.П., Лосевский Н.Н., Самагин С.А., Урюпина В.К., Горбунов Н.А.* 303
102. Особенности отклика клеток на фотодинамическое воздействие с протопорфирином IX. *Белашов А.В., Жихорева А.А., Горбунова И.А., Сасин М.Э., Бельтюкова Д.М., Горбенко Д.А., Белашов М.В., Семенова И.В., Васютинский О.С.* 305
103. Мультимодальный подход к фототерапии рака. *Генина Э.А., Бучарская А.Б., Генин В.Д., Наволокин Н.А., Шушунова Н.А., Иноземцева О., Сафронов Д.В., Хлебцов Б.Н., Тучин В.В.* 310
104. Исследование оптического просветления *in-vivo* в условиях развития экспериментального диабета 1 типа методами ОКТ и спекл-визуализации. *Тимошина П.А., Ковалев А.Д., Сыров М.В., Сурков Ю.И., Тучин В.В.* 312
105. Исследование процесса гликирования коллагена методом многоволновой рефрактометрии. *Лазарева Е.Н., Тучин В.В.* 316
106. Лазерная спекл-контрастная визуализация с анализом главных компонент: новый подход к оценке кровотока, не зависящей от глубины. *Сурков Ю.И., Серебрякова И.А., Фащевский А.П., Тимошина П.А., Генина Э.А., Тучин В.В.* 318
107. Применение оптического просветления для повышения информативности мультимодального метода скрининга новообразований кожи. *Серебрякова И.А., Сурков Ю.И., Генина Э.А., Кузинова Я.К., Конопацкова О.М., Тучин В.В.* 321
108. Система поддержки принятия врачебных решений в цифровой диафаноскопии верхнечелюстных пазух с применением сверточных нейронных сетей. *Брянская Е.О., Герасин Д.В., Бакотина А.В., Овчинников А.Ю., Николаева Ю.О., Масленникова А.В., Дремин В.В., Дунаев А.В.* 324

109. Оценка острой и хронической токсичности наносенсибилизатора в зависимости от доз введения различным животным. *Лазарева Е.Н., Мыльников А.М., Наволокин Н.А., Янина И.Ю.* 326
110. Оценка тканевых эффектов при имплантации углерод–углеродных композитов методом МРТ. *Зайцев П.Е., Скрябин А.С., Шакуров А.В., Жердева В.В.* 329
111. Исследование липидных рафтов с помощью биосенсора на основе фотонных интегральных схем. *Флоря И.Н., Андриевская И.А., Устинов Е.М., Кузин А.Ю., Голиков А.Д., Галанова В.С., Кобцев Д.М., Ковалюк В.В., Гольцман Г.Н.* 332
112. MIP и 1T МРТ в анализе повреждений головного мозга у мышей линии C57BL/6 в купризоновой модели рассеянного склероза. *Володина В.Н., Зайцев П.Е., Жердева В.В.* 336
113. Оптическое просветление, флуоресцентный имиджинг и МРТ в детекции индивидуальных тканевых эффектов при резорбции полиэфирных сополимерных материалов биомедицинского назначения. *Лихов А.Р., Тучин В.В., Жердева В.В.* 338

Секция 12. Оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации

114. Фазовый ввод информации в 4F системе. *Скиданов Р.В., Ханенко Ю.В., Морозов А.Е., Пронин А.С., Сорокин Д.М., Досколович Л.Л.* 343
115. Вычислительный дифракционный метод регистрации и компенсации фазовых искажений в когерентных оптических системах. *Марков З.С., Миниханов Т.З., Злоказов Е.Ю.* 346
116. Метод подавления интерференционных замираний в волоконно-оптических когерентных фазочувствительных рефлектометрах. *Хан Р.И., Миниханов Т.З., Сидельников Г.Б., Грищенко Т.В., Пнев А.Б.* 349
117. Формирование голографических изображений в системах дополненной реальности на основе голограммного перископа. *Гататдинов Т.А., Злоказов Е.Ю.* 352

