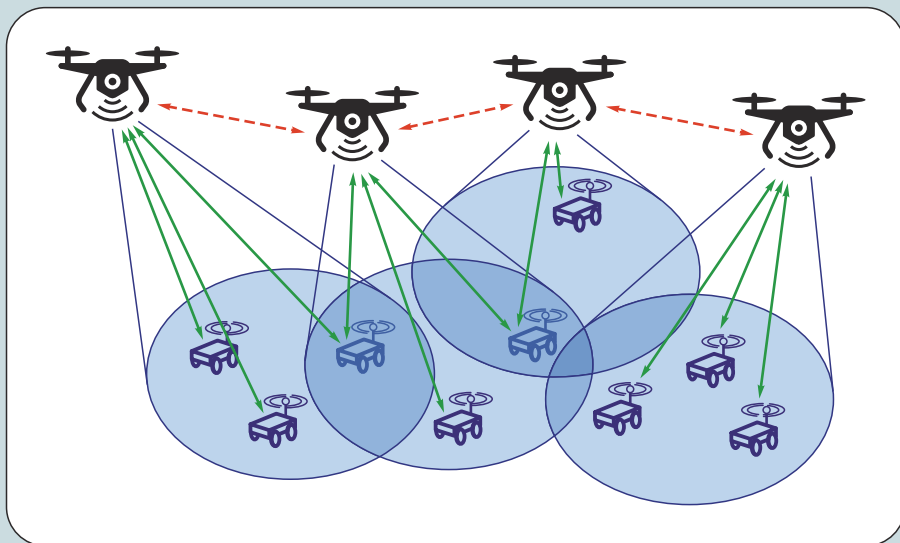


КИБЕРФОТОНИКА

под редакцией академика РАН
В.А. Сойфера



Киберфотоника

Под редакцией
академика РАН В.А. Сойфера

Самара
«Новая техника»
2025

УДК 535.42
ББК 22.343
К38

Коллектив авторов:

Безус Е.А. (2.2), Быков Д.А. (2.2), Демин Н.С. (3.4), Досколович Л.Л. (2.3), Захаров В.П. (3.3), Ивлиев Н.А. (2.4), Ильясова Н.Ю. (3.4), Казанский Н.Л. (3.1; 4.1), Козлова И.Н. (2.5), Мещеряков Р.В. (3.7), Павельев В.С. (3.5; 4.2; 4.3; 4.4), Попов С.Б. (3.2), Скиданов Р.В. (2.1; 3.5), Сойфер В.А. (введение; 1; 2.4; 3.6; заключение), Трипати Н. (2.5)

Рецензенты:

академик РАН Кульчин Ю.Н.,
академик РАН Соколов И.А.

К38 Киберфотоника / под ред. академика РАН В.А. Сойфера. – Самара: Новая техника, 2025. – 248 с. – ISBN 978-5-88940-167-4.

Появление и бурное развитие киберфизических систем различного назначения и повышение роли фотоники в этих системах стимулировало редактора книги ввести новый термин «киберфотоника».

Киберфотоника – это раздел фотоники, ориентированной на фундаментальные исследования, дизайн и создание устройств осязания, передачи информации, вычислений, принятия решений и управления, составляющих реализационную основу решения задач кибернетики.

Книга включает три раздела. Первый раздел рассматривает составляющие киберфотоники: сенсорику, вычисления, нейронные сети, телекоммуникации и актуаторы. Второй раздел посвящен КФС различного назначения: мониторинг природной и техногенной среды, техническое зрение, биомедицина, военное дело, управление динамическими объектами и мобильные киберфизические системы. Третий раздел рассматривает элементную базу киберфотоники: дифракционную оптику и наноплатонику, терагерцовую фотонику, цифровые логические элементы и низкоразмерные материалы.

Материал книги не претендует на полноту освещения темы, а, в большей степени, отражает научные интересы коллектива авторов.

Таблиц – 4, иллюстраций – 69, библиограф. – 685 названий.

ISBN 978-5-88940-167-4



9 785889 401674

© Новая техника, 2025
© Коллектив авторов, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ: ВЕК ФОТОНИКИ	9
Список используемых источников	13
1 КИБЕРФОТОНИКА: ОПРЕДЕЛЕНИЯ	14
Список использованных источников к Главе 1.....	19
2 СОСТАВЛЯЮЩИЕ КИБЕРФОТОНИКИ.....	20
2.1 Фотонная сенсорика: мульти- и гиперспектральные сенсоры	20
2.2 Фотонные вычисления.....	27
2.3 Фотонные нейронные сети	35
2.4 Фотонные телекоммуникации на основе применения вихревых лазерных пучков.....	44
2.5 Фотонные актуаторы.....	56
2.5.1 Фототермическая актуация.....	58
2.5.2 Фотохимическая актуация	65
2.5.3 Фотозлектрическая актуация	71
Список использованных источников к Главе 2.....	74
3 КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОНИКИ	93
3.1 Интеллектуальный гиперспектральный мониторинг природной и техногенной среды.....	93
3.1.1 Задачи гиперспектрального мониторинга природной и техногенной среды.....	93
3.1.2 Мониторинг на основе применения гиперспектральной аппаратуры.....	96
3.1.3 Интеллектуальный анализ данных мониторинга	99
3.1.4 Сельскохозяйственные применения	102
3.2 Системы технического зрения	105
3.3 Киберфотоника и живые системы	113
3.4 Киберфотоника в офтальмологии.....	127
3.5 Киберфотоника в системах специального назначения.....	137
3.6 Киберфотоника в идентификации динамических объектов.....	142
3.7 Мобильные киберфизические системы	151
3.7.1 Классы мобильных киберфизических систем по степени автономности.....	152
3.7.2 Классы мобильных киберфизических систем по среде функционирования.....	153
Список использованных источников к Главе 3.....	157

4 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КИБЕРФОТОНИКИ.....	179
4.1 Дизайн наноструктур и создание компонентов фотоники.....	179
4.1.1 Проектирование компонентов фотоники	179
4.1.2 Используемое программное обеспечение	185
4.2 Длинноволновая фотоника	196
4.3 Элементы и устройства цифровой интегральной фотоники.....	204
4.4 Фотодетекторы на низкоразмерных материалах.....	212
Список использованных источников к Главе 4	220
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	243

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

AI	– искусственный интеллект (Artificial Intelligence)
AO-FC	– адаптивно-оптическая фундус-камера (Adaptive Optics Fundus Camera)
AO-SLO	– адаптивно-оптический сканирующий лазерный офтальмоскоп (Adaptive Optics Scanning Laser Ophthalmoscopy)
AO-OCT	– адаптивно-оптическая оптическая когерентная томография (Adaptive-Optics Optical Coherence Tomography)
CaaS	– комплекс сервисов управления рабочими нагрузками на основе контейнеров (Containers-as-a-Service)
CARS	– когерентное анти-Стоксово Рамановское рассеяние (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering)
CVD	– химическое осаждение из газовой фазы (Chemical Vapor Deposition)
DWDM	– технология плотного спектрального мультиплексирования (Dense Wavelength-Division Multiplexing)
FEM	– метод конечных элементов (Finite Element Method)
FLIM	– флуоресцентная прижизненная визуализация (Fluorescence Lifetime Imaging)
FLIP	– метод затухания флуоресценции при фотообесцвечивании (Fluorescence Loss in Photobleaching)
FTIR	– инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
FDTD	– метод конечных разностей во временной области (Finite-Difference Time-Domain)
HRFZ-Si	– высокоомный кремний (High Resistivity Float Zone Silicon)
HSI	– гиперспектральная визуализация (Hyperspectral Imaging)
iPaaS	– платформа интеграции как услуга (Integration Platform as a Service)
LED	– полупроводниковый светодиод (Light-Emitting Diode)
LMA волокна	– оптические волокна с большой эффективной площадью моды (Large mode area)
MIMO	– технология мультивход мультивыход (Multiple Input Multiple Output)
ML	– машинное обучение (Machine Learning)
OCT	– оптическая когерентная томография (Optical Coherence Tomography)

OLED	– органический светодиод (Organic Light-Emitting Diode)
PLED	– полимерный светодиод (Polymer Light-Emitting Diode)
QWP	– четвертьволновая пластина (Quarter Wave Plate)
RCWA	– строгий метод связанных волн (Rigorous Coupled-Wave Analysis)
ROI	– область интереса (Region of Interest)
RS	– рамановская спектроскопия (Raman Spectroscopy)
RTK	– кинематические измерения, выполняемые в реальном времени (Real Time Kinematic)
SCSC	– преобразование из одного кристалла в другой (Single-Crystal-to-Single-Crystal)
SERS	– поверхностная рамановская спектроскопия (Surface-Enhanced Raman Scattering)
SLAM	– одновременная локализация и построение карты (Simultaneous Localization and Mapping)
SLM	– пространственный модулятор света (Spatial Light Modulator)
SSL	– твердотельное освещение (Solid State Lighting)
SRS	– стимулированное рамановское рассеяние, стимулированная рамановская спектроскопия (Stimulated Raman Scattering)
TD-FF-OCT	– временная полнополюсная оптическая когерентная томография (Time-Domain Full-Field Optical Coherence Tomography)
TERS	– зондово-усиленная рамановская спектроскопия (Tip Enhanced Raman Scattering)
АНПА	– автономные необитаемые подводные аппараты
АО	– адаптивная оптика
АО-ОКТ	– когерентная томография с адаптивной оптикой
АП	– поликристаллические алмазные плёнки
БАС	– беспилотная авиационная система
БОУНТ	– одностенные углеродные нанотрубки без покрытия
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат
БПФ	– быстрое преобразование Фурье
БЭК	– безэкипажные катера
ВАХ	– вольт-амперная характеристика
ВДУО	– монооксид углерода под высоким давлением
ГСИ	– гиперспектральное изображение
ГНСС	– спутниковая система навигации (Global Navigation Satellite System)
ДЗЗ	– дистанционное зондирование Земли
ДНС	– дифракционная нейронная сеть
ДОС	– диффузная отражательная спектроскопия
ДОЭ	– дифракционный оптический элемент

ДПМ	– дихалькогениды переходных металлов
ЖКС	– жидкокристаллические сети
ЖКЭ	– жидкокристаллические эластомеры
ИИ	– искусственный интеллект
ИК	– инфракрасный
ИСДМ	– информационные системы дистанционного мониторинга
КПГ	– конечные продукты гликирования
КПД	– коэффициент полезного действия
КТ	– компьютерная томография
КФС, CPS	– киберфизическая система (Cyber-Physical System)
ЛДФ	– лазерная доплеровская флоуметрия
МВМ	– механически взаимосвязанные молекулы
МДМ	– металл–диэлектрик–металл
МКФС	– мобильные киберфизические системы
МОУНТ	– одностенные углеродные нанотрубки с предварительно нанесёнными металлическими плёнками
МРТ	– магнитно-резонансная томографи
МФМ	– метод фурье-мод (Fourier Modal Method, FMM)
МЭМС	– микроэлектромеханические системы
НАСА	– Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства, США
НИР	– научно-исследовательские работы
НЛСЭ	– Новосибирский лазер на свободных электронах
ОДТ	– оптическая диффузная томография
ОУНТ	– одностенные углеродные нанотрубки
ОУМ	– орбитальный угловой момент
ПВО	– противовоздушная оборона
ПМС	– пространственный модулятор света
ПО	– программное обеспечение
ПОУНТ	– одностенные углеродные нанотрубки с предварительно нанесёнными полупроводниковыми плёнками
ППП	– поверхностные плазмон-поляритоны
ПРО	– противоракетная оборона
пЭВА	– полукристаллический полиэтиленвинилацетат
ПЭТ	– позитронно-эмиссионная томография, двухфотонная эмиссионная томография
ПЭФТ	– полиэтилентерефталат
СВЧ	– сверхвысокие частоты
СНС	– свёрточные нейронные сети
СТЗ	– системы технического зрения
СФП	– спиральная фазовая пластинка

СЭМ	– сканирующий электронный микроскоп
ТНПА	– телеуправляемые обитаемые подводные аппараты
УЗИ	– ультразвуковое исследование
УФ	– ультрафиолет, ультрафиолетовый
ФДТ	– фотодинамическая терапия
ФС	– фотосенсибилизатор
ФКС	– фотонно-кристаллические слои
ФРТ	– функция рассеяния точки
ЧКХ	– частотно-контрастная характеристика
ШЗЗ	– ширина запрещённой зоны

ВВЕДЕНИЕ: ВЕК ФОТОНИКИ

Энтузиасты называют XXI век веком фотоники, имея в виду аналогии с XIX веком – веком пара и с XX веком – веком электричества и электроники (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Век фотоники

Такой пафос не лишён оснований.

Во-первых, на сегодняшний день жизненно необходимо создание компонентов широкого класса устройств и систем, использующих в качестве носителя фотоны, наряду с электроникой.

Во-вторых, для целого ряда систем передачи и обработки сигналов, прежде всего для волоконно-оптических линий связи, создано семейство фотонных интегральных микросхем.

В-третьих, в технике виртуальной и дополненной реальности широко используются дисплеи, пространственные модуляторы света и другие фотонные устройства.

Наконец, без фотоники невозможны персональные компьютеры, мобильная связь, интернет и многое другое.

Несмотря на всё вышесказанное, автор твёрдо стоит на позиции, что фотоника ни в коем случае не является альтернативой электронике, а должна рассматриваться как принципиально новое для широкого класса задач направление, использующее в отличие от электроники иное физическое взаимодействие – фотоны, обеспечивающее синергетический эффект и создание нового класса приборов, устройств и систем.

В настоящее время фотоника рассматривается не только как фундаментальное научное направление, но и как стремительно развивающийся бизнес. Например, по оценке фирмы «Mordor Intelligence» (<https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/photronics-market-market>), рынок фотоники оценивается в 1,64 триллиона долларов США в 2024 году и, как ожидается, достигнет 2,25 триллиона долларов США к 2029 году, при этом среднегодовой темп роста составит 6,5 % в течение прогнозируемого периода (2024–2029 годы). По оценке фирмы «Future Market Insights, Inc» (FMI), в 2023 году объём мирового рынка фотоники превысил \$ 900 млрд, а через десять лет составит более \$ 1,6 трлн (<https://www.futuremarketinsights.com/reports/photronics-market>). Прогнозируется, что общий объём продаж фотоники вырастет на 5,8 % в течение периода оценки (с 2023 по 2033 год), превысив 1,6 трлн дол-

ларов США к концу 2033 года. Основным доходным применением фотоники в течение периода оценки останутся дисплеи. FMI оценила устойчивый среднегодовой темп роста более 5,7% для сегмента дисплеев в течение прогнозируемого периода (2023–2033 гг.). Ожидается, что рост применения фотоники в дисплеях, медицинских технологиях, освещении, обороне и безопасности, информации и оптических компонентах будет стимулировать продажи.

По данным маркетингового агентства SDA, объём рынка фотоники на конец 2022 года составляет порядка 11% мировой экономики (10,58 триллиона долларов) и постоянно растёт со среднегодовой скоростью более 6%.

По всему миру наблюдается всё большее внедрение устройств фотоники и значительное расширение областей её применения. Например, анализ диагностических изображений, получаемых на разных длинах волн, помогает быстро и точно обнаруживать и оценивать заболевания. Растущая значимость в секторе здравоохранения продолжает стимулировать спрос на фотонику и фотонные устройства.

Ожидается, что использование фотоники в передовых световых технологиях, таких как твердотельное освещение (SSL), будет активно стимулировать мировой рынок в последующие годы. Твердотельное освещение – это тип освещения, в котором в качестве источников освещения используются полупроводниковые светодиоды (LED), органические светодиоды (OLED) или полимерные светодиоды (PLED), а не электрические нити, плазма (используется в дуговых лампах, таких как люминесцентные лампы) или газ.

Аналогичным образом, более широкое применение фотонных датчиков и детекторов в сфере безопасности увеличит продажи фотоники в течение следующих десяти лет. Благодаря растущей значимости фотоники в различных областях она была признана одной из ключевых технологий обеспечения безопасности в Европе в XXI веке.

Благодаря увеличению объёма и направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ достижения в области фотоники позволят освоить новые области применения в течение следующих десяти лет. Рост использования устройств на основе фотоники, таких как беспроводные сенсоры, будет благоприятствовать расширению рынка.

В России фотоника вписана в ряд приоритетных направлений исследований и разработок. Рост числа публикаций и конференций по современным направлениям фотоники (метаматериалы и метаповерхности, плазмоника, фотонные кристаллы, оптические вычисления, голографические технологии и технологии дополненной реальности) описывается экспоненциальной функцией. Таким образом, фотоника по наукометрическим показателям и объёму рынка начинает успешно конкурировать с электроникой или дополнять её.

На сегодняшний день развитие микроэлектроники, существенным образом изменившей технологию прошлого века, вступает в новую фазу. При этом в качестве основного научного направления, призванного обеспечить дальнейшее развитие вычислительных и телекоммуникационных систем, рассматривается нанофотоника – область фотоники, связанная с разработкой наноструктурированных устройств и приборов для генерации, модуляции, передачи и детектирования электромагнитного излучения. В настоящее время ведущие компании-производители вычислительной техники (IBM, Intel, NEC, Cisco) активно развивают технологии создания вычислительных и телекоммуникационных систем, в которых информационными носителями используются оптические сигналы вместо электрических. В связи с этим разработку эффективных компонентов фотоники для создания новой элементной базы систем оптической обработки и передачи информации можно отнести к глобальным вызовам [1–3].

Значительное расхождение в приведенных выше оценках объёма рынка фотоники, на взгляд автора, обусловлено отсутствием

чёткого определения того, что понимается под привлекательным и многоликим названием «фотоника».

Именно к определениям многочисленных ключевых терминов, фигурирующих в данной работе, следует обратиться в первую очередь.

Список используемых источников

1. Soifer V. A. Diffractive nanophotonics and advanced information technologies // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014. Vol. 84(1). P. 9–20. DOI: 10.1134/S1019331614010067.
2. Nesterenko D. V., Hayashi S., Soifer V. Fabry–Pérot resonances in planar metal–insulator–metal structures for optical data processing: A review // Physics of Wave Phenomena. 2023. Vol. 31(5). P. 293–311. DOI: 10.3103/S1541308X23050096.
3. Kazanskiy N. L., Khonina S. N., Butt M. A. Metasurfaces: Shaping the future of photonics. Science Bulletin. 2024. Vol. 69(11). P. 1607–1611. DOI: 10.1016/j.scib.2024.04.056.
4. Cyber-physical systems: From theory to practice / ed. by D. B. Rawat, J. J. P. C. Rodrigues, I. Stojmenovic. CRC Press, 2016. 588 p. ISBN: 978-0367575427.

1 КИБЕРФОТОНИКА: ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Фотоника как раздел физики рассматривает взаимодействие света и неоднородностей и устройства, разработанные на этой основе [1].

В других источниках фотоника – дисциплина, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданными на их базе устройствами различного назначения [2].

Фотоника порождена изобретением лазера в 1960 году, и прогресс фотоники неразрывно связан с прогрессом лазерной физики и лазерной техники. Фотоника как наука при волновом рассмотрении неразрывно связана с оптикой, поскольку использует ключевые принципы и уравнения классической оптики, прежде всего уравнения Максвелла.

Квантовая фотоника базируется на уравнениях квантовой механики.

Здесь будем рассматривать устройства (элементную базу) фотоники, предназначенные для различного рода преобразований оптических сигналов. В отличие от элементной базы классической оптики, состоящей из ограниченного числа оптических элементов (линзы, призмы, зеркала), элементная база фотоники исследует сотни, а скорее даже тысячи различного рода устройств, созданных современными методами компьютерного дизайна с применением нанотехнологий, пришедших в основном из микроэлектроники. По мнению автора, именно отличие в разнообразии и назначении элементной базы отличает фотонику как раздел техники от оптики.

Название книги говорит о том, что рассматриваемые в ней устройства фотоники ориентированы на кибернетику.

Кибернетика [3] – наука об общих закономерностях процессов управления и связи в организованных системах – машинах, живых организмах и их объединениях.

Предметом технической кибернетики являются системы автоматического или автоматизированного управления, в также так называемые «разумные машины» – роботы, наделённые органами очувствления и принятия решений, и многое другое, пришедшее в нашу жизнь и сочетающее мир реальный с миром виртуальным.

Говоря о роботах, «разумных машинах», принятии решений, следует остановиться на искусственном интеллекте (ИИ) и его отношении к технической кибернетике.

Автору этого раздела близка позиция, высказанная в книге [4], состоящая в том, что математика, статистика, глубокое обучение, нейронные сети позволяют создавать всё более совершенные методы принятия решений, распознавания образов, обработки информации, но всё это не связано с искусственной формой интеллекта, присущего человеку.

Можно также описать взаимосвязь кибернетики с искусственным интеллектом следующим образом:

Кибернетика использует искусственный интеллект для создания систем управления и контроля в различных областях, таких как медицина, транспорт, энергетика и промышленность. Например, системы управления производством используют искусственный интеллект для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности работы. Кроме того, кибернетика также использует искусственный интеллект для разработки новых методов и технологий в области искусственного интеллекта, таких как машинное обучение и глубокое обучение.

Введение авторами нового термина «Киберфотоника» во многом стимулировано появлением и бурным развитием киберфизических систем (КФС/CPS).

Дадим определение.

Киберфотоника – это раздел фотоники, ориентированный на фундаментальные исследования, дизайн и создание устройств осязания, передачи информации, вычислений, принятия решений и управления, составляющих реализационную основу решения задач кибернетики.

Введение нового термина всегда требует объяснений. Начнём с литературной классики: М.А. Булгаков «Театральный роман», глава «Сивцев Вражек» [5]. Автор в гостях у Ивана Васильевича и его тётюшки Настасьи Ивановны.

– Зачем изволили пожаловать к Ивану Васильевичу?

– Леонтий Сергеевич, – отозвался Иван Васильевич, – пьесу мне принёс.

– Чью пьесу? – спросила старушка, глядя на меня печальными глазами.

– Леонтий Сергеевич сам сочинил пьесу!

– А зачем? ... Разве уж и пьес не стало? – ласково-укоризненно спросила Настасья Ивановна. – Какие хорошие пьесы есть. ... Зачем же вам тревожиться сочинять?

Автор термина «киберфотоника» имел подобный разговор с одним из своих коллег. Зачем вводить новый термин, если в отечественных и зарубежных изданиях глубоко укоренился термин «оптическая обработка информации» (*Optical Information Processing*)?

Строго говоря, глубоко укоренившийся термин является научным сленгом, поскольку оптическая система обрабатывает не информацию, а оптические сигналы. О терминах не спорят, пока они корректно отражают существо рассматриваемого вопроса. Теперь по сути: обработка сигналов не подразумевает такие действия, как получение сведений о физическом мире с помощью сенсоров; передача информации, распознавание образов; принятие решений и, наконец, управление или воздействие на физический объект. Эти

действия составляют предмет кибернетики и оправдывают необходимость введения нового термина «киберфотоника». Автор надеется, что термин «киберфотоника» займёт своё место в ряду производных от фотоники, таких как биофотоника, нанофотоника, радиофотоника.

Имеется целый ряд определений киберфизических систем, например:

«Киберфизическая система (КФС) – это интеллектуальная система, которая включает в себя инженерные взаимодействующие сети физических и вычислительных компонентов» [6].

«Киберфизическая система – это комплексная система из вычислительных и физических элементов, которая постоянно получает данные из окружающей среды и использует их для дальнейшей оптимизации процессов управления. «Мозгом» системы является искусственный интеллект (ИИ)» [7].

Киберфизическая система (англ. *cyber-physical system*) – информационно-технологическая концепция, подразумевающая интеграцию вычислительных ресурсов в физические сущности любого вида, включая биологические и рукотворные объекты. В киберфизических системах информационно-вычислительная компонента распределена по всей физической системе, которая является её носителем, и синергетически увязана с её составляющими элементами [8]. В такой системе датчики, оборудование и информационные системы соединены на протяжении всей цепочки: от получения необходимой информации до принятия управленческого решения и его реализации в виде изменения производства, изделия или административной настройки.

Процесс поиска наилучших определений продолжается, в то же время, по сообщениям пресс-службы СПбУ от 16.12.22 г., КФС оказалась самой популярной сферой изучения мировой науки. Число патентов в области КФС за пять лет увеличилось более чем в четыре раза и продолжает неуклонно расти.

В любом случае КФС состоит из сенсоров, средств телекоммуникаций, вычислительных устройств и актуаторов и взаимодействует с окружающей средой.

Продолжая поиск наилучших формулировок определения КФС, автор считает возможным выделить два класса КФС.

Первый класс КФС содержит актуаторы в виде исполнительных элементов, осуществляющих физическое воздействие на внешний мир. Такой тип актуаторов присутствует во всех системах автоматического и автоматизированного управления.

Второй класс КФС содержит устройства ИИ, обеспечивающие принятие решений о текущем состоянии внешнего мира в автоматическом или автоматизированном режиме.

Любая интеллектуальная система, получающая информацию из окружающего мира, обрабатывающая и анализирующая её и изменяющая состояние физического мира или представление о нём, является КФС.

Примеры КФС: интеллектуальные медицинские системы, интеллектуальные транспортные системы, умный город, умный дом, роботизированные технологии, интеллектуальная энергетика, интеллектуальные системы специального назначения и т.п.

Основная цель данной работы – показать роль и место фотоники в киберфизических системах и обосновать научное направление, вынесенное в её название, – **Киберфотоника**. Рассматривая составляющие и виды КФС, действующих на основе применения фотоники, автор не ставит своей целью полноту охвата устройств и систем, а ограничиваются в основном результатами, лежащими в сфере собственных научных интересов.

Список использованных источников к Главе 1

1. Сойфер В. А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии. Фотоника: «взвезданный свет». Вестник РАН. 2014. Т. 84910. С. 11–22.
2. Фотоника [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0> (дата обращения 09.10.2024).
3. Кибернетика. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с.
4. Искусственный интеллект. Анализ, тренды, мировой опыт / М. Н. Лысачев, А. Н. Прохоров; научный редактор Д.А. Ларионов. Корпоративное издание. М., Белгород: КОНСТАНТА-принт, 2023. 460 с. ISBN: 978-5-6048180-7-7.
5. Булгаков А. М. Собрание сочинений в пяти томах. М.: Художественная литература, 1990. Т. 4. С. 486. ISBN: 5-280-00981-4.
6. ПНСТ 416-2020. Система киберфизическая. Общие положения = Cyberphysicalsystem. Generalprinciples: предварительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 июля 2020 г. N 25-пнст: введен впервые: дата введения 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – Текст: непосредственный.
7. Киберфизическая система [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0#:~:text=%D0%9A%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%CC%81%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%CC%81%D0%BC%D0%B0%20\(%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB.,%D0%B2%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B0%D1%8F%20%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%B0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D0%B8%20%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BE%D0%B1%D1%8A%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%8B.](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0#:~:text=%D0%9A%D0%B8%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B8%D0%B7%D0%B8%CC%81%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%CC%81%D0%BC%D0%B0%20(%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%BB.,%D0%B2%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B0%D1%8F%20%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%B0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D0%B8%20%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BE%D0%B1%D1%8A%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%8B.) (дата обращения 09.10.2024).
8. Cyber-physical systems: From theory to practice / ed. by D. B. Rawat, J. J. P. C. Rodrigues, I. Stojmenovic. CRC Press, 2016. 588 p. ISBN: 978-0367575427.

2 СОСТАВЛЯЮЩИЕ КИБЕРФОТОНИКИ

2.1 Фотонная сенсорика: мульти- и гиперспектральные сенсоры

В конце 1970-х годов развитие технологий регистрации света и оптических технологий привело к появлению нового класса приборов, которые могли регистрировать спектр для каждой точки изображения объекта. Разработка первого бортового изображающего спектрометра началась в 1979 году в Лаборатории реактивного движения НАСА. Этот прибор был создан с использованием светочувствительной матрицы размером 32×32 пикселя. Матрица была разработана на основе HgCdTe (диапазон чувствительности 1,2–2,4 мкм, при 128 спектральных каналах), при этом угловое разрешение этого изображающего спектрометра составляло всего 1,9 мрад, что позволяло получить разрешение по поверхности планеты около 1 км. Впервые этот изображающий спектрометр совершил полёт в 1982 году и сразу же продемонстрировал огромные возможности изображающей спектроскопии для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1, 2]. В результате этого успеха следующая реализация изображающего спектрометра была разработана для НАСА всего через два года, при этом был существенно расширен диапазон чувствительности в границах от видимого до коротковолнового инфракрасного диапазона (0,38–2,51 мкм). Космический аппарат с этим изображающим спектрометром был запущен в 1986 году. Угловое разрешение улучшилось вдвое до 0,95 мрад, спектральное разрешение осталось прежним, но за счёт расширения спектрального диапазона количество спектральных каналов увеличилось до 250. При этом количество пикселей в полосе сканирования составляло уже 614, что позволяло получать достаточно высокодетализированные изображения.

С этим изображающим спектрометром началось бурное развитие научных исследований атмосферы, гидросфер и литосферы Земли. Перечень таких исследований чрезвычайно объёмен: изучение состава и функционирования экосистем; изучение геологического состава поверхности и почвы; изучение свойств прибрежных океанских и внутренних вод, включая кораллы; альbedo снега и льда, степень загрязнения и очистки атмосферы; распределение атмосферного водяного пара, распределение углекислого газа, распределение метана, изучение фаз облачности; изучение свойств антропогенной инфраструктуры и т. д. [4]. Изображающие спектрометры использовались также для научных миссий при исследовании Солнечной системы. Изображающий спектрометр для ближнего инфракрасного диапазона [5] был разработан для аппарата Galileo для изучения Юпитера и был запущен в 1989 году. Изображающий спектрометр для видимого и ближнего инфракрасного диапазона был разработан для аппарата Cassini для изучения Сатурна и был запущен в 1997 году [6]. Изображающий спектрометр Huyeron был запущен в качестве демонстрации технологии в 2000 году на аппарате Earth Observing [7]. Европейское космическое агентство запустило на околоземную орбиту компактный изображающий спектрометр для получения изображений с высоким разрешением, было достигнуто разрешение около 25 м по поверхности Земли при спектральном разрешении 10 нм в диапазоне 0,415–1,05 мкм [8]. В 2002 году изображающий спектрометр среднего разрешения был установлен на аппарат «Марсианский экспресс» [9]. Ещё одно направление развития изображающих спектрометров – расширение спектрального диапазона. Так, на аппарате «Розетта» в 2004 году к комете 67P/Чурюмова–Герасименко был запущен изображающий спектрометр, работающий как в видимом, так и в тепловизионном диапазоне [10].

В настоящее время гиперспектральное дистанционное зондирование Земли из космоса и с беспилотных летательных аппаратов

(БПЛА) успешно применяется в задачах сельского и лесного хозяйства [11–17], для поиска наркосодержащих растений [18, 19], в геологии [20], для мониторинга городов [21], для экологического мониторинга [22].

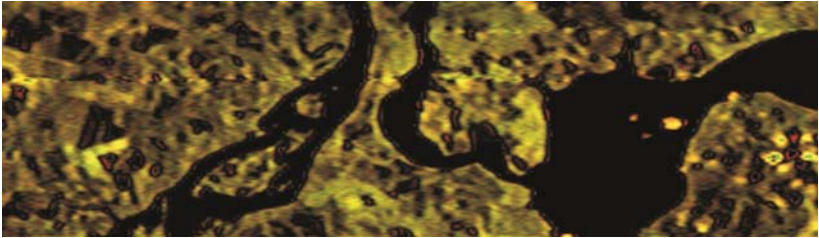
Если говорить о конфигурации оптических схем, используемых для изображающих спектрометров космического базирования, то это в большинстве своем схемы Дайсона и Оффнера в различных модификациях [23–35]. Причём схема Дайсона используется чаще, поскольку схема Оффнера весьма чувствительна к смещению основных оптических элементов, что влечёт за собой повышенные требования по термостабилизации спектрометра. Однако, как было теоретически показано в [26] и экспериментально подтверждено в [27], этот недостаток можно устранить за счёт коаксиального крепления основных оптических элементов.

На рисунке 2.1а представлен внешний вид гиперспектрометра, скомпонованного по схеме Оффнера с коаксиальным креплением элементов, который был установлен на спутнике формата «Кубсат 3U», на рисунке 2.1б представлено одно из полученных гиперспектральных изображений.

Все указанные выше изображающие спектрометры – это достаточно сложные дорогостоящие приборы. В случае изготовления единичных экземпляров высокая сложность и цена не являются существенным препятствием. Однако в последние 15–20 лет наблюдается тенденция использования гиперспектрометров на поверхности Земли как в лабораторных, так и в полевых условиях [28]. И тут на первое место выходит цена и простота конструкции изображающего спектрометра, при этом требования к пространственному разрешению существенно снижаются. Появился целый ряд работ, в которых построение спектрального изображения осуществлялось за счёт использования особых дисперсионных элементов, часто с очень сложной структурой [29–31].



а)



б)

Рисунок 2.1 – Цветосинтез на основе гиперспектрального изображения участка поверхности Земли возле г. Самары

Следует пояснить по поводу формирования спектральных изображений – такие изображения всегда получаются сканированием (рисунок 2.1). В космических аппаратах очень удобно использовать сканирование через узкую щель. Но это не единственный метод сканирования, всего их существует три типа [32].

Whiskbroom, или поточечное сканирование (рисунок 2.2а).

Спектр регистрируется в одной точке, затем образец перемещается с помощью двухкоординатной платформы, управляемой компьютером, и последовательно по точкам формируется спектральное изображение. Этот метод редко используется, поскольку он является наиболее трудоёмким.

Pushbroom, или сканирование через щелевую диафрагму (рисунок 2.2б).

Спектральное изображение складывается из отдельных столбцов одномерным перемещением объекта либо спектрометра. Собственно, именно этот метод наиболее удобен в задачах дистанци-

онного зондирования Земли. Этот метод на 2–3 порядка быстрее предыдущего.

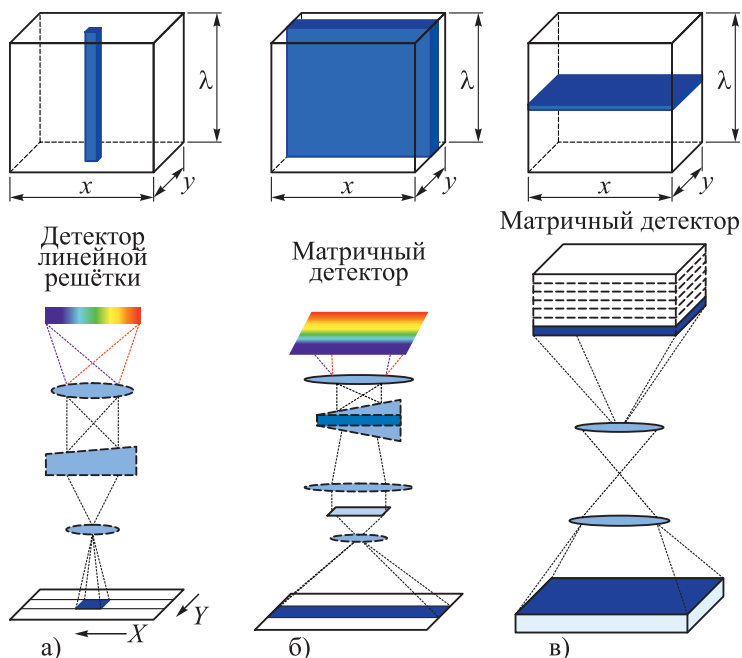


Рисунок 2.2 – Режимы съёмки гиперспектральных изображений:
 поточечное сканирование (а);
 сканирование через щелевую диафрагму (б);
 сканирование по длине волны (в)

Wavelength scan, или сканирование по длине волны (рисунок 2.2в).

Гиперспектральные данные получают путём сбора последовательности изображений объекта, по одному спектральному каналу за раз. Это единственный метод, в котором изображение не собирается из отдельных пикселей или столбцов.

Метод сканирования по длине волны более удобен для наземного использования изображающего спектрометра, поскольку он не требует дополнительной аппаратуры в виде поворотной платфор-

мы. В целом же съёмка полного кадра с последующим сложением в спектральное изображение характерна, скорее, для мультиспектральных систем, которые развивались параллельно. Такой подход заключался в том, что на регистрирующую матрицу устанавливался спектральный фильтр, ограничивающий спектральный диапазон [33]. И таких светочувствительных матриц используется несколько штук. Если их три на основные цвета – формируется обычное цветное изображение. Когда впервые таким фильтром выделили инфракрасный диапазон чувствительности обычной кремниевой светочувствительной матрицы (0,7–1,0 мкм), появился термин «мультиспектральное изображение» [34]. В последующем диапазон чувствительности кремниевых матриц поделили на шесть цветных и два инфракрасных поддиапазона, а также добавили матрицы, чувствительные в коротковолновом инфракрасном диапазоне и тепловизионном диапазоне, что даёт в совокупности 10 спектральных каналов [35].

Такой подход естественным образом ограничивается быстрым ростом массогабаритных характеристик мультиспектральной системы, обычно более 10 каналов таким методом не формируют, что привело к условной границе между мульти- и гиперспектрометрией в 10 спектральных каналов. Однако на основании мультиспектрального подхода появились также новые конструкции так называемых полнокадровых гиперспектрометров. В этих системах вместо увеличения количества светочувствительных матриц используется только одна матрица, на разные области которой изображение проецируется специальным мультиапертурным объективом [36] (рисунок 2.3).

Разделение по спектру осуществляется за счёт использования узкополосных спектральных фильтров, у которых локально меняется функция пропускания. Однако технология изготовления таких компактных узкополосных фильтров, у которых по небольшим участкам

изменяется диапазон пропускания, весьма сложна, поэтому широко распространения такие гиперспектрометры не получили.

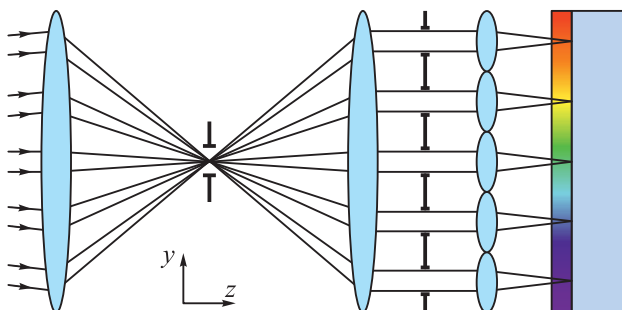
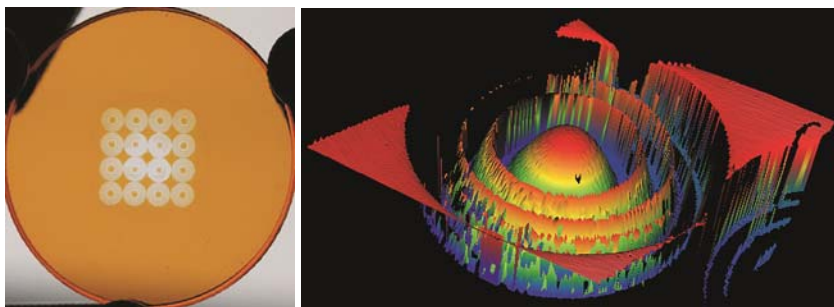


Рисунок 2.3 – Оптическая схема полнокадрового мультиапертурного гиперспектрометра с узкополосными спектральными фильтрами [36]

В работе [37] предложен более простой вариант полнокадрового гиперспектрометра на основе использования матрицы гармонических линз (рисунок 2.4а) с высотой микрорельефа от 5,2 до 6 мкм, такие линзы формируют набор из трёх гармоник-изображений, длины волн которых приходятся на диапазоны пропускания стандартных баеровских фильтров для цветных светочувствительных матриц. На рисунке 2.4б представлен вид центрального участка микрорельефа такой линзы.

Такой гиперспектрометр формирует $3 \cdot N^2$ спектральных каналов, где N – размерность матрицы линз по одной координате. Так, элемент, показанный на рисунке 2.4а, формирует 48 спектральных каналов в диапазоне от 400 до 700 нм, т.е. разрешение по спектру составляет около 6 нм. Расширение спектрального диапазона такого гиперспектрометра до 1000 нм также не является сложной задачей, для этого необходимо частичное удаление инфракрасного фильтра с цветной светочувствительной матрицы.



а) б)
Рисунок 2.4 – Внешний вид матрицы гармонических линз (а), форма центрального участка одной из гармонических линз

2.2 Фотонные вычисления

В настоящее время фотоника рассматривается как одно из основных научных направлений, призванных обеспечить дальнейшее развитие вычислительных и телекоммуникационных систем за счёт создания дополнения к электронным компонентам или, в ряде отдельных задач, альтернативы им. В этой связи ведущие университеты и исследовательские центры развивают технологии создания компонентов вычислительных систем, в которых носителями информации являются оптические сигналы вместо электрических. В качестве одного из активно развивающихся направлений применения структур фотоники в вычислительных системах можно выделить аналоговые оптические вычисления. В рамках этого направления большое внимание уделяется разработке резонансных структур для оптической реализации различных дифференциальных и интегро-дифференциальных операторов.

История оптической обработки информации и оптических вычислений восходит к работе А. Ван дер Люгта 1964 года [38], посвящённой т.н. фурье-коррелятору. Оптический коррелятор, или когерентный оптический фурье-процессор, представляет собой те-

лескопическую систему (4F-систему) и состоит из двух линз, оптически реализующих преобразование Фурье, и пространственного фильтра, который кодирует передаточную функцию, описывающую требуемое пространственное преобразование входного светового пучка. В частности, для реализации операции пространственного дифференцирования в такой системе в качестве пространственного фильтра следует использовать дифференцирующий фильтр с функцией комплексного пропускания, пропорциональной пространственной частоте. При этом относительно большие размеры оптического коррелятора существенно ограничивают область его практических применений. Тем не менее, на тот момент 4F-система с дифракционной структурой в частотной плоскости стала рассматриваться как основной подход для оптической обработки информации [39–41].

Возрождение научного интереса к аналоговым оптическим вычислениям, в частности, к оптическому вычислению различных дифференциальных операторов, произошло после публикации статьи в журнале “Science” в 2014 году, в которой теоретически и численно была показана возможность оптического выполнения операций пространственного дифференцирования и интегрирования профиля падающего пучка с помощью специально спроектированных слоёв метаматериала [42]. Предложенный подход состоял в использовании компактных аналогов оптических корреляторов, в которых «обычные» фурье-линзы были заменены компактными слоями с градиентным показателем преломления, а в качестве пространственного фильтра использовалась метаповерхность (тонкий слой метаматериала), кодирующая заданную функцию пропускания.

Использование резонансных структур фотоники позволяет реализовать устройства для аналоговых оптических вычислений, существенно более компактные по сравнению с фурье-корреляторами (в т.ч. вариантами фурье-коррелятора на основе метаматериалов и метаповерхностей, аналогичными рассмотренному в [42]). Исполь-

зование резонансных структур позволяет создать пространственные дифференциаторы и интеграторы, имеющие толщину порядка длины волны обрабатываемого оптического сигнала. Возможность применения резонансных структур фотоники для оптического дифференцирования связана с тем, что, как правило, вблизи резонансов они имеют нули отражения (или пропускания), в окрестности которых спектры резонансной структуры могут быть близки к передаточной функции «идеального» дифференциатора. При этом такие структуры позволяют оптически реализовать операцию дифференцирования как по пространственной координате, так и во времени. В качестве указанных резонансных структур были предложены субволновые дифракционные решётки [43–46], метаповерхности [47–50] и различные слоистые структуры (включая брэгговские решётки с дефектным слоем, т.н. схему Кретчмана для возбуждения поверхностных плазмон-поляритонов, структуры «металл–диэлектрик–металл») [51–57].

Следует отметить, что в большинстве существующих работ рассматривается обработка пространственных оптических сигналов, то есть преобразование поперечных профилей падающих оптических пучков [42, 45–57]. Важными частными случаями пространственных преобразований являются операции дифференцирования по пространственной координате (в т. ч. вычисление высших производных) и вычисление оператора Лапласа. Структуры, выполняющие указанные преобразования, позволяют осуществить оптическое выделение контуров на изображениях [47, 49, 50], что важно в задачах микроскопии и полностью оптической обработки изображений.

В качестве примера на рисунке 2.5 показана геометрия задачи дифракции оптического пучка на многослойной металло-диэлектрической структуре, осуществляющей вычисление оператора Лапласа. При выполнении условия критической связи данная структура позволяет аппроксимировать передаточную функцию, соответ-

ствующую оператору Лапласа. На рисунке 2.6 приведён пример выделения контуров на изображении с использованием указанной структуры.

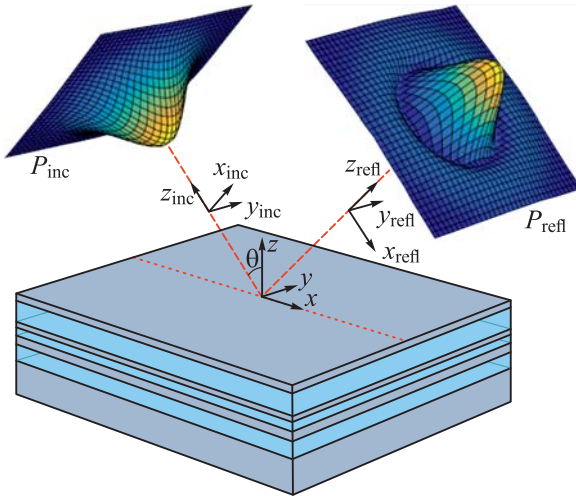


Рисунок 2.5 – Геометрия задачи дифракции трёхмерного пучка на слоистой структуре, вычисляющей оператор Лапласа

Другой важной задачей аналоговых оптических вычислений является обработка временных сигналов, то есть преобразование огибающей оптических импульсов. Для интегрирования и дифференцирования временных сигналов были предложены различные структуры фотоники, в том числе волоконные брэгговские решётки и субволновые резонансные дифракционные решётки [43, 44, 57–60]. Более общая задача решения системы дифференциальных уравнений была рассмотрена в работе [61], где для этого был предложен набор кольцевых микрорезонаторов, связанных с интегральными оптическими волноводами прямоугольного сечения.

На рисунке 2.7 показана геометрия резонансной дифракционной решётки, вычисляющей временную производную от огибающей падающего импульса. На рисунке 2.8 показаны огибающая рассмотренного падающего импульса (рисунок 2.8а) и огибающая

прошедшего импульса (рисунок 2.8б). Огибающая прошедшего импульса с высокой точностью совпадает с аналитически вычисленным модулем производной падающего импульса.

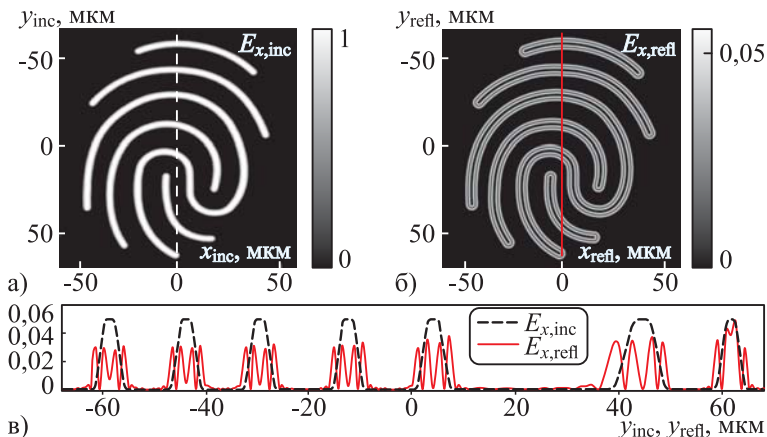


Рисунок 2.6 – Поперечные распределения величины E_x -компоненты падающего поля (а) и отражённого поля (б); поперечные сечения двумерных распределений E_x -компоненты падающего пучка (штриховая чёрная линия) и отражённого пучка (сплошная красная линия) (в) вдоль соответствующих вертикальных линий на (а) и (б)

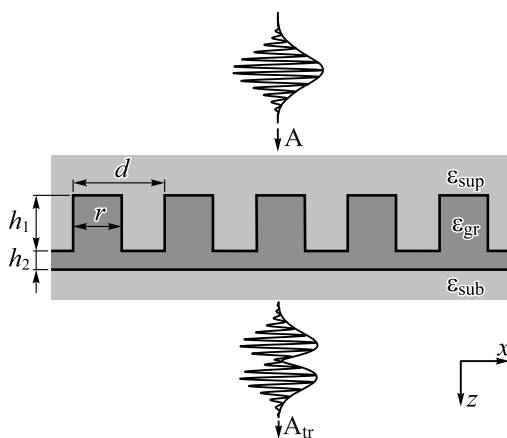


Рисунок 2.7 – Геометрия задачи дифракции оптического импульса на резонансной дифракционной решётке

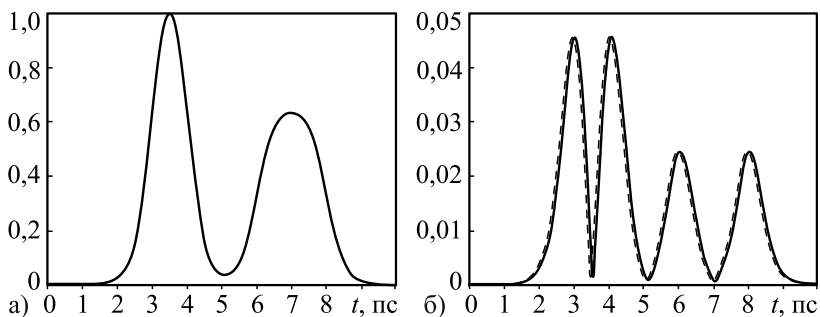


Рисунок 2.8 – Огибающая падающего импульса (а); модуль амплитуды прошедшего сигнала (сплошная линия) и модуль аналитически рассчитанной производной (пунктир) (б)

В большинстве работ по аналоговым оптическим вычислениям временные и пространственные преобразования оптических сигналов рассматриваются отдельно. Тем не менее, большой интерес представляет изучение взаимодействия пространственно-временных оптических сигналов со структурами фотоники (в особенности резонансными) [62–73].

В известных работах было описано преобразование пространственно-временных оптических сигналов резонансными дифракционными решётками [64, 67, 68, 72, 73], брэгговскими решётками с дефектом [71], металлодиэлектрическими слоистыми структурами [69, 70], резонансными структурами интегральной оптики [65]. В частности, указанные структуры могут использоваться для пространственно-временного дифференцирования [64–69], для формирования пространственно-временных оптических вихрей [68–70], а также для формирования более сложных оптических импульсов с заданным пространственно-временным распределением электромагнитного поля.

На рисунке 2.9 показан пример металлодиэлектрической многослойной структуры Au-GaP-Au, выполняющей операцию пространственно-временного дифференцирования.

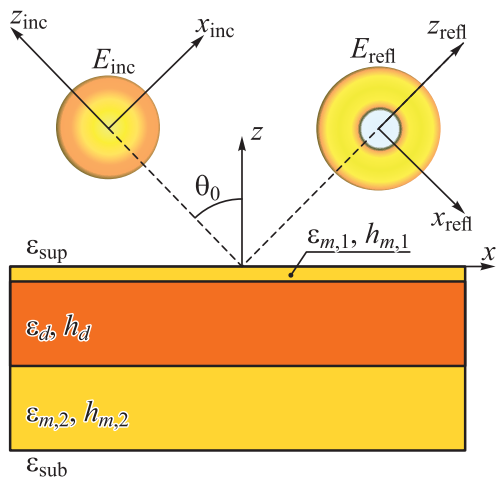


Рисунок 2.9 – Структура металл–диэлектрик–металл (МДМ) и схематическое изображение пространственно-временного дифференцирования огибающей оптического импульса при наклонном падении

На рисунке 2.10 представлены амплитуда (рисунок 2.10а) и фаза (рисунок 2.10б) указанной передаточной функции. Наличие фазовой сингулярности на рисунке 2.10б свидетельствует о том, что данная структура может быть использована для формирования пространственно-временного оптического вихря. В подтверждение этого на рисунках 2.10в, г представлена амплитуда и фаза пространственно-временной огибающей импульса, сформированного при отражении падающего гауссова импульса от структуры (на врезке к рисунку 2.10в показана огибающая падающего импульса). На рисунке 2.11 показано применение описанной структуры к задаче выделения контуров.