Секция 13. Новые прикладные оптические технологии

118. Экспериментальные исследования погрешности стабилизации линии визирования оптико-электронных систем наблюдения. *Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Чехов М.А., Чиванов А.Н., Рыжова В.А.* 357
119. Рефрактометры с температурной компенсацией на основе межмодовых волоконно-оптических интерферометров. *Маркварт А.А., Завалишина Л.Д., Зарипов А.Э., Лиокумович Л.Б., Ушаков Н.А.* 359
120. Особенности применения спектральных систем контроля при изготовлении интерференционных фильтров для ИК диапазона. *Тропин А.Н.* 363
121. Применение спектроскопии комбинационного рассеяния для анализа состава газовой смеси. *Шелаев А.В., Барышев А.В.* 367
122. Оптические и не оптические методы диагностики и контроля нового поколения. *Владимиров А.П.* 369
123. Опыт получения и применения в серийном оптическом производстве комбинированных оптических элементов на основе прецизионного реплицирования с использованием малоусадочных полимерных композиций холодного отверждения. *Ахметов М.М., Бордюжа Л.В., Гурин Н.А., Косковский С.В., Лисова Е.Г., Лукин А.В., Мельников А.Н., Мирханов Н.Г., Могилюк И.А., Нурмухаметов Д.Р., Самойлов И.В., Скочилов А.Ф., Яковлев О.Б.* 372
124. Оптоэлектронный осциллятор как ключевой компонент передовых сенсорных и инфокоммуникационных систем. *Воронков Г.С., Степанов И.В., Иванов В.В.* 374
125. Интеграция фотонных устройств в бортовые навигационные комплексы: архитектуры, модели ошибок и электромагнитная совместимость. *Чекунов И.В., Ермаков В.И., Юрьева Е.К.* 377

Секция 14. Нейросетевые технологии в фотонике

126. Применение архитектуры типа трансформер для решения задачи детекции объектов в мультимодальных данных сенсоров беспилотных авто. *Таламанова А.В., Злоказов Е.Ю.* 383
127. Оперативный синтез компьютерных голограмм 3D-сцен с использованием нейронных сетей. *Рымов Д.А., Гататдинов Т.А., Шифрина А.В., Злоказов Е.Ю., Черемхин П.А., Стариков Р.С.* 386
128. Набор процедурно генерируемых биологических клеток для обучения нейронных сетей в цифровой голографии. *Свистунов А.С., Рымов Д.А., Стариков Р.С., Черемхин П.А., Евтихиев Н.Н.* 389
129. Библиотека для моделирования и оптимизации систем дифракционной оптики, оптических вычислителей и дифракционных нейросетей с открытым исходным кодом. *Чугунов С.С., Игошин В.Д., Сахно Д.И., Кохановский А.Ю., Щербаков А.А.* 391
130. Решение обратной задачи дифракции для пространственных модуляторов света с учетом структуры ячейки с помощью машинного обучения. *Чугунов С.С., Спиридонов С.И., Щербаков А.А.* 392
131. Оптическая классификация изображений на различных длинах волн с использованием спектральных дифракционных нейронных сетей. *Мотз Г.А., Сошников Д.В., Досколович Л.Л., Бызов Е.В., Безус Е.А., Быков Д.А., Головастиков Н.В.* 395

Научное издание

ХОЛОЭКСПО 2025

XXII Международная конференция
по голографии и прикладным оптическим технологиям

(Уфа, 8–12 сентября 2025 года)

Тезисы докладов

Художник *Э.Ш. Мурадова*

Компьютерная верстка *Г.Ю. Молотковой*

Оригинал-макет подготовлен

в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 14.10.2025. Формат 210 × 297.
Усл. печ. л. 50,5. Тираж 20 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

press@bmstu.ru

https://press.bmstu.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

В сборнике представлены тезисы докладов XXII Международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям ХОЛОЭКСПО 2025 (Уфа, 8–12 сентября 2025 г.) по следующим тематикам: тенденции развития оптических технологий, дифракционные и градиентные оптические элементы и системы, оптика лазерных пучков и структурированного света, системы визуализации и отображения информации для AR/VR, оптические защитные технологии, интегральная фотоника, интерферометрия и оптическая метрология, квантовые оптические технологии, технологии микро- и наноструктурирования, цифровая голография и методы визуализации, современные функциональные оптические материалы, биофотоника, новые прикладные оптические технологии, оптико-цифровые информационные системы и оптические коммуникации, нейросетевые технологии в фотонике.

ISBN 978-5-7038-6678-8

holoexpo.ru

press.bmstu.ru