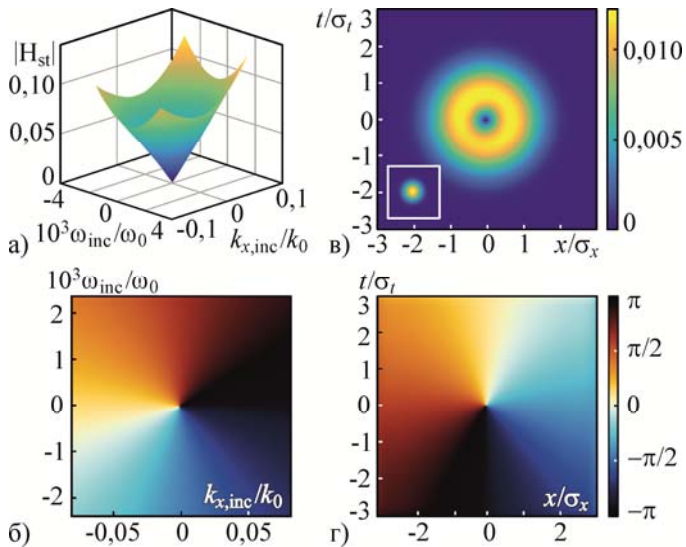


Рисунок 2.10 – Амплитуда (абсолютное значение) (а) и фаза (аргумент) (б) ПФ спроектированной МДМ-структуры Au-GaP-Au; амплитуда (в) и фаза (г) пространственно-временной огибающей импульса, сформированного при отражении падающего гауссова импульса от МДМ-структуры (на вставке к (в) показана огибающая падающего импульса, не в масштабе)

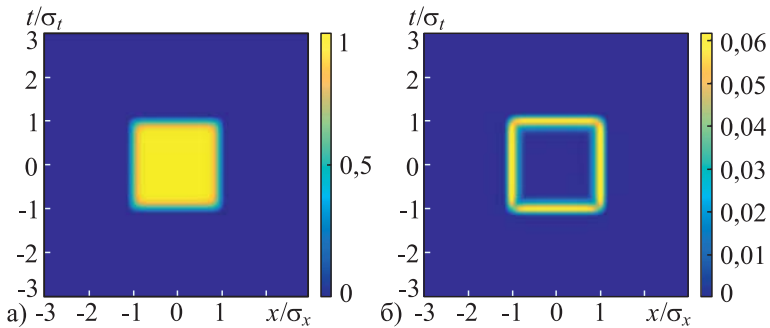


Рисунок 2.11 – Амплитуда падающего импульса с «супергауссовой» огибающей (а); амплитуды «оптически вычисленной» огибающей отражённого импульса (б)

2.3 Фотонные нейронные сети

Искусственные нейронные сети достигли больших успехов в решении различных задач машинного обучения, включающих классификацию и анализ изображений, задачи медицинской диагностики, распознавание речи, решение различных обратных задач, возникающих в т.ч. в нанофотонике, микроскопии, голографии. Это, в свою очередь, послужило толчком к интенсивному развитию научного направления, посвящённого оптической реализации нейронных сетей [74–78]. Важно отметить, что развитие данного направления соответствует общей тенденции дополнения или замены цифровых электронных вычислительных устройств их оптически аналогами, которые в перспективе позволят преодолеть ограничения существующих систем, связанные с недостаточной скоростью вычислений и высоким энергопотреблением.

В области оптических нейронных сетей большой интерес вызывают т.н. дифракционные нейронные сети (ДНС), выполненные в виде каскада последовательно расположенных фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [79–95]. Следует отметить, что научное направление, посвящённое дизайну ДОЭ (в том числе каскадных) для решения различных задач по преобразованию и фокусировке лазерного излучения, имеет долгую историю и активно развивается уже более 50 лет [96–104]. В то же время применение каскадных ДОЭ для оптического решения задач машинного обучения впервые было продемонстрировано только в 2018 году в основополагающей работе [79]. В этой работе на основе ряда аналогий между каскадом ДОЭ и стандартной (искусственной) нейронной сетью был предложен термин «дифракционная нейронная сеть» и теоретически и экспериментально продемонстрирована возможность оптического решения задач классификации с помощью каскадных ДОЭ. Работа [79] послужила своеобразным триггером и вызвала целый вал публикаций по тематике ДНС и их при-

менению в различных задачах (по рассматриваемой тематике в последние годы публикуются сотни работ в высокорейтинговых научных журналах). В последующих работах были рассмотрены ДНС (или каскадные ДОЭ) для решения различных задач классификации [80, 81, 83–86, 89–92], для распознавания объектов и видео [85, 87], для выделения главного объекта на изображении (англ.: *salient object detection*) [81], для реализации различных математических преобразований, описываемых линейными операторами [83, 90, 93, 94] и имитации функций изображающих систем [95]. Основным методом расчёта ДНС является стохастический градиентный метод, а также его различные модификации [105].

Помимо ДНС в виде каскада ДОЭ, предназначенных для работы с оптическими сигналами, распространяющимися в свободном пространстве, были предложены планарные варианты ДНС в геометрии «на чипе» [106, 107] для широко используемой технологической платформы «диэлектрик на диэлектрике». В этом случае обрабатываемые оптические сигналы распространяются в плоско-параллельном волноводном слое, а в качестве ДОЭ используются планарные структуры (т.н. металинии), выполненные в виде выемок или ступенек на поверхности волноводного слоя.

Как отмечено выше, область исследований, связанная с ДНС, является новой, и первые работы по этой тематике появились всего около 6 лет назад. В связи с этим существующие ДНС пока проигрывают обычным (цифровым) искусственным нейронным сетям по точности и сложности решаемых задач. В то же время в качестве потенциальных преимуществ ДНС выделяются высокое быстродействие (вычисления выполняются «со скоростью света»), широкие возможности параллельной обработки (например, за счёт мультиплексирования по длине волны) и низкое энергопотребление.

Рассмотрим ряд задач в области ДНС, которые, по мнению авторов настоящей статьи, позволят «приблизить» ДНС к массовому

практическому применению и расширить их функциональные возможности.

При практической реализации ДНС одной из важных проблем является требование к высокой точности позиционирования образующих её ДОЭ. В этой связи во многих работах экспериментальные исследования ДНС выполняются на терагерцовой платформе [79, 82, 84, 94]. В частности, в базовой работе [79] экспериментальные исследования ДНС в виде каскада из пяти ДОЭ для решения задачи классификации рукописных цифр выполнялись с терагерцовым источником с длиной волны 0,75 мм. При такой длине волны было относительно несложно позиционировать ДОЭ с малыми ошибками по сравнению как с длиной волны, так и с размером пикселя дифракционного микрорельефа ДОЭ, который составлял 0,4 мм. Для излучения видимого диапазона необходимость точного позиционирования ДОЭ становится значительно более серьёзной проблемой, особенно при большом числе ДОЭ [83, 85, 86]. В частности, в работе [86] теоретически и экспериментально исследована ДНС, состоящая из пяти ДОЭ (размер пикселя дифракционного микрорельефа 4 мкм), для оптической классификации рукописных цифр при длине волны 632,8 нм. В данной работе показано, что случайные ошибки позиционирования ДОЭ в виде поперечных смещений в один пиксель приводят к сильному снижению точности классификации (с 91,2 % до 67,6 %). Отметим, что для позиционирования ДОЭ в [86] использовались высокоточные моторизованные платформы с шагом перемещений по осям координат в 1 мкм. В результате была экспериментально достигнута точность классификации в 88 % (против 91,2 % при теоретическом моделировании).

Один из способов решения проблемы точности позиционирования, который возможен в случае, когда в качестве ДОЭ, образующих ДНС, используются фазовые пространственные модуляторы света (ПМС), состоит в обучении ДНС на полях, измеренных в уже собранной оптической системе [83, 85]. Однако для измерения ам-

плитуд и фаз световых полей, падающих на ПМС, требуется сложная оптическая схема, включающая набор интерферометров (по числу используемых ПМС). При этом также требуется многократно решать обратные задачи восстановления фазы светового поля по измеренным интерферограммам.

По мнению авторов статьи, наиболее перспективным методом «борьбы» с проблемой точности позиционирования элементов ДНС является разработка специальных методов дизайна, основанных на методах стохастического программирования и учитывающих ошибки позиционирования ДОЭ на этапе расчёта ДНС.

Ещё одной задачей, представляющей большой научный и практический интерес, является задача расчёта ДНС, предназначенных для работы с излучением нескольких различных длин волн. Далее будем называть такие ДНС спектральными ДНС. Спектральные ДНС могут использоваться для обработки спектральной информации, осуществлять параллельное решение различных задач машинного обучения на различных длинах волн, изменять функциональность (решаемую задачу) в зависимости от длины волны падающего излучения и т.д. В частности, в работе [82] рассмотрен расчёт ДНС для спектральной фильтрации и анализа спектрального состава падающего излучения. В работах [94, 95] были рассмотрены спектральные ДНС для оптической реализации различных линейных преобразований на различных длинах волн (каждое преобразование осуществляется на своей длине волны), а также для формирования мультиспектральных изображений. В недавней работе некоторых авторов настоящей статьи [108] был предложен новый и эффективный метод расчёта спектральных ДНС для решения различных задач классификации на различных длинах волн.

Рассмотрим более подробно задачу расчёта спектральной ДНС, предназначенной для решения Q различных задач классификации P_q , $q=1, \dots, Q$ на Q различных длинах волн λ_q , $q=1, \dots, Q$, так что каждая задача классификация решается на «своей» длине волны.

Будем считать, что ДНС состоит из n фазовых ДОЭ, расположенных в плоскостях $z=f_1, \dots, z=f_n$ и задаваемых функциями высоты дифракционного микрорельефа $h_1(\mathbf{u}_1), \dots, h_n(\mathbf{u}_n)$ (рисунок 2.12).

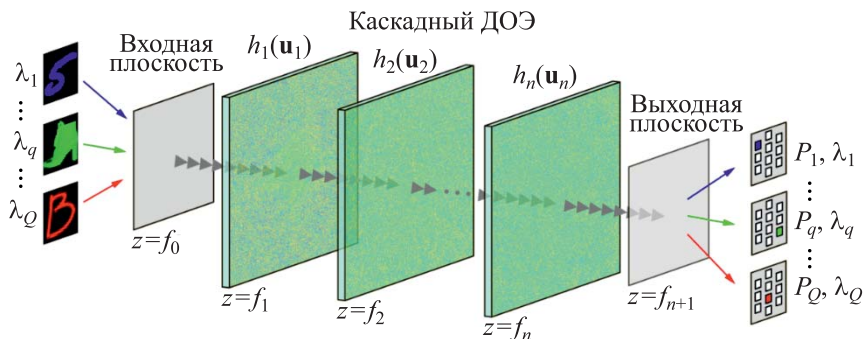


Рисунок 2.12 – Геометрия задачи расчёта ДНС для решения различных задач классификации на различных длинах волн

Опишем сначала требуемое функционирование ДНС на одной длине волны $\lambda_q \in \{\lambda_1, \dots, \lambda_Q\}$. Пусть во входной плоскости генерируются световые поля $w_{q,j}(\mathbf{u}_0)$, соответствующие изображениям объектов из N_q различных классов, соответствующих задаче классификации P_q . Сформированное поле $w_{q,j}(\mathbf{u}_0)$ распространяется через каскадный ДОЭ в выходную плоскость $z=f_{n+1}$. Будем считать, что в выходной плоскости $z=f_{n+1}$ заданы N_q пространственно разделённых «целевых областей» $G_{q,k}$, $k=1, \dots, N_q$, соответствующих N_q различным классам задачи P_q . При каждом входном изображении в данных областях формируется некоторое распределение «энергий», соответствующее интегралам от сформированного распределения интенсивности по данным областям. Для решения задачи классификации P_q требуется, чтобы при «входном сигнале» $w_{q,j}(\mathbf{u}_0)$, соответствующем объекту j -го класса, каскадный ДОЭ формировал такое распределение интенсивности в выходной плоскости, для которого максимум из формируемых энергий $E_{q,k}$, $k=1, \dots, N_q$ достигается в соответствующей данному классу целевой области $G_{q,j}$ (рисунок 2.12).

Выше мы описали требуемое функционирование ДНС на одной длине волны λ_q . Задачу расчёта ДНС для решения различных задач классификации P_q , $q=1, \dots, Q$ на различных длинах волн λ_q , $q=1, \dots, Q$ можно сформулировать как задачу расчёта таких функций высоты дифракционного микрорельефа $h_1(\mathbf{u}_1), \dots, h_n(\mathbf{u}_n)$ каскадного ДОЭ, что при любой длине волны $\lambda_q \in \{\lambda_1, \dots, \lambda_Q\}$ и любом входном сигнале, соответствующем изображению объекта задачи P_q , решаемой на данной длине волны, каскадный ДОЭ обеспечивает формирование светового поля, для которого максимум энергии достигается в целевой области, соответствующей классу входного изображения.

В работе [108] в рамках скалярной теории дифракции некоторыми авторами настоящей статьи был предложен эффективный градиентный метод решения рассмотренной задачи. При этом для производных функционала ошибки, представляющего ошибку решения заданных задач классификации на расчётных длинах волн, были получены явные аналитические выражения. Градиентный метод [108] был применён для решения трёх следующих задач классификации на трёх длинах волн: (1) задачи классификации рукописных цифр из базы данных MNIST при длине волны $\lambda_1=457$ нм; (2) задачи классификации предметов одежды из базы данных Fashion MNIST при $\lambda_2=532$ нм и (3) задачи классификации десяти рукописных букв латинского алфавита от А до J (строчных и прописных) из базы данных EMNIST при $\lambda_3=633$ нм. В качестве примера на рисунке 2.13 показаны рассчитанные функции высоты микрорельефа для ДНС, состоящей из трёх ДОЭ. При расчёте расстояния от входной плоскости до 1-го ДОЭ, расстояния между ДОЭ и расстояния от последнего ДОЭ до выходной плоскости считались одинаковыми и равными 160 мм. При этом функции высоты микрорельефа ДОЭ задавались на сетках 512×512 с шагом 10 мкм.

Для оценки рабочих характеристик рассчитанной ДНС (рисунок 2.13) было выполнено тестирование её работы с использовани-

ем стандартных тестовых выборок из баз данных MNIST, Fashion MNIST и EMNIST. Результаты тестирования представлены на рисунке 2.14 в виде так называемых матриц ошибок и матриц энергий [108]. Диагональные элементы матриц ошибок представляют точности классификации (в процентах) для объектов различных из трёх рассматриваемых задач, а диагональные элементы матриц ошибок – средние энергии в целевых областях (в процентах). Над матрицами ошибок указаны общие точности классификации (т.е. отношение числа правильно распознанных объектов из задачи P_q к общему числу объектов из данной задачи в тестовой выборке). Общие точности классификации для задач P_1 , P_2 P_3 составили 97,89%, 89,75% и 93,22% соответственно. Отметим, что достигнутые общие точности классификации являются очень хорошими и превышают точности классификации, полученные в других статьях для ДНС, работающих только на одной длине волны.

Для иллюстрации работы ДНС (каскада из трёх ДОЭ) на рисунке 2.15 приведены конкретные примеры входных изображений из задач классификации P_q , $q = 1, 2, 3$ и соответствующие им распределения энергий (3), формируемые ДНС в выходной плоскости.

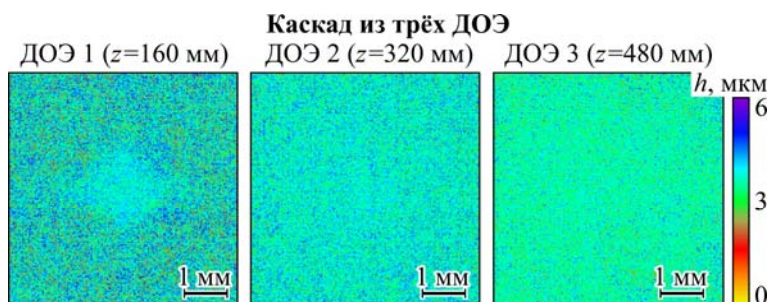


Рисунок 2.13 – Функции высоты микрорельефа ДНС из трёх ДОЭ для решения трёх задач классификации на трёх длинах волн

Матрица ошибок

Предсказанные номера классов		Общая точность = 97,98%									
0	99	0	0,4	0	0	0,3	0,7	0	0,4	0,6	
1	0	98,9	0,1	0	0,2	0	0,2	0,5	0,1	0,2	
2	0,2	0,3	96,6	0,4	0,5	0,2	0,1	1	0,6	0,1	
3	0	0	0,5	97,4	0	1	0	0,2	0,5	0,6	
4	0	0,2	0,1	0	97,9	0	0,1	0,2	0,5	1	
5	0	0	0	1	0	97	0,8	0,2	0,3	1	
6	0,4	0,5	0,2	0	0,4	0,6	98,1	0	0,1	0	
7	0,1	0,1	0,6	0,8	0	0,3	0	96,9	0,5	0,7	
8	0,2	0,1	1,6	0,3	0,2	0,3	0	0,3	96,7	0,3	
9	0,1	0	0	0,2	0,8	0	0	0,7	0,2	95,6	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Истинные номера классов									

МNIST

Матрица энергий (%)

Области в выходной плоскости		Минимальный контраст = 0,37									
0	23,3	8,8	8,3	8,5	8,3	8,3	8,6	7,9	8,5	8,4	
1	8,4	24,1	8,6	8,7	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4	8,8	
2	8,5	8,2	22,5	8,9	8,3	8,3	8,4	8,6	8,6	8,4	
3	8,6	8,2	8,9	22,2	8,5	9,3	8,5	8,6	9,1	9	
4	8,9	8,5	8,8	8,6	23,4	8,8	8,7	9,2	8,9	9,5	
5	8,5	8,7	8,5	9,2	8,5	22,5	8,7	8,7	9,1	8,9	
6	8,6	8,4	8,6	8,7	8,8	8,5	24,4	8,7	8,7	8,6	
7	8,5	8,5	8,6	8,3	8,4	8,5	7,8	23	8,3	8,8	
8	8,4	8,4	8,8	8,5	8,6	8,9	8,3	8,5	21,9	8,8	
9	8,3	8,2	8,3	8,3	8,7	8,2	8	8,3	8,4	20,8	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Истинные номера классов									

Предсказанные номера классов		Общая точность = 89,75%									
0	87,6	0,2	3,1	2,3	0,1	0	14,1	0	0,2	0	
1	0,6	97,9	0,2	0,6	0	0	0,2	0	0,2	0	
2	1,6	0,2	81,6	0,8	7,2	0	7,9	0	0,5	0	
3	1,8	0,9	1,6	89,9	3,1	0	2,8	0	0,3	0	
4	0,4	0,3	8,3	2,8	84,6	0	7,1	0	0,2	0	
5	0,2	0	0,1	0	0	97,3	0,1	0,5	0,2	0,5	
6	6,4	0,3	4,8	3,2	4,6	0,1	66,7	0,1	0,6	0,1	
7	0,2	0	0	0	0,1	1,8	0	97,3	0,3	2,3	
8	1,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0	1	0	97,5	0	
9	0	0	0	0	0	0,8	0,1	2,1	0	97,1	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Истинные номера классов									

FMNIST

Области в выходной плоскости		Минимальный контраст = 0,24									
0	19,8	8,3	9,3	8,8	8,5	8,2	10,5	8	8,4	8,3	
1	8,7	23,7	8,8	9,1	8,8	8,6	8,7	8,5	8,9	9	
2	8,9	8	18	8,4	10	8,1	9,8	8	8,4	8	
3	9,2	9,1	9,3	21,1	9,7	8,6	9,4	8,6	8,8	8,5	
4	8,9	8,7	10,2	9,2	18,3	8,5	9,8	8,9	8,8	8,6	
5	9	8,2	8,7	8,7	8,8	23,7	8,9	9,4	8,9	9,1	
6	9,8	8,6	10,3	9,3	10,5	8,5	17	8,8	8,9	8,6	
7	8,4	8,4	8,2	8,1	8,2	8,6	8,4	22,6	8,4	8,7	
8	9	8,7	9	8,9	9,1	8,7	9,2	8,8	22,3	8,8	
9	8,2	8,4	8,3	8,3	8,2	8,4	8,2	8,5	8,3	22,4	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Истинные номера классов									

Предсказанные номера классов		Общая точность = 93,22%									
0	92	0,9	0,6	2,8	1,1	0,3	3,3	2	0,1	0	
1	0	93,1	0,3	1,5	0,5	0,3	2,3	1,3	0,3	0,5	
2	1	0,1	93,9	0,6	3,8	0,1	1,6	0,4	0,4	0	
3	1,6	1,3	0,3	92,4	0	0,4	0,3	0,4	0	1,9	
4	0,9	1	3,8	0,1	92,9	0,6	0,8	0,3	0,1	0	
5	0,8	0,1	0,1	0,4	0,9	96,1	1,3	0	0,3	0,4	
6	1,5	0,9	0,6	0,5	0,4	0,9	89,6	0,1	0,4	1,4	
7	2	2	0	0,4	0	0	0	95	0,5	0,1	
8	0,1	0,3	0,4	0,3	0,5	0,8	0,1	0,4	95,5	4	
9	0,1	0,4	0,1	1,1	0	0,6	0,9	0,3	2,5	91,8	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Истинные номера классов									

EMNIST

Области в выходной плоскости		Минимальный контраст = 0,36									
0	20,4	8,3	8,6	9,1	8,3	8,3	9,1	9,1	8,2	8,4	
1	8,4	21,5	8,6	9,3	8,9	8,6	9,1	9,5	8,7	8,6	
2	8,7	8,4	21,8	8,4	9,9	8,3	8,9	8,3	8,5	8,3	
3	9,4	9,1	8,6	21,1	8,7	8,4	8,6	9,2	8,6	9,1	
4	8,8	8,9	9,9	8,5	21,1	9,1	8,8	8,6	8,6	8,4	
5	9	8,6	8,5	8,6	8,9	22,5	9,2	8,8	8,7	8,9	
6	9,4	9,1	9	8,7	8,9	9,2	21	8,7	8,3	9,1	
7	8,9	9,2	8,2	8,6	8,2	8,5	8,3	21,1	8,7	8,1	
8	8,5	8,7	8,7	8,6	8,7	8,7	8,4	8,7	22,7	9,6	
9	8,4	8,2	8,2	9,1	8,2	8,4	8,6	8,2	9	21,5	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		Истинные номера классов									

Рисунок 2.14 – Матрицы ошибок и матрицы энергий для задач $P_q, q = 1, 2, 3$, рассчитанные для ДНС на рисунке 2.13

По мнению авторов параграфа, возможности параллельного решения различных задач классификации на различных длинах волн являются серьезным потенциальным преимуществом спектральных ДНС, которое может в перспективе обеспечить более высокое быстродействие по сравнению с цифровыми вычислительными системами. Соответственно, развитие методов дизайна спектральных ДНС, ориентированных на работу с большим количеством спектральных каналов, является высокоактуальной задачей.

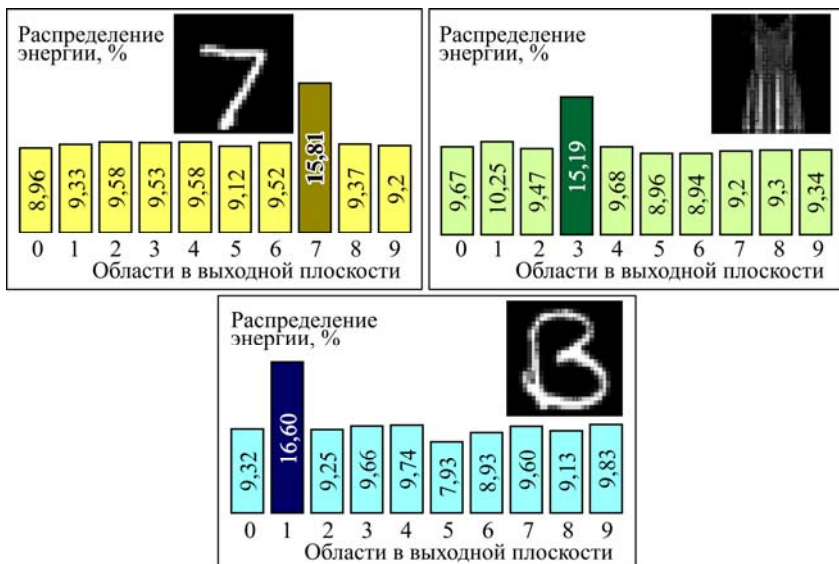


Рисунок 2.15 – Примеры входных изображений (цифра «7», объект «Dress» и буква «B») из задач P_q , $q = 1, 2, 3$ и формируемые распределения энергии в целевых областях для ДНС на рисунке 2.13

В заключение отметим, что существенным ограничением ДНС, по сравнению с «обычными» искусственными нейронными сетями, являются ограничения в возможности реализации нелинейных функций активации. В подавляющем большинстве работ по ДНС рассматриваются «почти линейные системы», в которых единственная нелинейность (в виде квадрата модуля от комплекснозначной функции) возникает только при регистрации функции интенсивности светового поля в выходной плоскости ДНС. Для оптической реализации нелинейных функций активации могут быть использованы нелинейные материалы, например, в работе [81] использовались нелинейные фотопреломляющие кристаллы SBN:60, осуществляющие нелинейное преобразование амплитуды световых полей. Однако в общем случае для эффективной работы нелинейных материалов требуются световые поля с относительно большими

ми энергиями (интенсивностями). При этом исследования ДНС с нелинейностями, представленные в работе [81], не демонстрируют значимых улучшений в точности решаемых задач машинного обучения по сравнению с почти линейными системами. Оригинальный метод нелинейной обработки входного оптического сигнала, осуществляемый в рамках линейной оптики, представлен в недавней работе [109]. В данной работе нелинейное преобразование реализуется за счёт последовательных линейных преобразований «повторенного» входного сигнала (см. рисунок 1b в [109]). Тем не менее и в работе [109], по крайней мере для простых задач классификации (задач классификации рукописных цифр и предметов одежды из баз данных MNIST и Fashion-MNIST), полученные значения точности классификации уступают результатам других работ, в которых данные задачи решались с помощью ДНС без нелинейных преобразований. Таким образом, в настоящее время важная задача разработки методов, обеспечивающих возможности реализации нелинейных функций активации в ДНС, является недостаточно проработанной и поэтому представляет большой научный и практический интерес.

2.4 Фотонные телекоммуникации на основе применения вихревых лазерных пучков

Вихревые лазерные пучки

Лазерные пучки с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в настоящее время привлекают внимание большого количества исследователей в области фотоники и лазерных информационных технологий. Волновой фронт указанных пучков имеет спиральную или винтовую структуру и содержит области фазовой сингулярности (дислокации волнового фронта), где интенсивность света равна нулю, а фаза имеет скачок первого рода. Такая структура напоми-

нает форму и соответствует свойствам природных вихрей. Поэтому термины «вихревые пучки» и «сингулярные пучки» также получили широкое распространение.

Впервые оптический элемент со скачком фазы рассмотрен в работе «Бессель-оптика» [110] (рисунок 2.16а). Берри дал общее конструктивное определение топологического заряда оптических вихрей [111].

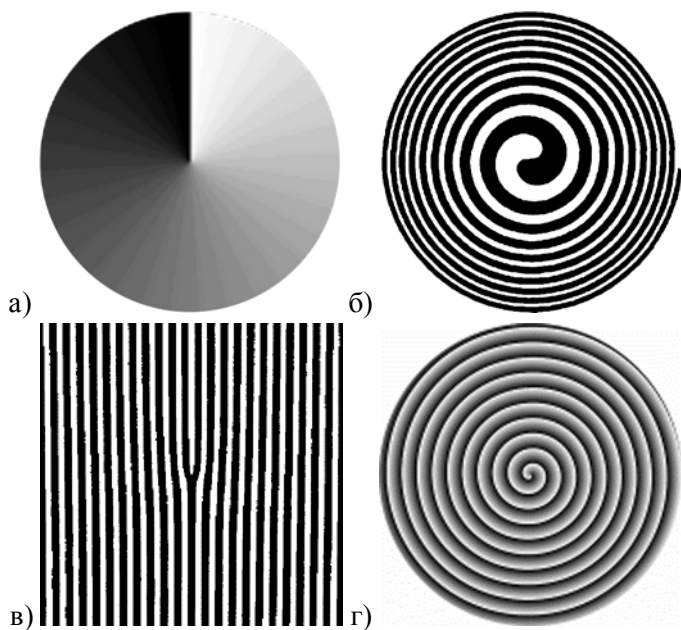
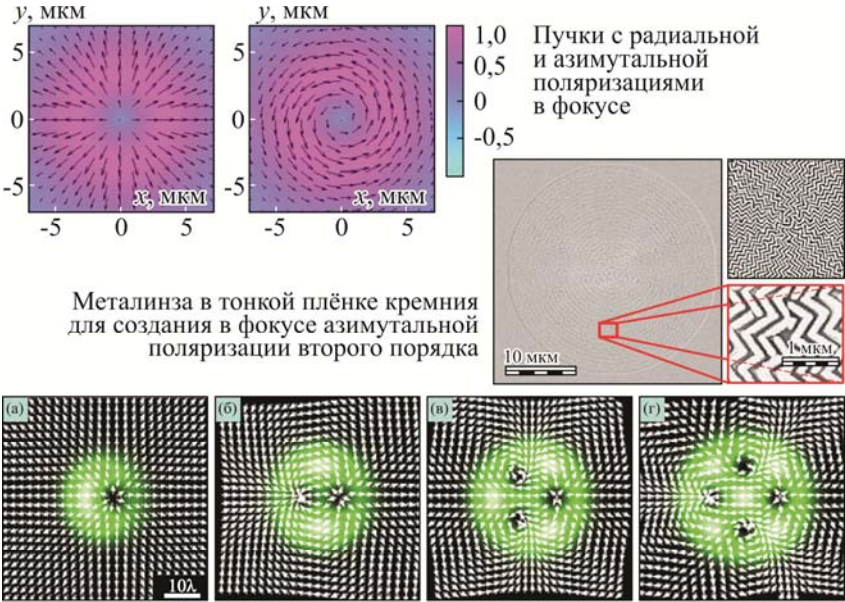


Рисунок 2.16 – Элемент Бессель-оптики [110] (а), винтовая зонная пластинка (б), решётка с вилочкой (в), винтовой аксикон (г)

Вихревые поля могут формироваться в лазерных резонаторах, а также представляют собой поперечные моды волноводов [112]. Большое распространение для формирования пучков с ОУМ получили жидкокристаллические и микрзеркальные пространственные модуляторы света [113], которые позволяют видоизменять формируемые пучки в процессе работы. Однако в формируемом модуля-

тором вихревым пучке присутствуют физические неоднородности, обусловленные пиксельной структурой модулятора.

Наиболее эффективным способом формирования вихревых пучков является использование дифракционных оптических элементов, реализуемых в виде тонких пластин с фазовым или амплитудным дифракционным микрорельефом. Примерами таких оптических элементов являются спиральная фазовая пластинка [114], винтовой аксикон [115], решётка с вилкой [116] и винтовая зонная пластинка [117].



Металлиза в тонкой плёнке кремния для создания в фокусе азимутальной поляризации второго порядка

Пучки с поляризационной сингулярностью (одна, две, три и четыре точки)

Рисунок 2.17 – Поляризационные сингулярности в лазерных пучках

Помимо лазерных пучков с дислокацией фазы, существуют пучки с поляризационной сингулярностью, в некоторых точках которых не определена поляризация. Например, в центре пучков с радиаль-

ной или азимутальной поляризацией имеются точки с такой сингулярностью. Формировать пучки с неоднородной поляризацией позволяют фотонные элементы на основе метаповерхностей [118].

Оптические вихри, сформированные модуляторами и зеркалами

Оптические вихри можно эффективно формировать с помощью жидкокристаллических пространственных модуляторов света (ПМС). Разрешение современных ПМС позволяет формировать вихри с топологическим зарядом (ТЗ) до 200. Для формирования вихрей с большим ТЗ нужны зеркала.

Нобелевская премия по физике в 2022 году присуждена в том числе Антону Цейлингеру (*A. Zeilinger*) за работы в области квантового перепутывания фотонов [119]. В работе [120] он использовал спиральное зеркало для формирования фотонов с орбитальным угловым моментом, равным топологическому заряду 10010, умноженному на постоянную Планка (рисунок 2.18).

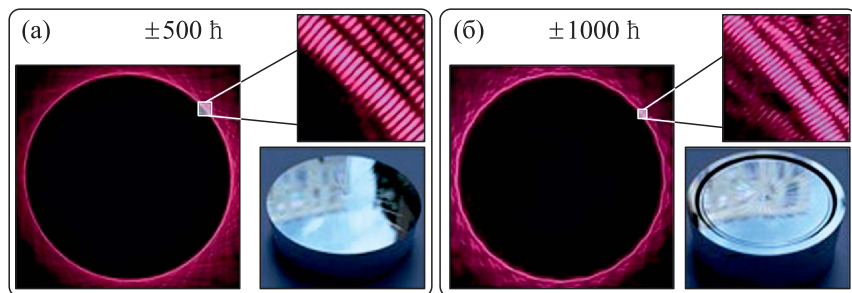


Рисунок 2.18 – Генерация мод высокого порядка ОАМ с помощью спиральных фазовых зеркал (SPM). Моды генерируются диагонально поляризованным лазером, посылающим через установки переноса с SPM для $500\hbar$ (а) и $1000\hbar$ (б). Изображения были сделаны с помощью зеркальной камеры. В нижних правых сторонах показаны фотографии с используемых SPM, которые сделаны из 2-дюймовых алюминиевых пластин. Требуемая спиральная фазовая структура реализуется 25 сегментами, каждый из которых модулирует до 40π (а) и 80π (б) [120]

Применение вихревых лазерных пучков в передаче сигналов

Лазерная связь – технология, основанная на передаче данных модулированным лазерным излучением. Применяется в волоконно-оптических, атмосферных и космических линиях связи. Позволяет повысить скорость передачи информации на три порядка: 100 Гбит/с по сравнению с радиосвязью (< 100 Мбит/с).

Оптическая связь на основе вихревых пучков является одним из перспективных направлений развития технологий проводной и беспроводной передачи данных. Физическое мультиплексирование оптических каналов и их последующее разделение делает возможным передачу сигналов по технологии MIMO (мультивход мульти-выход; англ. *Multiple Input Multiple Output*) [121], метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала.

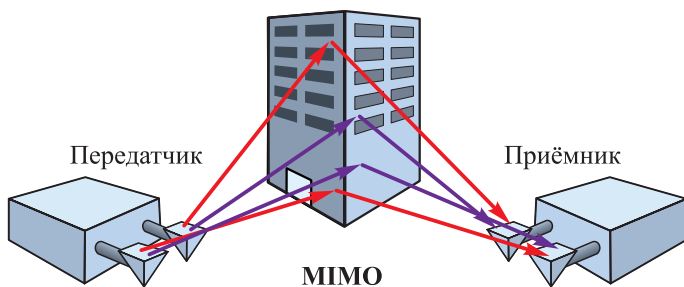


Рисунок 2.19 – Метод пространственного кодирования сигнала

Проводная передача данных основана на формировании вихревых мод как в стандартном волокне, так и в специализированных волноводах [122]. Проведённые экспериментальные исследования показали отсутствие для проводной связи существенного преимущества модового уплотнения над стандартным спектральным DWDM (англ. *Dense Wavelength-Division Multiplexing*), однако бурное развитие элементов дифракционной оптики и нанофотоники

даёт предпосылки для будущего объединения указанных технологий мультиплексирования.

В то же время для систем беспроводной связи преимущество ММО очевидно, поскольку помимо спектрального уплотнения, ММО обеспечивает пространственное мультиплексирование.

Системы беспроводной лазерной связи широко используются при создании локальных сетей между объектами инфраструктуры [123], применяются для осуществления взаимодействия наземных станций с беспилотными авиационными системами (БАС) и самолётами [124], активно внедряются в комплексы космического базирования [125].

Дальнейшее развитие систем передачи информации в направлении повышения пропускной способности и помехоустойчивости связано с применением пучков с ОУМ.

Перспективные системы беспроводной лазерной связи

Системы лазерной связи позволяют организовать локальные сети между объектами инфраструктуры [123, 126, 127], применяются для осуществления взаимодействия наземных станций с беспилотными летательными аппаратами и самолётами [124, 128], активно внедряются в комплексы космического базирования [125, 129].

Дальнейшее развитие указанных систем основано на повышении пропускной способности и устойчивости оптического канала связи. Уплотнение каналов передачи информации возможно на основе мультиплексирования оптического сигнала по длинам волн, поляризации, пространственной структуре, модовому состоянию [130–132]. Вариации в амплитудно-фазовой структуре пучков осуществляются достаточно просто с использованием средств дифракционной оптики и динамических модуляторов света [133–136], что обеспечивает широкий спектр возможностей при кодировании и (де)мультиплексировании оптических сигналов [137–141].

Лазерные пучки с ОУМ нужны для увеличения объёма передачи информации в системах связи (по оптоволокну, в свободном пространстве и в квантовой информатике) (рисунок 2.20).

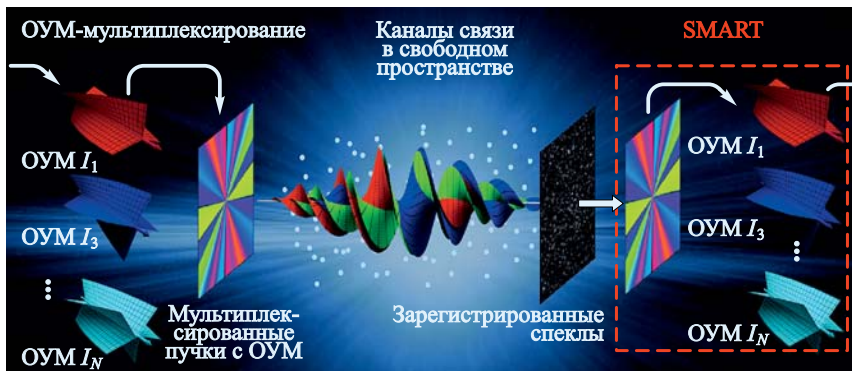


Рисунок 2.20 – Мультиплексированные каналы связи на основе пучков с ОУМ

В работе [142] сообщается о создании атмосферной многоканальной системы передачи данных с разделением каналов вихревыми пучками различных порядков, в том числе дробных. Система реализована на основе двух пространственных модуляторов света (ПМС), один из которых формирует мультиплексированный сигнал на передающей стороне, а другой реализует многоканальный ДОО для разделения вихревых пучков на приёмной стороне. Исследована устойчивость канала связи к атмосферным помехам и перекрёстным помехам между каналами.

Однако в формируемом модулятором вихревом пучке присутствуют физические неоднородности, обусловленные пиксельной структурой модулятора. Поэтому в качестве альтернативы для подобных систем связи можно использовать дифракционные оптические элементы, формирующие структурированные пучки.

Аналогичный подход получил широкое распространение в системах фокусировки светового излучения для формирования требуемой диаграммы направленности [143–153].

В настоящей работе представлен обзор разработок в области атмосферной оптической связи с использованием особых свойств различных пучков, формируемых ДОЭ и предназначенных как для повышения помехозащищённости, так и для мультиплексирования информационных каналов.

Многоканальная беспроводная связь на основе применения ДОЭ

На данный момент разработано множество методов генерации и детектирования вихревых пучков на основе дифракционных оптических элементов [154, 155], цилиндрических линзовых преобразователей мод [156, 157], спиральных фазовых пластинок [111, 158, 159], спиральных решёток [160], метаповерхностей и q-пластин [161, 162], анизотропных кристаллов [163, 164], микрорезонаторов [165, 166] и других устройства [167]. Однако наиболее эффективным и гибким способом формирования вихревых пучков является использование дифракционных оптических элементов, реализуемых в виде тонких пластин с фазовым дифракционным микрорельефом.

В работе [111] ДОЭ представляет собой спиральную фазовую пластинку (СФП), генерирующую пучки с ОУМ. Изготовленный элемент позволяет формировать вихревые пучки первого порядка при облучении лазерным излучением с длиной волны 2050 нм, второго порядка при длине волны 1025 нм и третьего порядка при длине волны 680 нм.

Важной особенностью представленного подхода является необходимость анализа поляризационного и фазового состояний лазерных пучков, что является одним из направлений совместного использования нескольких степеней свободы лазерного излучения [130–132, 168, 169]. Для реализации такой возможности в работе [170] предлагается использовать фиксированный набор неполяризуемых фазовых элементов. Экспериментальная реализация предложенного метода основана на использовании фазовых ДОЭ разно-

го порядка. Поляризационное состояние пучка является ещё одной степенью свободы при организации оптической связи, и для этого в работе [171] предложена полностью симметричная схема формирователя цилиндрических векторных пучков, в которой два дифракционных аксикона и помещённый между ними интерференционный поляризатор образуют сэндвич-структуру минимально возможной толщины.

Стоит отметить, что известно множество способов генерации неоднородно поляризованных пучков, среди которых интерференционные методы [172–174], применение анизотропных кристаллов [175–177], а также метаповерхностей [178–180]. Подход, рассмотренный в работах [181, 182], основан на оптических элементах в виде секторных сэндвич-структур, состоящих из сложенных вместе поляризационной и фазовой пластин.

Азимутально поляризованное распределение интенсивности может быть сформировано с помощью биконического рефракционного аксикона [183]. Схема такого эксперимента приведена на рисунке 2.21.

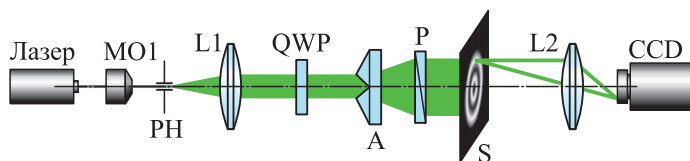


Рисунок 2.21 – Оптическая схема формирования азимутально поляризованного пучка рефракционным биконическим аксиконом: MO1 – микрообъектив; L1, L2 – линзы; QWP – четвертьволновая пластина; А – биконический аксикон; P – линейный поляризатор; S – экран; CCD – видеокамера

Коллимированный линзой L1 входной лазерный пучок приобретает круговую поляризацию при прохождении четвертьволновой пластины QWP. Далее пучок падает на внутреннюю коническую поверхность биаксикона А, который осуществляет преобразование поляризации. При этом пучок коллимируется внешней поверхно-

стью аксикона. В результате формируется азимутально поляризованный пучок с вихревой фазовой и кольцевой формой интенсивности. Такой пучок пригоден в том числе для проводной передачи сигналов с помощью специализированных волноводов, разработанных для передачи вихревых мод [122, 184].

Следующим шагом к разработке системы связи с разделением каналов по поляризациям можно считать эксперимент, представленный в [185]. Предложенный в работе метод позволяет с помощью фазового ДОО осуществить распознавание состояния цилиндрической поляризации первого порядка. В ходе эксперимента эти элементы были встроены в коммерческую волоконно-оптическую систему связи, работающую на частотах ближнего ИК-диапазона. Схема оптической установки представлена на рисунке 2.22.

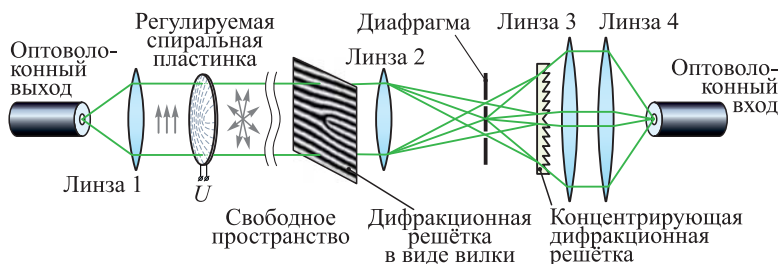


Рисунок 2.22 – Схема оптической установки

Формирование коллимированного пучка с цилиндрической поляризацией осуществляется с помощью линзы (L1) и регулируемой спиральной пластинки (QR). После преодоления свободного пространства на приёмной стороне осуществляется распознавание поляризации, которое основано на применении дифракционной решётки в форме вилки. При прохождении пучка с цилиндрической поляризацией первого порядка через указанную решётку формируются максимумы интенсивности в центре дифракционных порядков, а в случае однородной поляризации формируются кольцевые распределения интенсивности. Фильтрация центральной части ди-

фракционного порядка от кольцевого распределения осуществляется диафрагмой. После определения состояния поляризации пучки требуемых порядков дифракции эффективно вводились в оптическое волокно с помощью дополнительного фазового элемента.

В работе [186] аналогичным способом осуществляется одновременное распознавание отдельных вихревых состояний пучков. Фазовый многопорядковый ДОЭ используется в качестве корреляционного фильтра, который формирует соответствующие дифракционные порядки. Данная методика была применена для вихревых пучков Гаусса–Лагерра и показала высокую устойчивость к турбулентностям среды.

Мультиплексирование/демультиплексирование вихревых пучков делает возможным передачу сигналов по технологии ММО [121]. В этом случае осуществляется пространственное уплотнение канала связи, что особенно актуально при передаче по атмосферному каналу связи, где спектральное уплотнение на больших расстояниях усложнено вследствие хроматических aberrаций.

На описанном принципе в работе [187] построена система передачи данных между беспилотным летательным аппаратом и наземной станцией. В качестве мультиплексора использовался многоплоскостной преобразователь спектра, состоящий из сферического зеркала и отражающей фазовой пластины. Такой подход позволил добиться скорости передачи, равной 80 Гбит/с, на расстоянии до 100 м.

Стоит отметить, что увеличение расстояния между объектами неизбежно приведёт к увеличению диаметров сферических зеркал, что обусловлено нулевой интенсивностью в центре вихревых пучков.

Повышение помехозащищенности каналов связи

Особый интерес представляют экспериментальные исследования по передаче данных, представленные в работе [188]. Построение атмосферной оптической системы связи в ближнем ИК-

диапазоне реализуется на основе пары медиаконвертеров сигнала формата 100Base-TX/1000BASE-T в формат 1000BASE-SX/LX с SFP-трансиверами DEM-310GT. Схема эксперимента представлена на рисунке 2.23.

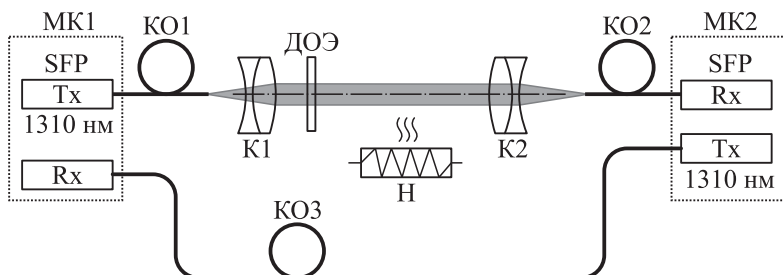


Рисунок 2.23 – Оптическая система связи в ближнем ИК-диапазоне

Передающий коллиматор излучения при этом был дополнен спиральной фазовой пластинкой [154, 155, 158, 159] для формирования вихревого пучка. Пучок, проходящий через атмосферу, подаётся в приёмник SFP вторым коллиматором (K2). Нагреватель (H) использовался для моделирования условий турбулентности при передаче оптического сигнала через атмосферу.

Проанализировано влияние атмосферных помех на скорость передачи данных. Показано, что применение вихревых пучков повышает устойчивость связи в условиях турбулентности, вызванной потоком теплого воздуха. Потери мощности составляют не более 3,5%, а снижение скорости передачи – не более 2%. Скорость при отсутствии помех составляла около 420 Мбит/с.

В этом же плане в работе [189] экспериментально исследовано распространение различным образом структурированных вихревых пучков с длиной волны 1530 нм через случайную искажающую среду. Схема эксперимента приведена на рисунке 2.24.

Для формирования пучков в первом порядке дифракции использовались бинарные амплитудные ДОЭ. Показано, что затуха-

ние пучка не превышает 8% при максимально достижимой концентрации аэрозольных частиц на длине распространения около 1 м. По сцинтилляционным индексам наилучшие результаты получены для бесселевых пучков. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модификация корреляционного метода распознавания вихрей может успешно применяться в условиях турбулентности.

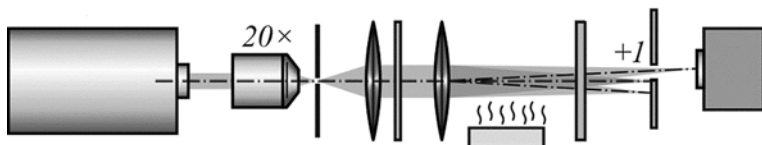


Рисунок 2.24 – Экспериментальная установка для исследования влияния турбулентных потоков в атмосфере на систему связи

2.5 Фотонные актуаторы

История изучения взаимодействия света и материи насчитывает почти 300 лет. Когда любой материал освещается источником света, то его тепловые, электронные, оптоэлектронные и механические характеристики начинают изменяться. Долгое время исследователи стремились понять основные механизмы и физику этих взаимодействий. Благодаря современным инструментам исследования материалов можно наблюдать воздействие света на материю на субмикронном уровне, где электромагнитное излучение оказывает значительное влияние. Известно [190–191], что при выборе подходящего материала, технологии изготовления и при регулировании структуры материалов взаимодействие света и материи может быть преобразовано в совершение небольшой механической работы внутри материала. В общем смысле актуаторы – это небольшие узлы или устройства, устанавливаемые в системах для выполнения определённых задач в ответ на сигнал [191]. Актуаторы можно разделить на две части: первая – это механически подвижные компоненты, такие как диафрагмы или балки, вторая – исполнительные

механизмы, например, оптический, биологический и т.д. Оптическая актуация может относиться как к процессам управления или активации механического движения, так и к появлению физического отклика в материале или устройстве под воздействием света, обычно лазерного или другого электромагнитного излучения [192]. Оптические актуаторы – это устройства, преобразующие световую энергию в энергию другой природы. Их работа основана на эффективном использовании взаимодействия излучения с веществом. Оптические актуаторы могут быть использованы в микроробототехнике, адаптивной оптике и биомедицинских устройствах. На рисунке 2.25 приведён принцип работы оптического актуатора. Ге и соавторы разработали обратимую оптическую актуаторную (приводную) систему с использованием деформированных фоточувствительных актуаторов на основе полукристаллического полиэтиленвинилацетата (пЭВА) с нанесёнными на него наночастицами золота (рисунок 2.25а). На рисунке 2.25б представлен график в режиме реального времени, показывающий оптические характеристики устройства, разработанного Ге и соавторами. Устройство демонстрирует значительный отклик при включении/выключении источника света, а также изменение плотности световой мощности и рабочих температур. Принцип работы оптических актуаторов, как правило, базируется на использовании фотоиндуцированных эффектов, а именно фототермических, фотохимических или фотоэлектрических процессов. Исследования в этой области значительно продвинулись за последние несколько десятилетий. За это время были изучены различные материалы, механизмы и области применения оптических актуаторов.

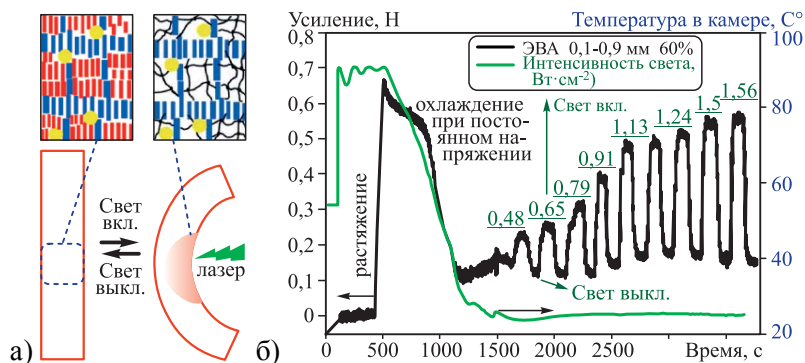


Рисунок 2.25 – Принцип работы деформированных фоточувствительных актуаторов, изготовленных из полукристаллического пЭВА с небольшим количеством нанесённых наночастиц золота. Активация происходит в результате дисбаланса между силами сжатия, вызванными плавлением, и силами расширения, вызванными кристаллизацией (а).

Кривая усилия для образца пЭВА (0,1 – 0,9 мм), подвергнутого следующей последовательности обработки: нагрев до 90°C для достижения равновесия, растяжение до относительного удлинения 60 % со скоростью 5°C/мин, охлаждение до комнатной температуры со скоростью 5°C/мин при постоянном напряжении, многократное включение/выключение света при комнатной температуре с различной интенсивностью освещения, как указано выше. Также показаны возможности оптического управления разработанным устройством в зависимости от рабочей температуры (б).

Рисунок использован с разрешения [193]

2.5.1 Фототермическая актуация

Одним из наиболее распространённых механизмов работы оптических актуаторов является фототермическая актуация, при которой поглощение света вызывает повышение температуры, приводящее к тепловому расширению или фазовым изменениям в материалах. Фототермическая актуация – это быстрорастущая область в микро- и наноинженерии, где свет используется для того, чтобы вызывать термические изменения в материалах, что приводит к выполнению механической работы. Данная технология привлекла внимание возможностью внедрения в микроэлектромеханических

системах (МЭМС), «мягкой» робототехнике, биомедицинских устройствах и других передовых инженерных областях.

Эффективность и универсальность фототермических актуаторов обусловлены их способностью работать без физического контакта, что снижает износ и увеличивает долговечность. Цель данной части обзора состоит в предоставлении информации о ключевых достижениях, материалах и применениях фототермических актуаторов [194].

Фототермическая актуация основана на преобразовании световой энергии в тепло, что, в свою очередь, вызывает изменение физических свойств материала (расширение или фазовый переход). Фундаментальный принцип действия фототермического актуатора заключается в поглощении света (обычно видимого или ближнего инфракрасного спектра) материалом, что вызывает локальный нагрев и является, в свою очередь, причиной теплового расширения, приводящего к механическому движению или деформации. Эффективность рассматриваемого процесса зависит от оптических и тепловых свойств материала актуатора, а также от длины волны используемого излучения [194].

Материал фототермического актуатора является ключевым фактором, определяющим эффективность его работы. Как правило, используются материалы, демонстрирующие высокую эффективность фототермического преобразования, такие как металлы (например, золото, серебро), материалы на основе углерода (например, графен, УНТ) и полупроводники. Коэффициент теплового расширения и свойства оптического поглощения упомянутых материалов играют важную роль при их выборе для конкретных применений.

Такие металлы, как золото и серебро, обладают высокой теплопроводностью и отличной эффективностью фототермического преобразования, что делает их пригодными для быстрой и чувствительной актуации. Однако их высокая плотность и стоимость могут выступать ограничивающими факторами [195].

Графен и УНТ стали перспективными материалами ввиду их превосходной тепло- и электропроводности, а также малого веса. Эти материалы особенно востребованы для создания гибких и эластичных актуаторов. Кроме того, исследователи продемонстрировали оптический микроактуатор с использованием оксида графена, который показал быструю и обратимую деформацию при освещении лазером. Фототермический эффект в графене и других наноматериалах особенно привлекателен из-за их высокой эффективности поглощения и теплопроводности [196–197]. На рисунке 2.26 показаны различные типы фототермических актуаторов на основе углерода, а также принципы их работы, включая фототермическое расширение, десорбцию, фазовое отклонение, магнитную восприимчивость и эффект Марангони.

Для осуществления фототермической актуации были разработаны некоторые полимеры, легированные наночастицами или другими фототермическими добавками. Благодаря своей гибкости и биосовместимости эти материалы актуальны для «мягкой» робототехники и биомедицинских применений [198].

Установив исключительные фототермические свойства УНТ, в частности, одностенных УНТ (ОУНТ), Javey и др. разработали фототермический актуатор на основе ОУНТ/полимера (рисунок 2.27), используя технологию вакуумной фильтрации [196].

Перед изготовлением актуатора оптические свойства ОУНТ были улучшены с помощью их обработки методом диспропорционирования монооксида углерода под высоким давлением (ВДУО). Для достижения оптимальных фототермических характеристик были использованы ОУНТ с различными значениями (n , m). Было показано, что различные типы ОУНТ могут выступать в качестве высокоэффективных с точки зрения поглощения света и селективных с точки зрения длин волн материалов, что делает их идеальными кандидатами для применения в фототермических актуаторах [199].

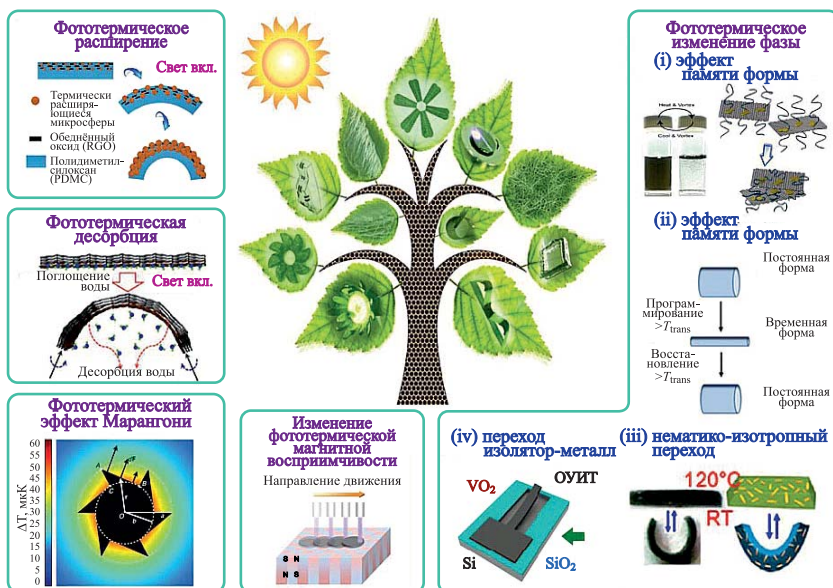


Рисунок 2.26 – Обобщённые сведения и принцип действия фототермических актуаторов, полученных на основе углерода. Изображения использованы с разрешения [196]

Было замечено, что фототермические актуаторы часто сталкиваются с дилеммами между такими ключевыми характеристиками, как плотность энергии, скорость, гибкость, эффективность, чувствительность и multifunctionality. Усовершенствование одной характеристики часто приводит к ухудшению другой. Чтобы решить эти проблемы и повысить производительность актуатора, Wang и др. были разработаны селективные по длине волны фототермические микроактуаторы на основе VO_2 и ОУНТ [198].

На рисунке 2.28 показан процесс изготовления данных актуаторов на основе VO_2 /ОУНТ. Полученное устройство продемонстрировало феноменальные технические характеристики, сочетающие высокую скорость, большое отклонение и минимальное энергопотребление. Нанесение плёнок на ОУНТ удвоило быстродействие актуаторов на основе VO_2 при одновременном снижении энергопо-

требления примерно на 50%. Устройства с металлическими плёнками, нанесенными на ОУНТ, показали в 1,57 раза большую чувствительность к красному свету по сравнению с ближним инфракрасным излучением, в то время как полупроводниковые плёнки, нанесённые на ОУНТ, показали в 1,42 раза большую чувствительность к ближнему инфракрасному излучению, чем к красному.

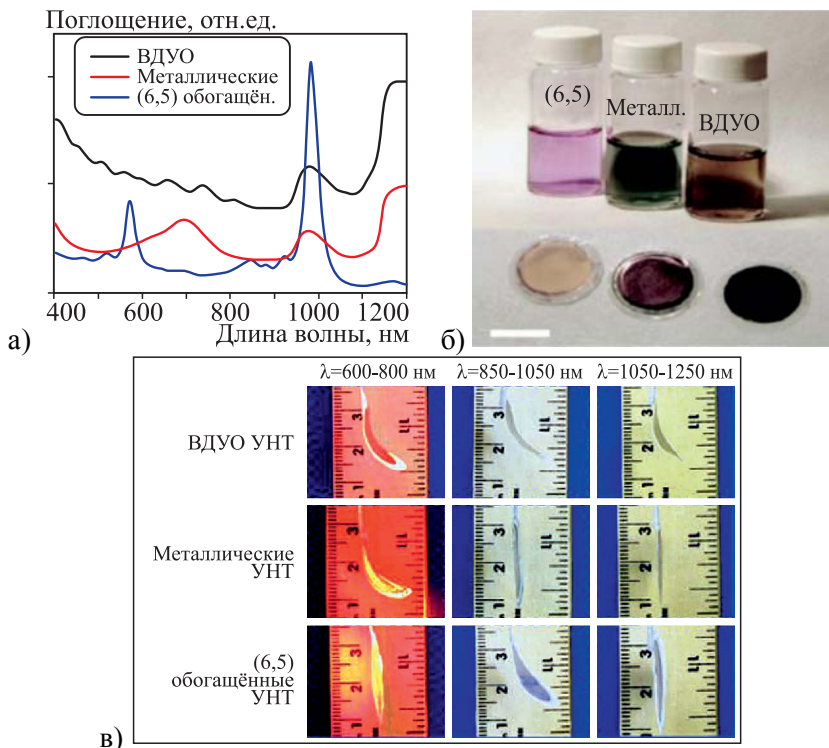


Рисунок 2.27 – Актуатор на основе УНТ, разработанный Javey и др., обладающий уникальными свойствами. Показаны спектры поглощения для трёх типов УНТ: ВДУО, металлических и (6, 5) обогащённых УНТ (а); показаны изображения трёх растворов УНТ и соответствующих им плёнок-актуаторов (б); показаны чувствительные к длине волны изображения откликов (в), использованные с разрешения [196]

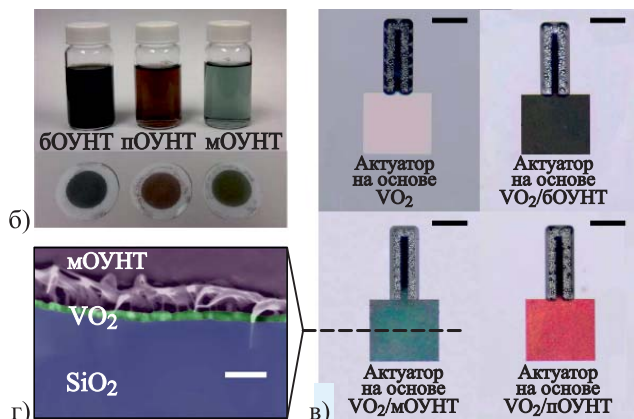
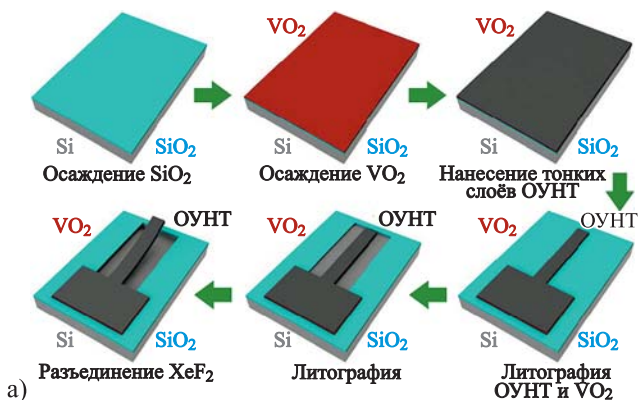


Рисунок 2.28 – Процесс изготовления микроактуаторов на основе VO_2/SWNT , разработанных Wang и соавторами: схематично представлены этапы изготовления (а); приведены изображения растворов бОУНТ, мОУНТ и пОУНТ и мембран на основе ОУНТ/целлюлоза, полученные путём вакуумной фильтрации из растворов ОУНТ (б); представлены изображения, полученные с помощью микроскопа (вид сверху), на которых приведены микроактуаторы на основе VO_2 , $\text{VO}_2/\text{бОУНТ}$, $\text{VO}_2/\text{мОУНТ}$ и $\text{VO}_2/\text{пОУНТ}$, причём все элементы имеют одинаковые размеры 400 мм в длину и 40 мм в ширину (масштаб 200 мм) (в); показано СЭМ-изображение, показывающее поперечное сечение актуатора $\text{VO}_2/\text{мОУНТ}$, специально раскрашенное для обеспечения чёткости (масштаб 200 мм) (г).
 Все изображения использованы с разрешения [198]

Эта дополнительная функциональность создаёт важнейшее связующее звено между оптической и механической областями высокопроизводительных фотоактуаторов, подготавливая базу для будущих разработок механических логических элементов и электронных устройств, управляемых оптическим излучением. Кроме того, нанесение плёнки из VO_2 на различные типы УНТ – без покрытия (БОУНТ), с предварительно нанесёнными металлическими (МОУНТ) и полупроводниковыми (ПОУНТ) плёнками – позволило продемонстрировать, что каждое устройство быстрее реагировало на длину волны, наиболее эффективно поглощаемую нанесённой на УНТ плёнкой (рисунок 2.29).

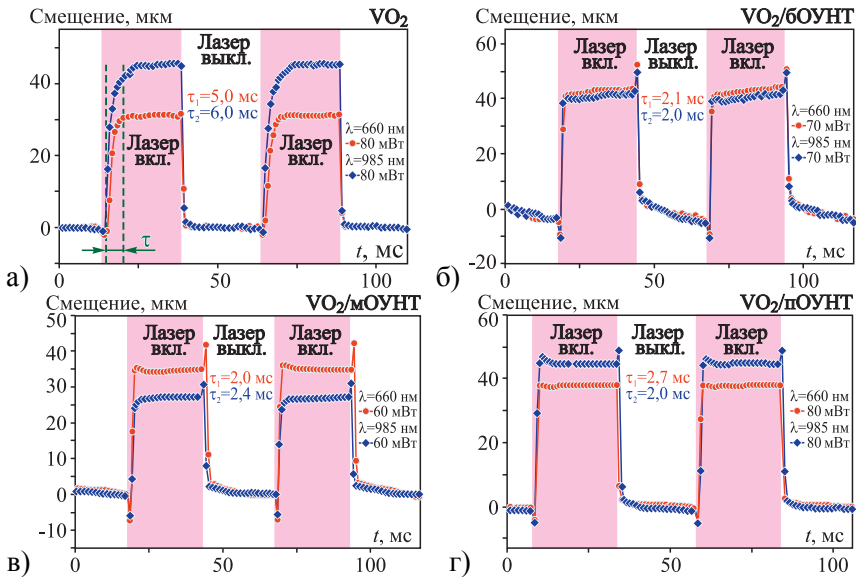


Рисунок 2.29 – Механические отклонения в режиме реального времени для актуаторов на основе VO_2 (а), $\text{VO}_2/\text{БОУНТ}$ (б), $\text{VO}_2/\text{МОУНТ}$ (в) и $\text{VO}_2/\text{ПОУНТ}$ (г) в зависимости от включения/выключения лазерного излучения с длительностью импульса 2,5 мс. Все изображения использованы с разрешения [198]

2.5.2 Фотохимическая актуация

Фотохимическая актуация включает в себя преобразование световой энергии в химическую, которая, в свою очередь, приводит к механическому движению. Фотохимическая актуация представляет собой новую область в материаловедении и инженерии, где химические реакции, вызванные светом, используются для вызова механических движений в материалах. Она обеспечивает точный контроль над процессами актуации, поскольку свет можно модулировать по интенсивности, длине волны и продолжительности. Метод фотохимической актуации имеет значительный потенциал в таких областях применения, как «мягкая» робототехника, адаптивные материалы и МЭМС. В данной части обзора рассматриваются последние достижения, материалы, механизмы и применения фотохимической актуации [200]. Фотохимическая актуация основана на преобразовании световой энергии в механическую работу посредством фотохимического процесса. В отличие от фототермической актуации, основанной на тепловом расширении из-за поглощения света, в фотохимической актуации свет используется для запуска химической реакции внутри материала. Такие реакции часто вызывают изменения в молекулярной конформации, образование или разрыв связей, а также фазовые переходы, что приводит к макроскопическим изменениям формы или объема [201].

К общим механизмам фотохимической актуации относятся:

Фотоизомеризация – процесс, при котором молекулы изменяют свою геометрию при поглощении света, например, транс-цис-изомеризация азобензола. Lahikainen и др. разработали шесть различных форм, получаемых с помощью одного актуатора в условиях равномерного освещения [200]. Они также создали «умный» механизм захвата, управляемый светом, который может захватывать и отпускать или захватить и удерживать объект даже после выключения освещения. Данная работа способствует разработке полно-

стью оптического управления функциями актуатора, подготавливая базу для перепрограммируемой «мягкой» микроробототехники.

Актуаторы с фотохимическими жидкокристаллическими сетями (ЖКС) используют фотоизомеризацию молекул азобензола, которые обычно встраиваются в полимерную сетку в виде поперечных связей. Продолжительность, в течение которой деформированная форма остаётся стабильной, зависит от срока службы цис-изомера азобензола. Эти актуаторы можно переключать между двумя состояниями, используя различные длины волн света, как показано на схеме (рисунок 2.30а).

Эта способность позволяет разрабатывать оптически настраиваемые фотонные устройства и способствует эффективному фотоактивированию в водной среде. В мягкой робототехнике наиболее эффективный метод фотоуправления заключается в преобразовании световой энергии в тепловую, что обеспечивает быстрые и динамичные движения. Это означает, что актуатор быстро возвращается к своей первоначальной форме после удаления источника света, как показано на рисунке 2.30б.

Оба механизма, фотохимический и фототермический, продемонстрировали убедительные движения, управляемые светом. Lähikainen с соавторами исследовали комбинированное использование этих двух подходов для создания светочувствительных материалов со свойствами, недостижимыми при использовании только одного типа механизма. Материалы и их состав в ЖКС-актуаторе можно увидеть на рисунке 2.30в. Известно, что при выборе фотоактивных элементов авторы руководствовались определёнными критериями. Во-первых, длины волн, необходимые для транс-цис- и цис-транс-изомеризации, и фототермический эффект должны быть спектрально различимыми (рисунок 2.30г). Во-вторых, срок службы цис-изомерных шивок азобензола при рабочей температуре должен быть достаточно продолжительным, чтобы свести к минимуму обратную термическую изомеризацию в течение периода эксперимента.

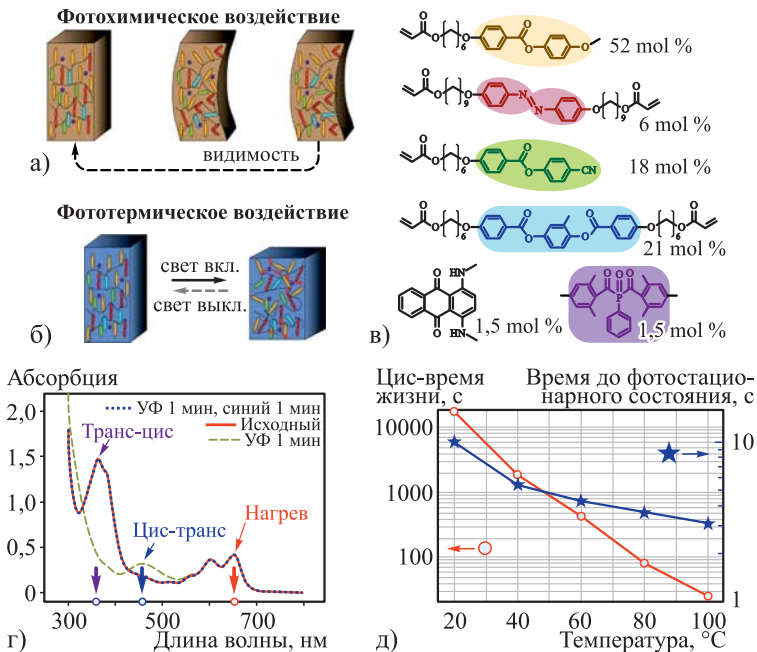


Рисунок 2.30 – Схема синергетического фотоактуатора, предложенного Lahikainen с соавторами. Он включает в себя описание фотохимического воздействия (а), иллюстрацию фототермического воздействия (б), химический состав смеси жидкокристаллических мономеров (в), спектры в ультрафиолетовом и видимом диапазоне для плёнки с ЖКС, содержащей как DB14, так и азобензольные шивки (г), цис-время жизни при термической релаксации в темноте (цис-транс) и время, необходимое для достижения фотостационарного состояния при ультрафиолетовом облучении (транс-цис) при различных температурах (д)

Ультрафиолетовые и видимые спектры полимеризованного ЖКС-актуатора, показанные на рисунке 2.30г, подтверждают наличие спектрального разделения и эффективную обратимую изомериацию азобензольных шивок. На рисунке 2.30д показано, что цис-время жизни азобензола экспоненциально увеличивается в зависимости от температуры.

Например, при температуре 40°C цис-время жизни превышает 30 минут, что делает его практически бистабильным в течение периода фототермического воздействия. Доля цис-изомера в фото-стационарном состоянии остаётся около 80% даже при повышенных температурах. Однако время, необходимое для достижения этого состояния, значительно уменьшается с повышением температуры (рисунок 2.30е). Таким образом, повышение температуры за счёт фототермического эффекта может увеличить скорость фотохимического воздействия.

В комбинированной схеме фотоактуации (рисунок 2.31) транс-цис-изомеризация азобензольных групп используется для локальной настройки механических свойств актуатора без изменения его формы. Напротив, фототермический эффект вызывает изменение формы при освещении светом красной части спектра, снимая внутреннее напряжение, вызванное неравномерным распределением цис-азобензола. Обратная цис-транс-изомеризация может быть активирована с помощью света сине-зелёной части спектра, что позволяет системе вернуться в исходное состояние при воздействии данных длин волн. Затем состояние можно изменить с помощью ультрафиолетового излучения для дальнейшего использования освещения красной части спектра.

Фотодимеризация – это светоиндуцированное образование или диссоциация димера, например, реакции циклоприсоединения $[2+2]$ в некоторых полимерах.

Geng и др. сообщили, что молекулярные машины, построенные из механически взаимосвязанных молекул (МВМ) (например, (псевдо)ротаксаны и катенаты), известны своим динамическим поведением на молекулярном уровне [201]. Однако увеличение макромеханических откликов данных машин или связанных с ними материалов остаётся сложной задачей. В [201] представлено металлоорганическое соединение ротаксана, U-CB[8]-MPyVB, в котором используется псевдоротаксан на основе кукурбитурила (CB[8]),

связанный парой фотоактивных молекул, полученных из стирола. Это соединение демонстрирует способность вызывать контролируемые макроскопические механические реакции.

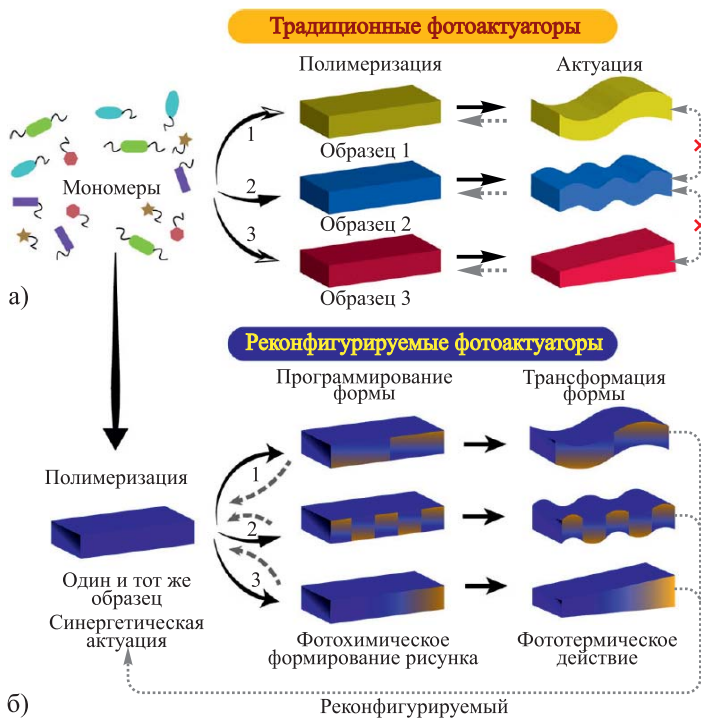


Рисунок 2.31 – Принципы работы актуатора: традиционные, реагирующие на воздействия актуаторы требуют этапа программирования при изготовлении, что приводит к разбросу характеристик образцов с уникальными режимами актуации (а); разработанный реконфигурируемый фотоактуатор, который может многократно изменять форму одного образца в ответ на один и тот же стимул (б). Это достигается с помощью фотохимических триггеров при программировании формы и фототермических эффектов при изменении формы. Рисунок использован с разрешения [200]

Под воздействием света структурная единица в форме лестницы металл-органической цепи ротаксана в U-CB[8]-MPyVB подвергается региоселективной твердотельной [2+2] фотодимеризации, что способствует фотоуправляемому преобразованию из одного кристалла в другой (SCSC), которое вызывает макроскопический фото-механический изгиб отдельных стержнеобразных объёмных кристаллов. Разработка кристаллических материалов на основе ротаксана, проявляющих как микроскопическую, так и макроскопическую светочувствительность в твёрдом состоянии, выглядит многообещающе для фотоактуаторных устройств и может существенно повлиять на развитие новых областей, таких как разработка оптомеханических микроустройств и интеллектуальных микророботов.

Фоторасщепление – разрыв химических связей под воздействием света, приводящий к изменению структуры или свойств материала [202].

Материалы, используемые для фотохимической актуации, часто разрабатываются так, чтобы они реагировали на определённые длины волн света, обычно в УФ- или видимом диапазоне. Ключевые материалы представляют собой следующие соединения.

Азобензол – хорошо известная фоточувствительная молекула, которая претерпевает обратимую транс-цис-изомеризацию под воздействием УФ- и видимого света. Эта изомеризация вызывает значительные изменения в молекулярной геометрии, что приводит к деформации материала [203]. Исследователи разработали оптический актуатор на основе полимеров азобензола, где светоминдуцированная изомеризация молекул азобензола приводит к конформационным изменениям в полимере, что, в свою очередь, приводит к деформации материала. Данный механизм особенно перспективен для применений, требующих точного управления движением в наномасштабе [204–205].

В спиропиране, другом важном материале, может возникать обратимая реакция раскрытия кольца под воздействием УФ-

излучения, приводящая к изменению его механических свойств. Такие материалы востребованы для создания актуаторов, реагирующих на свет контролируемым образом [205].

Производные диарилетена проявляют фотохромные свойства при переходе между двумя стабильными формами во время облучения светом. Обратимый механизм перехода делает их подходящими материалами для применения в оптических актуаторах [202, 206].

Жидкокристаллические эластомеры (ЖКЭ) сочетают в себе свойства жидких кристаллов и эластомеров, что позволяет вызывать в них большие обратимые деформации в ответ на свет. Включение fotocувствительных молекул в ЖКЭ повышает их возможности актуации [203, 207].

2.5.3 Фотоэлектрическая актуация

В фотоэлектрической актуации свет используется для генерации электрических зарядов, вызывающих механический отклик. Фотоэлектрическая актуация – это передовой метод, в котором свет используется для индуцирования электрических изменений в материале, что приводит к механическому движению или актуации. В данном методе используется взаимодействие между излучением и полупроводниковыми или фотоэлектрическими материалами для создания электрического импульса, управляющего механическим движением. Настоящая область достигла значительных успехов благодаря перспективам использования в таких областях, как МЭМС, оптоэлектроника и робототехника. В данной части обзора изучаются принципы, материалы, механизмы, области применения, текущие проблемы и будущие направления развития фотоэлектрической актуации. Фотоэлектрическая актуация основана на фотоэлектрическом эффекте, при котором воздействие света вызывает генерацию электрических зарядов в материале. Этот эффект преимущественно наблюдается в полупроводниковых материалах, где фотоны с достаточной энергией могут возбуждать электроны и пе-

рeness их из валентной зоны в зону проводимости, тем самым создавая электронно-дырочные пары. Затем сгенерированные электрические заряды могут приводить к механическим движениям в актуаторах [208–209].

Ключевые механизмы, задействованные в фотоэлектрической актуации, включают [210–212]:

Фотоэлектрический эффект. В данном процессе свет поглощается полупроводником, генерируя напряжение (или ток), которое может использоваться для актуации устройства. Фотоэлектрические материалы, такие как кремний, обычно используются в солнечных батареях и могут быть адаптированы для целей актуации.

Фотопроводимость. В этом процессе материал становится более проводящим под воздействием света. Возникшие электрические изменения могут быть использованы для инициации механических движений. Материалы, демонстрирующие высокую фотопроводимость, такие как некоторые оксиды металлов, представляют интерес для фотоэлектрической актуации.

Фотострикционный эффект является менее распространенным механизмом, при котором свет вызывает напряжение в материале из-за изменений в его электронной структуре, что приводит к механической деформации.

Выбор материала имеет решающее значение для обеспечения эффективной фотоэлектрической актуации, причём полупроводники и фотоэлектрические материалы являются наиболее подходящими. Ниже перечислены некоторые ключевые материалы [213–216].

Полупроводники (например, кремний, GaAs). Кремний, наиболее широко используемый полупроводник, обладает отличными фотоэлектрическими свойствами и является краеугольным камнем большинства фотоэлектрических устройств. Арсенид галлия (GaAs) обеспечивает более высокую эффективность, но и более высокую стоимость. Эти материалы преимущественно использу-

ются в устройствах, преобразующих свет в электрические сигналы для актуации.

Оксиды металлов (например, ZnO , TiO_2). Оксиды металлов, такие как оксид цинка (ZnO) и диоксид титана (TiO_2), проявляют сильные фотопроводящие свойства. Они часто используются в датчиках и актуаторах, требующих высокой чувствительности к свету.

Органические фотоэлектрические материалы. Органические материалы, такие как фотоэлектрические элементы на основе полимеров, обладают гибкостью и малым весом, что делает их подходящими для применения в гибкой электронике и мягкой робототехнике.

Перовскитные материалы. В последнее время перовскитные материалы привлекли внимание из-за их высокой фотоэлектрической эффективности и возможности недорогого изготовления. Такие материалы исследуются для разработки фотоэлектрических актуаторов следующего поколения.

Фотонные актуаторы представляют собой быстро развивающуюся область с широким спектром применения. Достижения в области материаловедения и нанотехнологий продолжают расширять границы возможного, обеспечивая более эффективные, точные и универсальные механизмы актуации. По мере развития исследований можно ожидать ещё более широкого внедрения этих устройств в различных научных и промышленных областях.

Таким образом, исследование взаимодействий света и материи не только углубило понимание фундаментальной физики, но и заложило фундамент развития инновационных направлений, которые сближают оптические и механические подходы. Достижения в области разработки фотонных актуаторов, основанные на использовании сложных материалов и передовых технологий, демонстрируют перспективы, который позволяют по-новому взглянуть на развитие различных областей – от микророботехники до биомедицинских устройств. Используя фототермические, фотохимические,

фотоэлектрические механизмы, исследователи создают высокочувствительные системы, которые могут адаптироваться и работать с очень высокой точностью.

Благодарности

Финансирование главы 2 выполнено за счёт средств государственного задания Самарскому университету в сфере научной деятельности (проект FSSS-2024-0016).

Список использованных источников к Главе 2

1. Vane G., Goetz A. F. H., Wellman J. B. Airborne imaging spectrometer: a new tool for remote sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1984. Vol. GE-22(6). P. 546–549. DOI: 10.1109/TGRS.1984.6499168.
2. Goetz A. F. H. [et al.]. Imaging spectrometry for earth remote sensing // Science. 1985. Vol. 228(4704). P. 1147–1153. DOI: 10.1126/science.228.4704.1147.
3. Vane G. First results from the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) // Proceedings of SPIE. 1987. Vol. 834. P. 166–174. DOI: 10.1117/12.942296.
4. Clark R. N. [et al.]. Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems // Journal of Geophysical Research E: Planets. 2003. Vol. 108(E12). Article ID 5. DOI: 10.1029/2002JE001847.
5. Carlson R. W., Weissman P. R., Smythe W. D. [et al.]. Near-infrared mapping spectrometer experiment on Galileo // Space Science Reviews. 1992. Vol. 60(1–4). P. 457–502. DOI: 10.1007/BF00216865.
6. Brown R. H., Baines K. H., Bellucci G. [et al.]. The Cassini visual and infrared mapping spectrometer (VIMS) investigation // Space Science Reviews. 2004. Vol. 115. P. 111–168. DOI: 10.1007/s11214-004-1453-x.
7. Pearlman J. S., Barry P. S., Segal C. C. [et al.]. Hyperion, a space-based imaging spectrometer // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2003. Vol. 41(6). P. 1160–1173. DOI: 10.1109/TGRS.2003.815018.
8. Barnsley M. K., Settle J. J., Cutter M. A. [et al.]. The PROBA/CHRIS mission: A low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere // IEEE Transactions on Geoscience and

- Remote Sensing. 2004. Vol. 42(7). P. 1512–1520. DOI: 10.1109/TGRS.2004.827260.
9. Bibring J.-P., Langevin Y., Gendrin A. [et al.]. Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/ Mars express observations // Science. 2005. Vol. 307(5715). P. 1576–1581. DOI: 10.1126/science.1108806.
 10. Murchie S., Arvidson R., Bedini P. [et al.]. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112(E5). Article ID E05S03. DOI: 10.1029/2006JE002682.
 11. Zhang J., Cheng T., Guo W. [et al.]. Leaf area index estimation model for UAV image hyperspectral data based on wavelength variable selection and machine learning methods // Plant Methods. 2021. Vol. 17(1). Article ID 49. DOI: 10.1186/s13007-021-00750-5.
 12. Siedliska A., Baranowski P., Pastuszka-Woźniak J. [et al.]. Identification of plant leaf phosphorus content at different growth stages based on hyperspectral reflectance // BMC Plant Biology. 2021. Vol. 21(1). Article ID 28. DOI: 10.1186/s12870-020-02807-4.
 13. Sahadevan A. S. Extraction of spatial-spectral homogeneous patches and fractional abundances for field-scale agriculture monitoring using airborne hyperspectral images // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 188. Article ID 106325. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106325.
 14. Zhang Y., Xia C., Zhang X. [et al.]. Estimating the maize biomass by crop height and narrowband vegetation indices derived from UAV-based hyperspectral images // Ecological Indicators. 2021. Vol. 129. Article ID 107985. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107985.
 15. La Rosa L. E. C., Sothe C., Feitosa R. Q. [et al.]. Multi-task fully convolutional network for tree species mapping in dense forests using small training hyperspectral data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. Vol. 179. P. 35–49. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.07.001.
 16. Wang L., Chen S., Li D. [et al.]. Estimation of paddy rice nitrogen content and accumulation both at leaf and plant levels from uav hyperspectral imagery // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(15). Article ID 2956. DOI: 10.3390/rs13152956.
 17. Vangi E., D'amico G., Francini S. [et al.]. The new hyperspectral satellite PRISMA: Imagery for forest types discrimination // Sensors (Switzerland). 2021. Vol. 21(4). Article ID 1182. DOI: 10.3390/s21041182.
 18. Pereira J. F. Q., Pimentel M. F., Amigo J. M. [et al.]. Detection and identification of *Cannabis sativa L.* using near infrared hyperspectral imaging and machine learning methods. A feasibility study // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2020. Vol. 237. Article ID 118385. DOI: 10.1016/j.saa.2020.118385.

19. Ferreira A., Felipussi S. C., Pires R. [et al.]. Eyes in the skies: A data-driven fusion approach to identifying drug crops from remote sensing images // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019. Vol. 12(12). P. 4773–4786. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2917024.
20. Barton I. F., Gabriel M. J., Lyons-Baral J. [et al.]. Extending geometallurgy to the mine scale with hyperspectral imaging: a pilot study using drone- and ground-based scanning // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021. Vol. 38(2). P. 799–818. DOI: 10.1007/s42461-021-00404-z.
21. Degerickx J., Hermy M., Somers B. Mapping functional urban green types using high resolution remote sensing data // *Sustainability*. 2020. Vol. 12(5). Article ID 2144. DOI: 10.3390/su12052144.
22. Huang H., Sun Z., Liu S. [et al.]. Underwater hyperspectral imaging for in situ underwater microplastic detection // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 776. Article ID 145960. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145960.
23. Reimers J., et al. Comparison of freeform imaging spectrometer design forms using spectral full-field displays // *Imaging and Applied Optics* 2015. OSA Technical Digest. 2015. Article ID FM3B.3. DOI: 10.1364/FREEFORM.2015.FM3B.3.
24. Lobb D. R. Theory of concentric designs for grating spectrometers // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33(13). P. 2648–2658. DOI: 10.1364/AO.33.002648.
25. Wang Y., Yuan L., Wang J. Optical design of wide swath hyperspectral imager // *Proceedings of SPIE*. 2014. Vol. 9104. Article ID 910404. DOI: 10.1117/12.2048900.
26. An airborne Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements / N. Kazanskiy, N. Ivliev, V. Podlipnov, R. Skidanov // *Sensors*. 2020. Vol. 20(12). Article ID 3411. DOI: 10.3390/s20123411.
27. 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements / N. Ivliev, V. Podlipnov, M. Petrov, I. Tkachenko, M. Ivanushkin, S. Fomchenkov, M. Markushin, R. Skidanov, Yu. Khanenko, A. Nikonorov, N. Kazanskiy, V. Soifer // *Sensors*. 2024. Vol. 24(9). Article ID 2885. DOI: 10.3390/s24092885.
28. Abd-Elrahman A., Pande-Chhetri R., Vallad G. Design and development of a multi-purpose low-cost hyperspectral imaging system // *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3(3). P. 570–586. DOI: doi.org/10.3390/rs3030570.
29. Yang C., Edwards P., Shi K. [et al.]. Proposal and demonstration of a spectrometer using a diffractive optical element with dual dispersion and focusing functionality // *Optics Letters*. 2011. Vol. 36(11). P. 2023–2025. DOI: 10.1364/OL.36.002023.

30. Скиданов Р. В., Бланк В. А., Морозов А. А. Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 2. С. 218–223. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-218-223.
31. Yang C., Shi K., Edwards P. [et al.]. Demonstration of a PDMS based hybrid grating and Fresnel lens (G-Fresnel) device // Optics Express. 2010. Vol. 18(23). P. 23529–23534. DOI: 10.1364/OE.18.023529.
32. Lodhi V., Chakravarty D., Mitra P. Hyperspectral imaging system: Development aspects and recent trends // Sensing and Imaging. 2019. Vol. 20(1). Article ID 35. DOI: 10.1007/s11220-019-0257-8.
33. Ünsalan C., Boyer K. L. Multispectral satellite image understanding: from land classification to building and road detection. London: Springer-Verlag London Limited, 2011. ISBN: 978-0-85729-666-5.
34. Anderson J. R., Hardy E. E., Roach J. T. [et al.]. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. Geological Survey Professional Paper 964. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1976. DOI: 10.3133/pp964.
35. Cazaubiel V., Chorvalli V., Miesch C. The multispectral instrument of the Sentinel2 program // Proceedings of SPIE. 2017. Vol. 10566. Article ID 105660H. DOI: 10.1117/12.2308278.
36. Mu T., Han F., Bao D. [et al.]. Compact snapshot optically replicating and remapping imaging spectrometer (ORRIS) using a focal plane continuous variable filter // Optics Letters. 2019. Vol. 44(5). P. 1281–1284. DOI: 10.1364/OL.44.001281.
37. Матрицы гармонических линз как дисперсионный элемент гиперспектрометра на основе цветной светочувствительной матрицы / Р. В. Скиданов, В. А. Бланк, С. В. Ганчевская, В. В. Подлипнов, Н. А. Ивлиев. В кн.: HOLOEXPO 2022. Тезисы докладов. XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Барнаул, 2022. С. 441–445.
38. Lugt A. V. Signal detection by spatial complex filtering // IEEE Transactions on Information Theory. 1964. Vol. 10(2). P. 139–145. DOI: 10.1109/TIT.1964.1053650.
39. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины: Пер. с англ. Мир, 1974.
40. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические вычислительные машины. Л.: Машиностроение, 1977. С. 327.
41. Оптическая обработка информации / под ред. Д. Кейсесента. М.: Мир, 1980.

42. Silva A., Monticone F., Castaldi G. [et al.]. Performing mathematical operations with metamaterials // *Science*. 2014. 343(6167). P. 160–163. DOI: 10.1126/science.1242818.
43. Bykov D. A., Doskolovich L. L., Soifer V. A. Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings // *Optics Letters*. 2011. Vol. 36(17). P. 3509–3511. DOI: 10.1364/OL.36.003509.
44. Time-domain differentiation of optical pulses in reflection and in transmission using the same resonant grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, N. V. Golovastikov, V. A. Soifer // *Journal of Optics*. 2013. Vol. 15(10). Article ID 105703. DOI: 10.1088/2040-8978/15/10/105703.
45. First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, A. A. Morozov, V. V. Podlipnov, E. A. Bezus, P. Verma, V. A. Soifer // *Optics Express*. 2018. Vol. 26(8). P. 10997–11006. DOI: 10.1364/OE.26.010997.
46. Parthenopoulos A., Darki A. A., Jeppesen B. R. [et al.]. Optical spatial differentiation with suspended subwavelength gratings // *Optics Express*. 2021. Vol. 29(5). P. 6481–6494. DOI: 10.1364/OE.416801.
47. Wan L., Pan D., Yang S. [et al.]. Optical analog computing of spatial differentiation and edge detection with dielectric metasurfaces // *Optics Letters*. 2020. Vol. 45(7). P. 2070–2073. DOI: 10.1364/OL.386986.
48. Zhou Y., Wu W., Chen R. [et al.]. Analog optical spatial differentiators based on dielectric metasurfaces // *Advanced Optical Materials*. 2020. Vol. 8(4). Article ID 1901523. DOI: 10.1002/adom.201901523.
49. Zhou Y., Zheng H., Kravchenko I. I. [et al.]. Flat optics for image differentiation // *Nature Photonics*. 2020. Vol. 14(5). P. 316–323. DOI: 10.1038/s41566-020-0591-3.
50. Wan L., Pan D., Feng T. [et al.]. A review of dielectric optical metasurfaces for spatial differentiation and edge detection // *Frontiers of Optoelectronics*. 2021. Vol. 14. P. 187–200. DOI: 10.1007/s12200-021-1124-5.
51. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L. L. Doskolovich, D. A. Bykov, E. A. Bezus, V. A. Soifer // *Optics Letters*. 2014. Vol. 39(5). P. 1278–1281. DOI: 10.1364/OL.39.001278.
52. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, V. A. Soifer // *Optics Express*. 2014. Vol. 22(21). P. 25084–25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
53. Ruan Z. Spatial mode control of surface plasmon polariton excitation with gain medium: from spatial differentiator to integrator // *Optics Letters*. 2015. Vol. 40(4). P. 601–604. DOI: 10.1364/OL.40.000601.
54. Zhu T., Zhou Y., Lou Y. [et al.]. Plasmonic computing of spatial differentiation // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8(1). Article ID 15391. DOI: 10.1038/ncomms15391.

55. Wu W., Jiang W., Yang J. [et al.]. Multilayered analog optical differentiating device: performance analysis on structural parameters // *Optics Letters*. 2017. Vol. 42(24). P. 5270–5273. DOI: 10.1364/OL.42.005270.
56. Spatial differentiation of optical beams using a resonant metal-dielectric-metal structure / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Journal of Optics*. 2021. Vol. 23(2). Article ID 023501. DOI: 10.1088/2040-8986/abe63b.
57. Optical properties of cascaded metal-dielectric-metal structures and their application to the differentiation of optical signals / L. L. Doskolovich, A. I. Kashapov, E. A. Bezus, D. A. Bykov // *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. 2022. Vol. 52. Article ID 101069. DOI: 10.1016/j.photonics.2022.101069.
58. Fernandez-Ruiz M. R., Carballar A., Azana J. Design of ultrafast all-optical signal processing devices based on fiber Bragg gratings in transmission // *Journal of Lightwave Technology*. 2013. Vol. 31(10). P. 1593–1600. DOI: 10.1109/JLT.2013.2254467.
59. Li M., Janner D., Yao J. [et al.]. Arbitrary-order all-fiber temporal differentiator based on a fiber Bragg grating: design and experimental demonstration // *Optics Express*. 2009. Vol. 17(22). P. 19798–19807. DOI: 10.1364/OE.17.019798.
60. Rutkowska K. A., Duchesne D., Strain M. J. [et al.]. Ultrafast all-optical temporal differentiators based on CMOS-compatible integrated-waveguide Bragg gratings // *Optics Express*. 2011. Vol. 19(20). P. 19514–19522. DOI: 10.1364/OE.19.019514.
61. Tan S., Xiang L., Zou J. [et al.]. High-order all-optical differential equation solver based on microring resonators // *Optics Letters*. 2013. Vol. 38(19). P. 3735–3738. DOI: 10.1364/OL.38.003735.
62. Yessenov M., Hall L. A., Schepler K. L. [et al.]. Space-time wave packets // *Advances in Optics and Photonics*. 2022. Vol. 14(3). P. 455–570. DOI: 10.1364/AOP.450016.
63. Shen Y., Zhan Q., Wright L. G. [et al.]. Roadmap on spatiotemporal light fields // *Journal of Optics*. 2023. Vol. 25(9). Article ID 093001. DOI: 10.1088/2040-8986/ace4dc.
64. Golovastikov N. V., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Spatiotemporal pulse shaping using resonant diffraction gratings // *Optics Letters*. 2015. Vol. 40(15). P. 3492–3495. DOI: 10.1364/OL.40.003492.
65. Planar two-groove optical differentiator in a slab waveguide / L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, N. V. Golovastikov, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Optics Express*. 2017. Vol. 25(19). P. 22328–22340. DOI: 10.1364/OE.25.022328.

66. Zhang J., Ying Q., Ruan Z. Time response of plasmonic spatial differentiators // *Optics Letters*. 2019. Vol. 44(18). P. 4511–4514. DOI: 10.1364/OL.44.004511.
67. Xu C., Wang Y., Zhang C. [et al.]. Optical spatiotemporal differentiator using a bilayer plasmonic grating // *Optics Letters*. 2021. Vol. 46(17). P. 4418–4421. DOI: 10.1364/OL.436033.
68. Huang J., Zhang J., Zhu T. [et al.]. Spatiotemporal differentiators generating optical vortices with transverse orbital angular momentum and detecting sharp change of pulse envelope // *Laser Photonics Review*. 2022. Vol. 16. Article ID 2100357. DOI: 10.1002/lpor.202100357.
69. Spatiotemporal optical differentiation and vortex generation with metal-dielectric-metal multilayers / L. L. Doskolovich, A. I. Kashapov, E. A. Bezus, D. A. Bykov // *Physical Review A*. 2022. Vol. 106(3). Article ID 033523. DOI: 10.1103/PhysRevA.106.033523.
70. Plasmonic generation of spatiotemporal optical vortices / A. I. Kashapov, E. A. Bezus, D. A. Bykov, L. L. Doskolovich // *Photonics*. 2023. Vol. 10(2). Article ID 109. DOI: 10.3390/photonics10020109.
71. Analytical description of 3D optical pulse diffraction by a phase-shifted Bragg grating / N. V. Golovastikov, D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, V. A. Soifer // *Optics Express*. 2016. Vol. 24(17). P. 18828–18842. DOI: 10.1364/OE.24.018828.
72. Преобразование пространственно-временного оптического импульса резонансной дифракционной решёткой / Н. В. Головастиков, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович, В. А. Сойфер // *ЖЭТФ*. 2015. Vol. 148. P. 899–907. DOI: 10.7868/S0044451015110061.
73. Vallius T., Vahimaa P., Turunen J. Pulse deformations at guided-mode resonance filters // *Optics Express*. 2002. Vol. 10(16). P. 840–843. DOI: 10.1364/OE.10.000840.
74. Shen Y., Harris N., Skirlo S. [et al.]. Deep learning with coherent nanophotonic circuits // *Nature Photonics*. 2017. Vol. 11(7). P. 441–446. DOI: 10.1038/nphoton.2017.93.
75. Harris N. C., Carolan J., Bunandar D., et al. Linear programmable nanophotonic processors // *Optica*. 2018. Vol. 5(12). P. 1623–1631. DOI: 10.1364/OPTICA.5.001623.
76. Zhu H. H., Zou J., Zhang H. [et al.]. Space-efficient optical computing with an integrated chip diffractive neural network // *Nature Communication*. 2022. Vol. 13. Article ID 1044. DOI: 10.1038/s41467-022-28702-0.
77. Zhang H., Gu M., Jiang X. D. [et al.]. An optical neural chip for implementing complex-valued neural network // *Nature Communication*. 2021. Vol. 12. Article ID 457. DOI: 10.1038/s41467-020-20719-7.

78. Zhang J., Wu B., Cheng J. [et al.]. Compact, efficient, and scalable nano-beam core for photonic matrix-vector multiplication // *Optica*. 2024. Vol. 11(2). P. 190–196. DOI: 10.1364/OPTICA.506603.
79. Lin X., Rivenson Y., Yardimci N. T. [et al.]. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks // *Science*. 2018. Vol. 361(6406). P. 1004–1008. DOI: 10.1126/science.aat8084.
80. Chang J., Sitzmann V., Dun X. [et al.]. Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. Article ID 12324. DOI: 10.1038/s41598-018-30619-y.
81. Yan T., Wu J., Zhou T. [et al.]. Fourier-space diffractive deep neural network // *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123(2). Article ID 023901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.023901.
82. Luo Y., Mengu D., Yardimci N. T. [et al.]. Design of task-specific optical systems using broadband diffractive neural networks. *Light: Science & Applications*. 2019. Vol. 8. Article ID 112. DOI: 10.1038/s41377-019-0223-1.
83. Zhou T., Fang L., Yan T. [et al.]. *In situ* optical backpropagation training of diffractive optical neural networks // *Photonics Research*. 2020. Vol. 8(6). P. 940–953. DOI: 10.1364/PRJ.389553.
84. Mengu D., Zhao Y., Yardimci N. T. [et al.]. Misalignment resilient diffractive optical networks // *Nanophotonics*. 2020. Vol. 9(13). P. 4207–4219. DOI: 10.1515/nanoph-2020-0291.
85. Zhou T., Lin X., Wu J. [et al.]. Large-scale neuromorphic optoelectronic computing with a reconfigurable diffractive processing unit // *Nature Photonics*. 2021. Vol. 15(5). P. 367–373. DOI: 10.1038/s41566-021-00796-w.
86. Chen H., Feng J., Jiang M. [et al.]. Diffractive deep neural networks at visible wave-lengths // *Engineering*. 2021. Vol. 7(10). P. 1483–1491. DOI: 10.1016/j.eng.2020.07.032.
87. Ferdman B., Saguy A., Xiao D. [et al.]. Diffractive optical system design by cascaded propagation // *Optics Express*. 2022. Vol. 30(15). P. 27509–27530. DOI: 10.1364/OE.465230.
88. Zheng S., Xu S., Fan D. Orthogonality of diffractive deep neural network // *Optics Letters*. 2022. Vol. 47(7). P. 1798–1801. DOI: 10.1364/OL.449899.
89. Zheng M., Shi L., Zi J. Optimize performance of a diffractive neural network by controlling the Fresnel number // *Photonics Research*. 2022. Vol. 10(11). P. 2667–2676. DOI: 10.1364/PRJ.474535.
90. Wang T., Ma S. Y., Wright L. G. [et al.]. An optical neural network using less than 1 photon per multiplication // *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. Article ID 123. DOI: 10.1038/s41467-021-27774-8.

91. Design of cascaded diffractive optical elements for optical beam shaping and image classification using a gradient method / D. V. Soshnikov, L. L. Doskolovich, G. A. Motz, E. V. Byzov, E. A. Bezus, D. A. Bykov, A. A. Mingazov // *Photonics*. 2023. Vol. 10(7). Article ID 766. DOI: 10.3390/photonics10070766.
92. Сошников Д. В., Досколович Л. Л., Бызов Е. В. Градиентный метод расчета каскадных ДОО и его применение в задаче классификации рукописных цифр // *Компьютерная оптика*. 2023. Т. 47, № 5. С. 691–701. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1314.
93. Kulce O., Mengu D., Rivenson Y. [et al.]. All-optical synthesis of an arbitrary linear transformation using diffractive surfaces. *Light: Science & Applications*. 2021. Vol. 10. Article ID 196. DOI: 10.1038/s41377-021-00623-5.
94. Li J., Gan T., Bai B. [et al.]. Massively parallel universal linear transformations using a wavelength-multiplexed diffractive optical network // *Advanced Photonics*. 2023. Vol. 5(1). Article ID 016003. DOI: 10.1117/1.AP.5.1.016003.
95. Mengu D., Tabassum A., Jarrahi M. [et al.]. Snapshot multispectral imaging using a diffractive optical network // *Light: Science & Applications*. 2023. Vol. 12. Article ID 86. DOI: 10.1038/s41377-023-01135-0.
96. Lohmann A. W., Paris D. P. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer // *Applied Optics*. 1967. Vol. 6(10). P. 1739–1748. DOI: 10.1364/AO.6.001739.
97. Fienup J. R. Phase retrieval algorithms: a comparison // *Applied Optics*. 1982. Vol. 21(15). P. 2758–2769. DOI: 10.1364/AO.21.002758.
98. Soifer V. A., Kotlyar V. V., Doskolovich L. L. Iterative methods for diffractive optical elements computation. Taylor & Francis, 1997.
99. Ripoll O., Kettunen V., Herzig H. P. Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications // *Optical Engineering*. 2004. Vol. 43(11). P. 2549–2556. DOI: 10.1117/1.1804543.
100. Latychevskaia T. Iterative phase retrieval in coherent diffractive imaging: practical issues // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57(25). P. 7187–7197. DOI: 10.1364/AO.57.007187.
101. Deng X., Chen R. T. Design of cascaded diffractive phase elements for three-dimensional multiwavelength optical interconnects // *Optics Letters*. 2000. Vol. 25(14). P. 1046–1048. DOI: 10.1364/OL.25.001046.
102. Alkan Gülses A., Jenkins B. K. Cascaded diffractive optical elements for improved multiplane image reconstruction // *Applied Optics*. 2013. Vol. 52(15). P. 3608–3616. DOI: 10.1364/AO.52.003608.
103. Wang H., Piestun R. Dynamic 2D implementation of 3D diffractive optics // *Optica*. 2018. Vol. 5(10). P. 1220–1228. DOI: 10.1364/OPTICA.5.001220.

104. Hybrid design of diffractive optical elements for optical beam shaping / L. L. Doskolovich, A. A. Mingazov, E. V. Byzov, R. V. Skidanov, S. V. Ganchevskaya, D. A. Bykov, E. A. Bezus, V. V. Podlipnov, A. P. Porfirev, N. L. Kazanskiy // *Optics Express*. 2021. Vol. 29(20). P. 31875–31890. DOI: 10.1364/OE.439641.
105. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv Preprint. Электрон. версия. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (дата обращения 25.10.2024). DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.
106. Fu T., Zang Y., Huang Y. [et al.]. Photonic machine learning with on-chip diffractive optics // *Nature Communications*. 2023. Vol. 14. Article ID 70. DOI: 10.1038/s41467-022-35772-7.
107. Wang Z., Chang L., Wang F. [et al.]. Integrated photonic metasystem for image classifications at telecommunication wavelength // *Nature Communications*. Vol. 13. Article ID 2131. DOI: 10.1038/s41467-022-29856-7.
108. Design of diffractive neural networks for solving different classification problems at different wavelengths / G. A. Motz, L. L. Doskolovich, D. V. Soshnikov, E. V. Byzov, E. A. Bezus, N. V. Golovastikov, D. A. Bykov // *Photonics*. 2024. Vol. 11(8). Article 780. DOI: 10.3390/photonics11080780.
109. Yildirim M., Dinc N. U., Oguz I. [et al.]. Nonlinear processing with linear optics // *Nature Photonics*. 2024. Vol. 18. P. 1076–1082. DOI: 10.1038/s41566-024-01494-z.
110. Бессель-оптика / А. Е. Березный, А. М. Прохоров, И. Н. Сисакян, В. А. Сойфер // *Доклады АН СССР*. 1984. Т. 274, № 4. С. 802–805.
111. Berry M. V. Optical vortices evolving from helicoidal integer and fractional phase steps // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. 2004. Vol. 6(2). P. 259–268. DOI: 10.1088/1464-4258/6/2/018.
112. Soifer V. A., Golub M. A. Laser beam mode selection by computer-generated holograms. Boca Raton: CRC Press, 1994.
113. Ostrovsky A. S., Rickenstorff-Parrao C., Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator // *Optics Letters*. 2013. Vol. 38(4). P. 534–536. DOI: 10.1364/OL.38.000534.
114. The phase rotor filter / S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, M. V. Shinkaryev, V. A. Soifer, G. V. Uspleniev // *Journal of Modern Optics*. 1992. Vol. 39(5). P. 1147–1154. DOI: 10.1080/09500349214551151.
115. Trochoson / S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, V. A. Soifer, M. V. Shinkaryev, G. V. Uspleniev // *Optics Communications*. 1992. Vol. 91(3-4). P. 158–162. DOI: 10.1016/0030-4018(92)90430-Y.
116. Bazhenov V. Yu., Soskin M. S., Vasnetsov M. V. Screw dislocations in light wavefronts // *Journal of Modern Optics*. 1992. Vol. 39(5). P. 985–990. DOI: 10.1080/09500349214551011.

117. Heckenberg N. R., McDuff R., Smith C. P. [et al.]. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms // *Optics Letters*. 1992. Vol. 17(3). P. 221–223. DOI: 10.1364/OL.17.000221.
118. Kovalev A. A., Kotlyar V. V. Tailoring polarization singularities in a Gaussian beam with locally linear polarization // *Optics Letters*. 2018. Vol. 43(13). P. 3084–3087. DOI: 10.1364/OL.43.003084.
119. Bouwmeester D., Pan J.-W., Mattle K. [et al.]. Experimental quantum teleportation // *Nature*. 1997. Vol. 390. P. 575–579. DOI: 10.1038/37539.
120. Fickler R., Campbell G., Buchler B. [et al.]. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10,010 // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. Vol. 113(48). P. 13642–13647. DOI: 10.1073/pnas.161688911.
121. Gong L., Zhao Q., Zhang H. [et al.]. Optical orbital-angular-momentum-multiplexed data transmission under high scattering // *Light: Science & Applications*. 2019. Vol. 8. Article ID 27. DOI: 10.1038/s41377-019-0140-3.
122. Ma M., Lian Y., Wang Y. [et al.]. Generation, transmission and application of orbital angular momentum in optical fiber: A review // *Frontiers in Physics*. 2021. Vol. 9. Article ID 773505. DOI: 10.3389/fphy.2021.773505.
123. Al-Gailani S. A., Salleh M. F. M., Salem A. A. [et al.]. Survey of Free Space Optics (FSO) communication systems, links, and networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 99. P. 7353–7373. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048049.
124. Dabiri M. T., Sadough S. M. S., Khalighi M. A. Channel modeling and parameter optimization for hovering UAV-based free-space optical links // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2018. Vol. 36(9). P. 2104–2113. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2864416.
125. Sansone F., Francesconi A., Corvaja R. [et al.]. LaserCube optical communication terminal for nano and micro satellites. *Acta Astronautica*. 2020. Vol. 173. P. 310–319. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.04.049.
126. Feng X., Wu Z., Wang T. [et al.]. Experimental demonstration of bidirectional up to 40 Gbit/s QPSK coherent free-space optical communication link over ~1 km // *Optics Communications*. 2018. Vol. 410. P. 674–679. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.11.024.
127. Khandakar A., Touati A., Touati F. [et al.]. Experimental setup to validate the effects of major environmental parameters on the performance of FSO communication link in Qatar // *Applied Science*. 2018. Vol. 8(12). Article ID 2599. DOI: 10.3390/app8122599.
128. Walsh S. M., Karpathakis S. F. E., McCann A. S. [et al.]. Demonstration of 100 Gbps coherent free-space optical communications at LEO tracking rates // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article ID 18345. DOI: 10.1038/s41598-022-22027-0.

129. Toyoshima M. Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. Vol. 39. P. 693–699. DOI: 10.1109/JLT.2020.3009505.
130. Du J., Wang J. High-dimensional structured light coding/decoding for freespace optical communications free of obstructions // *Optics Letters*. 2015. Vol. 40(21). P. 4827–4857. DOI: 10.1364/OL.40.004827.
131. He C., Shen Y., Forbes A. Towards higher-dimensional structured light // *Light: Science & Applications*. 2022. Vol. 11. Article ID 205. DOI: 10.1038/s41377-022-00897-3.
132. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams / N. L. Kazanskiy, S. N. Khonina, S. V. Karpeev, A. P. Porfirev // *Quantum Electronics*. 2020. Vol. 50(7). P. 629–635. DOI: 10.1070/QEL17276.
133. Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics / S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, V. A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics*. 1999. Vol. 46(2). P. 227–238. DOI: 10.1080/09500349908231267.
134. Generating hypergeometric laser beams with a diffractive optical element / V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, R. V. Skidanov, S. N. Khonina, J. Turunen // *Applied Optics*. 2008. Vol. 47(32). P. 6124–6133. DOI: 10.1364/AO.47.006124.
135. Fazea Y., Mezhyuev V. Selective mode excitation techniques for mode-division multiplexing: A critical review // *Optical Fiber Technology*. 2018. Vol. 45. P. 280–288. DOI: 10.1016/j.yofte.2018.08.004.
136. Вихревой Фурье-инвариантный пучок Лагерра–Гаусса в квадрате / Е. С. Козлова, А. А. Савельева, А. А. Ковалев, В. В. Котляр // *Компьютерная оптика*. 2023. Т. 47, № 3. С. 367–373. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1228.
137. Wang Z., Zhang N., Yuan X.-C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication // *Optics Express*. 2011. Vol. 19(2). P. 482–492. DOI: 10.1364/OE.19.000482.
138. Trichili A., Park K.-H., Zghal M., et al. Communicating using spatial mode multiplexing: Potentials, challenges, and perspectives // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21(4). P. 3175–3203. DOI: 10.1109/COMST.2019.2915981.
139. Pachava S., Dharmavarapu R., Vijayakumar A. [et al.]. Generation and decomposition of scalar and vector modes carrying orbital angular momentum: A review // *Optical Engineering*. 2019. Vol. 59(4). Article ID 041205. DOI: 10.1117/1.OE.59.4.041205.
140. Su Y. K., He Y., Chen H. S. [et al.]. Perspective on mode-division multiplexing // *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 118(20). Article ID 200502. DOI: 10.1063/5.0046071.

141. Robust demultiplexing of distinct orbital angular momentum infrared vortex beams into different spatial geometry over a broad spectral range / A. N. K. Reddy, V. Anand, S. N. Khonina, V. V. Podlipnov, S. Juodkakis // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 143341–143348. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3120836.
142. Khonina S. N., Karpeev S. V., Butt A. M. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders // *Sensors*. 2021. Vol. 21(9). Article ID 2988. DOI: 10.3390/s21092988.
143. Синтез оптической антенны / М. А. Голуб, Н. Л. Казанский, А. М. Прохоров, И. Н. Сисакян, В. А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. 1987. Вып. 1. С. 35–40.
144. Software on diffractive optics and computer-generated holograms / L. L. Doskolovich, M. A. Golub, N. L. Kazanskiy, A. G. Khramov, V. S. Pavelyev, P. G. Seraphimovich, V. A. Soifer, S. G. Volotovskiy // *Proceedings of SPIE*. 1995. Vol. 2363. P. 278–284. DOI: 10.1117/12.199645.
145. A DOE to form a line-shaped directivity diagram / L. L. Doskolovich, N. L. Kazanskiy, V. A. Soifer, S. I. Kharitonov, P. Perlo // *Journal of Modern Optics*. 2004. Vol. 51(13). P. 1999–2005. DOI: 10.1080/09500340408232507.
146. Designing reflectors to generate a line-shaped directivity diagram / L. L. Doskolovich, N. L. Kazanskiy, S. I. Kharitonov, P. Perlo, S. Bernard // *Journal of Modern Optics*. 2005. Vol. 52(11). P. 1529–1536. DOI: 10.1080/09500340500058082.
147. Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L., Bernard S. Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / *Journal of Modern Optics*. 2007. Vol. 54(4). P. 589–597. DOI: 10.1080/0950034060102186.
148. Khonina S. N., Kazanskiy N. L., Volotovskiy S. G. Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2011. Vol. 20(1). P. 23–42. DOI: 10.3103/S1060992X11010024.
149. Kazanskiy N., Skidanov R. Binary beam splitter // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51(14). P. 2672–2677. DOI: 10.1364/AO.51.002672.
150. Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LED lighting systems / E. R. Aslanov, L. L. Doskolovich, M. A. Moiseev, E. A. Bezus, N. L. Kazanskiy // *Optics Express*. 2013. Vol. 21(23). P. 28651–28656. DOI: 10.1364/OE.21.028651.
151. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н. Л. Казанский, И. С. Степаненко, А. И. Хаймович, С. В. Кравченко, Е. В. Бызов, М. А. Моисеев // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40, № 2. С. 203–214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.

152. Метод расчёта функции эйконала и его применение для синтеза дифракционных оптических элементов для фокусировки в заданную область / Л. Л. Досколович, А. А. Мингазов, Е. В. Бызов, Д. А. Быков, Е. А. Безус // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 2. С. 173–183. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1029.
153. Расчёт оптических элементов при протяженном источнике излучения / Е. В. Бызов, Л. Л. Досколович, С. В. Кравченко, М. А. Моисеев, Н. Л. Казанский // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 1. С. 40–47. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1178.
154. Beijersbergen M. W., Coerwinkel R. C., Kristensen M. [et al.]. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate // Optics Communications. 1994. Vol. 112(5-6). P. 321–327. DOI: 10.1016/0030-4018(94)90638-6.
155. Diffraction of conic and Gaussian beams by a spiral phase plate / V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, S. N. Khonina, R. V. Skidanov, V. A. Soifer, H. Elfstrom, N. Tossavainen, J. Turunen // Applied Optics. 2006. Vol. 45(12). P. 2656–2665. DOI: 10.1364/AO.45.002656.
156. Courtial J., Padgett M. J. Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes // Optics Communications. 1999. Vol. 159(1–3). P. 13–18. DOI: 10.1016/S0030-4018(98)00599-9.
157. Abramochkin E., Razueva E., Volostnikov V. General astigmatic transform of Hermite-Laguerre-Gaussian beams // Journal of the Optical Society of America A. 2010. Vol. 27(11). P. 2506–2513. DOI: 10.1364/JOSAA.27.002506.
158. Chen J., Kuang D. F., Gui M. [et al.] Generation of optical vortex using a spiral phase plate fabricated in quartz by direct laser writing and inductively coupled plasma etching // Chinese Physics Letters. 2009. Vol. 26(1). Article 014202. DOI: 10.1088/0256-307X/26/1/014202.
159. Spectral control of the orbital angular momentum of a laser beam based on 3D properties of spiral phase plates fabricated for an infrared wavelength / S. N. Khonina, V. V. Podlipnov, S. V. Karpeev, A. V. Ustinov, S. G. Volotovskiy, S. V. Ganchevskaya // Optics Express. 2020. Vol. 28(12). P. 18407–18417. DOI: 10.1364/OE.396199.
160. Degtyarev S. A., Porfirev A. P., Khonina S. N. Photonic nanohelix generated by a binary spiral axicon // Applied Optics. 2016. Vol. 55(12). P. B44–B48. DOI: 10.1364/AO.55.000B44.
161. Zhao Z., Wang J., Li S. [et al.]. Metamaterials-based broadband generation of orbital angular momentum carrying vector beams // Optics Letters. 2013. Vol. 38(6). P. 932–934. DOI: 10.1364/OL.38.000932.

162. Slussarenko S., Murauski A., Du T. [et al.]. Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge // *Optics Express*. 2011. Vol. 19(5). P. 4085–4090. DOI: 10.1364/OE.19.004085.
163. Volyar A. V., Fadeeva T. A., Egorov Y. A. Vector singularities of Gaussian beams in uniaxial crystals: Optical vortex generation // *Technical Physics Letters*. 2002. Vol. 28(11). P. 958–961. DOI: 10.1134/1.1526896.
164. Khonina S. N., Morozov A. A., Karpeev S. V. Effective transformation of a zero-order Bessel beam into a second-order vortex beam using a uniaxial crystal // *Laser Physics*. 2014. Vol. 24(5). Article ID 056101. DOI: 10.1088/1054-660X/24/5/056101.
165. Li S., Ding Y., Guan X. [et al.]. Compact high-efficiency vortex beam emitter based on a silicon photonics micro-ring // *Optics Letters*. 2018. Vol. 43(6). P. 1319–1322. DOI: 10.1364/OL.43.001319.
166. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with PN depletion diode / I. V. Stepanov, D. M. Fatkhiev, V. S. Lyubopytov, R. V. Kutluyarov, E. P. Grakhova, N. Neumann, S. N. Khonina, A. K. Sultanov // *Sensors*. 2022. Vol. 22(3). Article ID 929. DOI: 10.3390/s22030929.
167. Phase singularities and optical vortices in photonics / A. P. Porfirev, A. A. Kuchmizhak, S. O. Gurbatov, S. Juodkazis, S. N. Khonina, Yu. N. Kul'chin // *Physics-Uspekhi*. 2022. Vol. 65(8). P. 789–811. DOI: 10.3367/UFNe.2021.07.039028.
168. Huang H., Xie G., Yan Y. [et al.]. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength // *Optics Letters*. 2014. Vol. 39(2). P. 197–200. DOI: 10.1364/OL.39.000197.
169. Khonina S. N., Porfirev A. P. Harnessing of inhomogeneously polarized Hermite–Gaussian vector beams to manage the 3D spin angular momentum density distribution // *Nanophotonics*. 2021. Vol. 11(4). P. 697–712. DOI: 10.1515/nanoph-2021-0418.
170. Khonina S. N., Porfirev A. P., Karpeev S. V. Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures // *Optics Express*. 2019. Vol. 27(13). P. 18484–18492. DOI: 10.1364/OE.27.018484.
171. Полностью симметричный дифракционно-интерференционный формирователь радиально-поляризованных пучков с длиной волны 1530 нм / В. В. Подлипов, С. В. Карпеев, В. Д. Паранин // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 4. С. 577–585. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-577-585.
172. Tidwell S. C., Ford D. H., Kimura W. D. Generating radially polarized beams interferometrically // *Applied Optics*. 1990. Vol. 29(15). P. 2234–2239. DOI: 10.1364/AO.29.002234.

173. Passilly N., de Saint Denis R., Aït-Ameur K. [et al.]. Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam // *Journal of the Optical Society of America A*. 2005. Vol. 22(5). P. 984–991. DOI: 10.1364/JOSAA.22.000984.
174. Khonina S. N., Karpeev S. V., Alferov S. V. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter // *Optics Letters*. 2012. Vol. 37(12). P. 2385–2387. DOI: 10.1364/OL.37.002385.
175. Fadeyeva T., Shvedov V., Shostka N. [et al.]. Natural shaping of the cylindrically polarized beams // *Optics Letters*. 2010. Vol. 35(22). P. 3787–3789. DOI: 10.1364/OL.35.003787.
176. Polarization conversion under focusing of vortex laser beams along the axis of anisotropic crystals / S. N. Khonina, S. V. Karpeev, V. D. Paragin, A. A. Morozov // *Physics Letters A*. 2017. Vol. 381(30). P. 2444–2455. DOI: 10.1016/J.PHYSLETA.2017.05.025.
177. Liu H., Yuan L. Separating radial and azimuthal polarizations of circular Airy vortex beam via uniaxial crystal // *Optics Express*. 2023. Vol. 31(14). P. 22507–22518. DOI: 10.1364/OE.491309.
178. Ding F., Chang B., Wei Q. [et al.]. Versatile polarization generation and manipulation using dielectric metasurfaces // *Laser & Photonics Reviews*. 2020. Vol. 14(11). Article ID 2000116. DOI: 10.1002/lpor.202000116.
179. Metalenses for the generation of vector Lissajous beams with a complex Poynting vector density / S. N. Khonina, S.A. Degtyarev, A. V. Ustinov, A. P. Porfirev // *Optics Express*. 2021. Vol. 29(12). P. 18651–18662. DOI: 10.1364/OE.428453.
180. Liu D., Zhou C., Lu P. [et al.]. Generation of vector beams with different polarization singularities based on metasurfaces // *New Journal of Physics*. 2022. Vol. 24(4). Article ID 043022. DOI: 10.1088/1367-2630/ac60dd.
181. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates / S. N. Khonina, A. V. Ustinov, S. A. Fomchenkov, A. P. Porfirev // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8(1). Article ID 14320. DOI: 10.1038/s41598-018-32469-0.
182. Формирование цилиндрических векторных пучков высоких порядков при помощи секторных сэндвич-структур / С. В. Карпеев, В. В. Подлипнов, С. А. Дегтярев, А. М. Алгубили // *Компьютерная оптика*. 2022. Т. 46, № 5. С. 682–691. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1096.
183. Refractive bi-conic axicon (volcone) for polarization conversion of monochromatic radiation / S. A. Degtyarev, S. V. Karpeev, N. A. Ivliev, Y. S. Strelkov, V. V. Podlipnov, S. N. Khonina // *Photonics*. 2022. Vol. 9(6). Article 421. DOI: 10.3390/photonics9060421.

184. Brunet C., Vaity P., Messaddeq Y., et al. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states // *Optics Express*. 2014. Vol. 22(21). P. 26117–26127. DOI: 10.1364/OE.22.026117.
185. Free-space transmission and detection of variously polarized near-IR beams using standard communication systems with embedded singular phase structures / S. V. Karpeev, V. V. Podlipnov, S. N. Khonina, N. A. Ivliev, S. V. Ganchevskay // *Sensors*. 2022. Vol. 22(3). P. 890–907. DOI: 10.3390/s22030890.
186. Khonina S. N., Karpeev S. V., Parani V. D. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles // *Optics and Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 105. P. 68–74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
187. Li L., Zhang R., Zhao Z. [et al.]. High-capacity free-space optical communications between a ground transmitter and a ground receiver via a UAV using multiplexing of multiple orbital-angular-momentum beams // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article ID 17427. DOI: 10.1038/s41598-017-17580-y.
188. Передача через атмосферу высокоскоростного сигнала формата 1000BASE-SX/LX вихревыми пучками ближнего ИК-диапазона при помощи модифицированных SFP-трансиверов DEM-310GT / С. В. Карпеев, В. В. Подлипнов, Н. А. Ивлиев, С. Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. 2020. Т. 44, № 4. С. 578–581. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-772.
189. Возможности передачи и детектирования модулированных пучков с длиной волны 1530 нм в условиях случайных флуктуаций среды распространения / С. В. Карпеев, В. В. Подлипнов, Н. А. Ивлиев, В. Д. Паранин // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 3. С. 368–375. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375.
190. *Optical nano and micro actuator technology* / edited by G. K. Knopf, Y. Otani. CRC Press, 2013. 664 p. ISBN: 978-1439840535.
191. Pons J. L. *Emerging actuator technologies: A micromechatronic approach*. Wiley, 2005. 278 p. ISBN: 978-0-470-09199-9.
192. Yang T., Chen Y., Minzioni P. A review on optical actuators for microfluidic systems. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2017. Vol. 27(12). Article ID 123001. DOI: 10.1088/1361-6439/aa9207.
193. Ge F., Lu X., Xiang J. [et al.]. An optical actuator based on gold-nanoparticle-containing temperature-memory semicrystalline polymers. *Angewandte Chemie International Edition*. 2017. Vol. 56(22). P. 6126–6130. DOI: 10.1002/anie.201612164.

194. Cui X., Ruan Q., Zhuo X. [et al.]. Photothermal nanomaterials: A powerful light-to-heat converter. *Chemical Reviews*. 2023. Vol. 123(11). P. 6891–6952. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00159.
195. Rastogi P., Njuguna J., Kandasubramanian B. Exploration of elastomeric and polymeric liquid crystals with photothermal actuation: A review. *European Polymer Journal*. 2019. Vol. 121. Article ID 1092. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109287.
196. Han B., Zhang Y.-L., Chen Q.-D. [et al.]. Carbon-based photothermal actuators. *Advanced Functional Materials*. 2018. Vol. 28(40). Article ID 1802235. DOI: 10.1002/adfm.201802235.
197. Li Q., Jiao Y. Ultrafast photothermal actuators with a large helical curvature based on ultrathin GO and biaxially oriented PE films. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022. Vol. 14(50). P. 55828–55838. DOI: 10.1021/acsami.2c18478.
198. Wang T., Torres D., Fernández F. E. [et al.]. Maximizing the performance of photothermal actuators by combining smart materials with supplementary advantages. *Science Advances*. 2017. Vol. 3(4). Article ID e1602697. DOI: 10.1126/sciadv.1602697.
199. Zhang X., Yu Z., Wang C. [et al.]. Photoactuators and motors based on carbon nanotubes with selective chirality distributions. *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. Article ID 2983. DOI: 10.1038/ncomms3983.
200. Lahikainen M., Zeng H., Priimagi A. Reconfigurable photoactuator through synergistic use of photochemical and photothermal effects. *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. Article ID 4148. DOI: 10.1038/s41467-018-06647-7.
201. Geng J. S., Mei L., Liang Y. Y. [et al.]. Controllable photomechanical bending of metal-organic rotaxane crystals facilitated by regioselective confined-space photodimerization. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13. Article 2030. DOI: 10.1038/s41467-022-29738-y.
202. Irie M. Photochromism: Memories and switches – Introduction. *Chemical Reviews*. 2000. Vol. 100(5). P. 1683–1684. DOI: 10.1021/cr980068l.
203. Ikeda T., Mamiya J., Yu Y. Photomechanics of liquid-crystalline elastomers and other polymers. *Angewandte Chemie International Edition*. 2007. Vol. 46(4). P. 506–528. DOI: 10.1002/anie.200602372.
204. Pang X., Lv J.-A., Zhu C. [et al.]. Photodeformable azobenzene-containing liquid crystal polymers and soft actuators. *Advanced Materials*. 2019. Vol. 31(52). Article ID 1904224. DOI: 10.1002/adma.201904224.
205. Rad J. K., Balzade Z., Mahdavian A. R. Spiropyran-based advanced photoswitchable materials: A fascinating pathway to the future stimuli-responsive devices. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry and Photobiology*. 2023. Vol. 26. Article ID 101001. DOI: 10.1002/jphoto.2023101001.

- tochemistry Reviews. 2022. Vol. 51. Article ID 100487. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2022.100487.
206. Lahikainen M., Kuntze K., Zeng H. [et al.]. Tunable photomechanics in diarylethene-driven liquid crystal network actuators. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12(42). P. 47939–47947. DOI: 10.1021/acsmami.0c12735.
207. Jiang Z.-C., Liu Q., Xiao Y.-Y. [et al.]. Liquid crystal elastomers for actuation: A perspective on structure-property-function relation. *Progress in Polymer Science*. 2024. Vol. 153. Article ID 101829. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2024.101829.
208. Mohan D. S., Mishra K., Saha S. K. Adaptive optics and its applications. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*. 2005. Vol. 43(6). P. 399–414.
209. Zhang S., Nan F., Neale S. L. Light-driven microrobots: Mechanisms and applications. In: *Field-driven micro and nanorobots for biology and medicine* / ed. by Y. Sun, X. Wang, J. Yu. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. Chap. 4. P. 91–111. DOI: 10.1007/978-3-030-80197-7_4.
210. Rogalski A. Infrared detectors: An overview. *Infrared Physics & Technology*. 2005. Vol. 43(3–5). P. 187–210.
211. Talib M., Tripathi N., Sharma P. [et al.]. Development of ultra-sensitive broadband photodetector: a detailed study on hidden photodetection-properties of TiS_2 nanosheets. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 14. P. 1243–1254.
212. Chen C., Yi Z. Photostrictive effect: Characterization techniques, materials, and applications. *Advanced Functional Materials*. 2021. Vol. 31. Article ID 2010706. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.07.032.
213. Pan Q. H., Zhou S. H., Guo Y. M. [et al.]. Enhanced photoelectric responsivity of bilayer graphene/GaAs photodetector using plasmon resonance grating structures. *Optik*. 2022. Vol. 259. Article ID 169031. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169031.
214. Zhang H., Gao S., Wang H. [et al.]. Enhancing the photoelectric performance of metal oxide semiconductors by introduction of dislocations. *Journal of Materials Chemistry A*. 2024. Vol. 12(35). P. 23910–23919. DOI: 10.1039/D4TA03786C.
215. Nunzi J.-M. Organic photovoltaic materials and devices. *Comptes Rendus Physique*. 2002. Vol. 3(4). P. 523–542. DOI: 10.1016/S1631-0705(02)01335-X.
216. Wang D., Li G. Advances in photoelectric detection units for imaging based on perovskite materials. *Laser & Photonics Reviews*. 2022. Vol. 16(7). Article ID 2100713. DOI: 10.1002/lpor.202100713.

3 КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОНИКИ

3.1 Интеллектуальный гиперспектральный мониторинг природной и техногенной среды

3.1.1 Задачи гиперспектрального мониторинга природной и техногенной среды

Мониторинг – это система постоянного наблюдения за явлениями и процессами, проходящими в окружающей среде и обществе, результаты которого служат для обоснования управленческих решений по обеспечению безопасности людей и объектов экономики [1]. В рамках системы наблюдения происходит оценка, контроль объекта, управление состоянием объекта в зависимости от воздействия определённых факторов [2]. Дистанционный мониторинг предполагает наличие значительного расстояния между наблюдаемыми процессами и устройствами регистрации, что накладывает дополнительные требования на чувствительность и пространственное разрешение сенсоров, возможность их размещения на борту транспортного средства, космического или летательного аппаратов [3]. Получение данных для мониторинга с космического или летательного аппаратов в научной литературе описывается словосочетанием «дистанционное зондирование Земли». ДЗЗ – наблюдение поверхности Земли с помощью летательных аппаратов, оснащённых техническими средствами, позволяющими формировать изображения участков поверхности в широком диапазоне длин волн от ультрафиолетового оптического излучения до радиоволн [4]. Последние годы развития дистанционного мониторинга характеризовались оперативностью видеосъёмки и передачи данных вместо фотосъёмки, становлением коммерческого рынка и созданием профессиональных систем обработки данных ДЗЗ [3–6].

Если получаемые данные ориентированы на использование в различных областях, в том числе двойного назначения, то необходимо обеспечить максимальное разрешение для удовлетворения всех потенциальных потребителей. Основными характеристиками систем ДЗЗ являются характеристики разрешения: пространственного, спектрального, радиометрического, временного [5]. Чем выше эти характеристики, тем больший объём данных поступает от систем ДЗЗ, тем выше требования к используемым объёмам памяти и производительности вычислительных систем, необходимых для анализа и хранения поступающих изображений. В настоящее время на космических орбитах действует несколько сотен аппаратов ДЗЗ – США, Китая, Европы, Японии, России и многих других стран [5]. Данные, передаваемые со спутников, могут быть существенно дополнены размещаемыми в интернете результатами съёмок с летательных аппаратов, стационарных систем видеонаблюдения и с мобильных устройств (смартфонов). Возникающий громадный поток непрерывно поступающих изображений требует активного применения технологий анализа больших данных и методов искусственного интеллекта для решения широкого круга прикладных задач.

В таблице 3.1 представлены параметры и области применения разработанных в Самарском университете и ИСОИ РАН изображающих гиперспектрометров с указанием заказчиков и даты разработки. Приведены параметры изображающих гиперспектрометров для малого космического аппарата (МКА) «Аист» [7], гиперспектрометров, предназначенных для размещения на малом и большом квадрокоптерах, для размещения на наноспутниках Кубсат 3U [3, 8] и Кубсат 6U ($U=10\times10\times10$ мм³), для размещения на поворотной платформе [3, 9] и на дождевальном машине [3, 10], а также настольные лабораторные варианты для проведения научных исследований, в том числе с целью разработки методов искусственного интеллекта для распознавания состава почвы [11] и сорта кофейных зёрен [12], анализа кровеносных сосудов [13] и видеопотоков.

Таблица 3.1 – Параметры разработанных в Самарском университете и ИСОИ РАН изображающих гиперспектрометров

№	Назначение (размещение)	Дата, гг.	Параметры	Область применения
1	Для малого космического аппарата «Аист»	2013–2017	$P=5,1$ кг; $V=350\times250\times290$ мм ³ ; $E=25$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $n_\lambda=262$; $\Delta\lambda=2,3$ нм; при высоте орбиты 450 км $\Delta s=30$ м	ДЗЗ
2	Для малого квадрокоптера	2018	$P=0,15$ кг; $V=100\times60\times60$ мм ³ ; $E=10$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $n_\lambda=40$; $\Delta\lambda=15$ нм; при съёмке с высоты 100 м $\Delta s=0,1$ м	С/х мониторинг
3	Для квадрокоптера	2019	$P=0,75$ кг; $V=150\times100\times100$ мм ³ ; $E=15$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $n_\lambda=150$; $\Delta\lambda=4$ нм; при съёмке с высоты 200 м $\Delta s=0,02$ м	Охрана природы
4	Для размещения на поворотной платформе	2018	$P=0,75$ кг; $V=150\times100\times100$ мм ³ ; $E=15$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $\Delta\lambda=2$ нм; $n_\lambda=250$	Сельское хозяйство
5	Для дождеваль-ной машины	2019	$P=0,65$ кг; $V=260\times40\times40$ мм ³ ; $E=15$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $\Delta\lambda=15$ нм; $n_\lambda=40$	Ороше-ние
6	Для наноспут-ника Кубсат 3U	2022	$P=0,7$ кг; $V=150\times100\times100$ мм ³ ; $E=15$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $n_\lambda=150$; $\Delta\lambda=4$ нм; при высоте орбиты 450 км $\Delta s=200$ м	ДЗЗ
7	Для научной лаборатории	2021	$\lambda=0,4-1,0$ мкм; $\Delta\lambda=2$ нм; $n_\lambda=250$	Наука
8	Для наноспутника Кубсат 3U	2024 г.	$P=1,2$ кг; $V=250\times80\times80$ мм ³ ; $E=15$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $n_\lambda=390$; $\Delta\lambda=2,5$ нм; при высоте орбиты 450 км $\Delta s=60$ м	ДЗЗ
9	Для наноспут-ника Кубсат 6U	2024	$P=1,5$ кг; $V=300\times80\times80$ мм ³ ; $E=15$ Вт; $\lambda=0,4-1,0$ мкм; $n_\lambda=150$; $\Delta\lambda=2,5$ нм; при высоте орбиты 450 км $\Delta s=6-13$ м	ДЗЗ
10	Двухдиапазон-ный гиперспек-трометр	2024	$P=5,0-8,0$ кг; $E=25$ Вт; $V=(350-500)\times250\times250$ мм ³ ; λ : видимый – 0,4–1,0 мкм, ИК – 1,0–2,5 мкм; $n_\lambda=385$ (видимый – 250, ИК – 135); $\Delta\lambda$: видимый – 2,4 нм, ИК – 6,7 нм; при высоте орбиты 450 км $\Delta s=2-13$ м	Обработ-ка видео-потоков

P – вес; V – габариты; E – энергопотребление; λ – спектральный диапазон; n_λ – количество спектральных каналов; $\Delta\lambda$ – спектральное разрешение; Δs – пространственное разрешение

Финансирование разработок выполнялось при поддержке Минобрнауки РФ (работы по Постановлению Правительства РФ № 218 от 9.04.2010, в рамках программ по повышению конкурентоспособности ведущих университетов Российской Федерации среди ведущих мировых научно-образовательных центров «5-100», «Приоритет-2030», «Передовые инженерные школы», научно-образовательных центров мирового уровня, по созданию в Самарской области аграрного карбонового полигона, государственные задания), Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Фонда содействия инновациям (программа «Дежурный по планете», проект «Space-п»), научной программы Национального центра физики и математики.

3.1.2 Мониторинг на основе применения гиперспектральной аппаратуры

В живой природе возможность видеть на определённых длинах волн активно используют птицы и насекомые. Например, чайки, чтобы видеть рыбу под водой при разной погоде, освещённости и солёности воды, подстраивают зрение с помощью специальной плёнки, формируемой на поверхности глаза. Каждый объект имеет уникальную спектральную характеристику излучения, что позволяет однозначно идентифицировать материалы, составляющие его структуру.

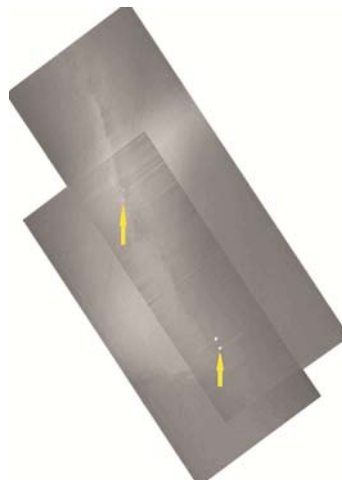
Для получения подробных данных на разных длинах волн используют гиперспектральные сенсоры, которые собирают информацию в виде «пакетов» изображений, при этом каждое изображение представляет определённую область электромагнитного спектра (спектральный канал).

На рисунке 3.1 представлен результат обнаружения нефтяных разливов, выполненного с помощью разработанного нами гиперспектрометра, размещённого на беспилотном летательном аппарате (параметры гиперспектрометра – строка 3 таблицы 3.1). На цвет-

ном изображении (рисунок 3.1а), характеризующем маршрут полёта БПЛА, никаких следов разливов нефти ни на чернозёме, ни на зелени незаметно, зато они хорошо выявляются на изображениях вегетационных индексов, рассчитанных по данным двух спектральных каналов на длинах волн 0,6 и 0,76 мкм (рисунок 3.1б).



а)



б)

Рисунок 3.1 – Обнаружение нефтяных пятен с БПЛА: цветное изображение, характеризующее маршрут полёта над чернозёмом и зелёными насаждениями (а); изображение вегетационного индекса, рассчитываемого по двум спектральным каналам, с выявленными участками загрязнений (б)

То есть использование гиперспектральной информации позволяет обнаружить и определить многие объекты и явления, незаметные на обычных цветных или панхроматических изображениях. Это открывает множество возможностей для применения получаемых гиперспектральных изображений [3–5, 8–17]. Перечислим основные направления возможного использования гиперспектральных данных. В области экологии [3–5, 14–16] это: мониторинг окружающей среды (химические выбросы, сточные воды и т.п.); выявление и локализация дефектов нефте- и газопроводов,

обнаружение нефтяной плёнки; наблюдение районов природных и техногенных катастроф; оценка качества воды в акватории; анализ состояния прибрежных зон; оценка заболоченных мест и др. В области сельского и лесного хозяйства [3–5, 16, 17]: анализ качества почв; обнаружение повреждений лесных и сельскохозяйственных угодий; выявление областей распространения растений (в том числе сорных, а также поражённых вредителями и заболеваниями); прогнозирование урожая; составление карт распределения пород деревьев; оценка запасов древесины; обнаружение изменений для оценки состояния экосистем с точки зрения их подверженности влиянию глобального потепления и роста народонаселения. В области разведки полезных ископаемых: идентификация минералов; прогнозные оценки обнаруженных ресурсов; составление литологических карт. В метеорологии: исследование химического и физического состава атмосферы; изучение радиационного баланса Земли; контроль погодообразующих и климатообразующих факторов; анализ карбонового следа [17]. В интересах Вооружённых сил и других силовых ведомств: обнаружение и классификация замаскированных объектов; распознавание реальных и ложных целей; обнаружение и локализация мин и неразорвавшихся снарядов; выявление сливов технических отходов секретного производства; оценка наличия химических примесей в почве, воде и воздухе; оценка результативности поражения целей; выявление областей распространения наркосодержащих растений; противодействие астероидно-кометной опасности. В области дорожного и градостроительства, урбанизации: мониторинг роста городов; оценка уязвимости населённых пунктов при чрезвычайных ситуациях; идентификация и изучение состояния дорожного покрытия и кровельных материалов.

Радиолокационная съёмка – вид активной съёмки, при которой зондирующая система испускает радиоволновое излучение и принимает отражённый земной поверхностью обратный сигнал [18]. Радиолокационное зондирование имеет несколько преимуществ по

сравнению со съёмкой в других диапазонах электромагнитного спектра, наиболее важным является возможность получения изображений земной поверхности в отсутствие естественного освещения и сквозь облачность [3, 18].

Данные в разных спектральных диапазонах могут отличаться пространственным разрешением, датой и временем съёмки, поэтому актуальной становится также задача комплексирования и совместного использования мультимодальных данных.

3.1.3 Интеллектуальный анализ данных мониторинга

В последние десятилетия существенно повысилось качество данных, получаемых от современных систем дистанционного зондирования Земли, большинство из которых превратилось из наблюдательных систем в измерительные. Также произошёл практически взрывной рост числа спутниковых систем наблюдения Земли (см., например, работу [19]). Это существенно расширило круг применения технологий дистанционного зондирования и дало толчок активному развитию различных информационных систем дистанционного мониторинга (ИСДМ), то есть систем, ориентированных на обеспечение возможностей наблюдения, анализа и прогнозирования динамики различных процессов и явлений для решения как научных, так и прикладных задач [3]. Особое значение такие системы имеют при решении задач, для которых необходимо получать достаточно оперативную, а главное – однородную и объективную информацию о различных процессах, происходящих на больших территориях. Такие системы приобретают особое значение особенно для тех стран, которые обладают значительными территориями и/или заинтересованы в получении информации о состоянии различных ресурсов (например, лесных, сельскохозяйственных, водных и других) по всему миру. Россия с её огромными территориями не только заинтересована в создании и использовании подобных систем, но и во многих случаях просто не имеет альтернативных воз-

возможностей получения объективной однородной информации о состоянии территорий и происходящих на них процессах, кроме создания и использования различных ИСДМ. Это, наряду с быстро развивающимися техническими возможностями систем ДЗЗ и современными информационными технологиями, привело к активной разработке и широкому применению специализированных ИСДМ.

Важнейшим звеном современных ИСДМ является классификация данных ДЗЗ, особенно перспективным является использование гиперспектральных данных [3, 20–22].

На сегодня наиболее перспективны алгоритмы классификации гиперспектральных изображений (ГСИ) при помощи свёрточных нейронных сетей (СНС) с одновременным анализом пространственной и спектральной составляющих [3, 8, 11, 12, 22–28]. Однако для методов на основе свёрточных нейронных сетей критически важным является процедура формирования обучающей выборки. При решении задач классификации ГСИ, снятых с высоким пространственным разрешением, эта процедура существенно усложняется, так как при этом недостаточно выполнить разметку отдельных гиперпикселей изображения, а требуется фактически выполнить сегментацию ГСИ [20, 24].

Подобная ситуация возникает при решении задачи классификации типов растительности по ГСИ, снятым с поверхности Земли или с борта БПЛА, условно можно назвать такие изображения ГСИ наземной съёмки, в отличие от ГСИ спутниковой съёмки. При решении задачи классификации по таким ГСИ необходимо учитывать как спектральную, так и пространственную составляющую изображения, в отличие от задач классификации растительности по ГСИ спутниковой съёмки. Вследствие этого существенно усложняется формирование обучающей выборки для свёрточных нейронных сетей, так как невозможно использовать для обучения существующие спутниковые ГСИ [25]. Для качественного обучения сети требу-

ется формирование сегментации вручную, что существенно повышает сложность и ресурсоёмкость решаемой задачи.

В работах [24, 25] представлена сквозная технология разметки ГСИ для формирования обучающих выборок, выполнено обучение нейросетевых классификаторов и распознавание типов культур в интересах точного земледелия. Автоматизированная разметка обучающих данных выполнялась на основе предложенных адаптивных вегетационных индексов. В качестве архитектуры СНС для классификации использовалось развитие пространственно-спектральной сети из работы [28].

Наиболее перспективной представляется двухэтапная схема решения прикладных задач классификации типов растительности по ГСИ. На первом этапе выполняется формирование обучающей выборки по части набора ГСИ. Предварительная сегментация ГСИ выполняется при помощи адаптивного вегетационного индекса [29]. Предварительная сегментация дорабатывается оператором с контролем результата по RGB-изображению, цветосинтезированному по трём спектральным каналам ГСИ, соответствующим длинам волн 633 нм, 532 нм и 485 нм. Сформированная таким образом обучающая выборка используется для обучения СНС. Архитектура СНС позволяет успешно учитывать как спектральную, так и пространственную составляющие, с дополнительными модификациями, обеспечивающими устойчивость классификатора к изменениям освещения. Общая схема технологии обучения классификатора типов растительности следующая.

Формирование обучающей выборки:

- 1) предварительная бинарная сегментация почвы и растительности на основе адаптивного вегетационного индекса;
- 2) доработка сегментации классов растительности вручную оператором;
- 3) опциональная предобработка ГСИ с целью компенсации изменений освещённости.

Обучение нейросетевого классификатора

Разработанная архитектура СНС представляет собой объединение свёрточных слоёв для анализа 1D- и 2D-срезов гиперспектрального изображения, тем самым позволяя перейти к анализу 3D-участков. На вход сети подаётся гиперкуб, размеры которого определяются количеством каналов V и пространственными координатами (высотой и шириной) H и W соответственно. Такой подход позволяет не только выделять признаки одного гиперпиксела, но и находить его взаимозависимости с соседями.

Сеть состоит из 10 свёрточных слоёв (Conv) и одного полносвязного слоя с dropout-слоем, глубина каскада слоёв равна 5. Слои dropout позволяют избежать переобучения, коэффициент исключения в нём составляет 0,6 [30]. Для компенсации влияния освещённости после каждого свёрточного слоя был добавлен слой пакетной нормализации (BatchNorm3d). На рисунке 3.2 представлен результат сложнейшего распознавания – выявления конопли в массе других дикорастущих растений (конопля отмечена цветом) [31].

3.1.4 Сельскохозяйственные применения

Исследования по изучению прецизионного орошения и прецизионного внесения минеральных удобрений, проведённые специалистами Российского научно-исследовательского института проблем мелиорации (РосНИИПМ, г. Новочеркасск, Ростовская область) с использованием разработанного нами гиперспектрального оборудования [3, 32–38], позволили установить [3], что экономия оросительной воды при возделывании сельскохозяйственных культур (озимая пшеница, кукуруза на зерно, лук репчатый, картофель, свёкла столовая и соя) – 12–18%, что составляет 300–650 м³/га, при этом урожайность превышала контрольный вариант (рекомендованный зональными системами земледелия) на 1,2–5%.

При использовании прецизионного внесения удобрений урожайность сельскохозяйственных культур оставалась на том же уровне, а нормы минеральных удобрений снизились на 8–15%. Рентабельность производства повышалась на 15–22%.

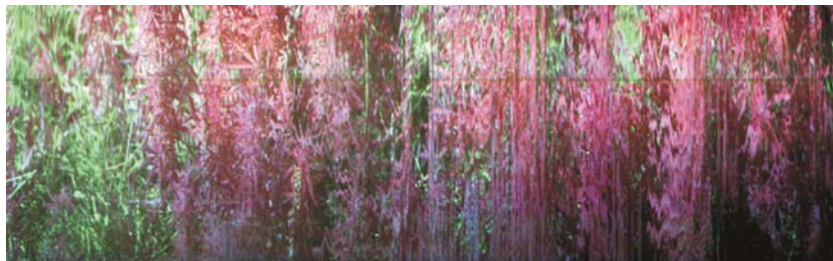


Рисунок 3.2 – Обнаружение конопли в основной массе растительности: конопля отмечена красным цветом

Гиперспектрометр с разработанным программным обеспечением прошёл соответствующие экспериментальные полевые испытания (рисунок 3.3) и продемонстрировал возможности автоматической идентификации растительных культур (рисунок 3.4).

Ключевым параметром для земледелия большей части российских регионов является наличие влаги. Учёными Самары и Новочеркасска автоматизирована работа поливальной машины [3, 10, 38], которая является ярким примером киберфизической системы на основе применения фотоники.

На машине была размещена гиперспектральная камера (её параметры приведены в таблице 3.1, строка 5), данные с которой поступают в систему управления клапанами форсунок, которые открываются только при наличии растений с недостатком влаги в зоне действия форсунки.

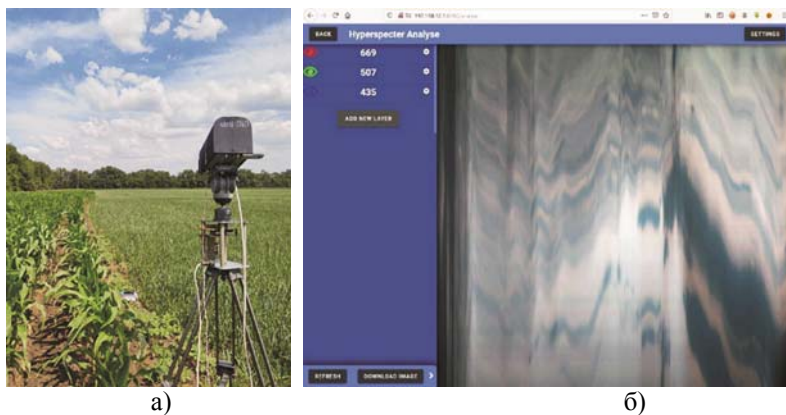


Рисунок 3.3 – Полевые испытания: съёмка с помощью поворотной платформы на границе двух полей (а); экран программного обеспечения для анализа гиперспектральных изображений (б)

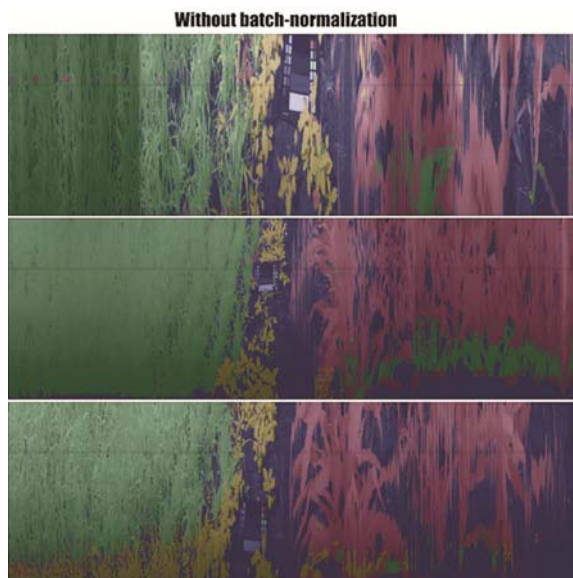


Рисунок 3.4 – Распознавание разных типов растений (кукуруза, овёс)

При проведении полевых испытаний анализировались виды сельхозкультур, влажность, условия освещения. Показано, что по

спектральным признакам в полевых условиях имеется возможность устойчивого распознавания ряда сельхозкультур [3, 9, 21, 31], а также различения растений на влажных участках почвы от растений на сухих участках почвы [3, 10, 24, 38].

3.2 Системы технического зрения

Системы технического зрения являются ярким примером перехода в процессе своего развития от использования простых элементов классической оптики к внедрению сложных киберфотонных систем.

В англоязычной литературе существует два близких термина – “computer vision” и “machine vision”. Соответствующие русскоязычные термины – «компьютерное зрение» и «техническое зрение» (или его синоним – «машинное зрение»). В некоторых источниках отмечается, что использование термина «машинное зрение», являющегося калькой англоязычного термина, может иметь нежелательную, сужающую область его применения коннотацию, связанную с понятиями «машина» и «автомобиль».

В широком смысле компьютерное зрение – это междисциплинарная область исследований, направленных на разработку теоретической и алгоритмической основы автоматического понимания изображений и сцен, а машинное зрение – это исследование методов, приёмов и оборудования, с помощью которых можно создавать системы технического зрения (СТЗ) для практического применения. Машинное зрение относится к дисциплине системной инженерии, особенно в контексте автоматизации производства, которая рассматривает все аспекты создания СТЗ: выбор схем освещения исследуемой сцены, выбор характеристик датчиков, их количества и геометрии расположения, вопросы калибровки и ориентирования, выбор или разработка оборудования для оцифровки и процессорной обработки, разработка собственно алгоритмов и их компьютерная реализация [39, 40].

Важно отметить, что в СТЗ критически важен временной аспект, в задачах автоматизации система принимает решение на основе визуальных входных данных в режиме реального или близкого к реальному времени.

Возросшая в последнее время производительность вычислительных систем, в том числе в компактном исполнении, привела к значительному сближению использования терминов «компьютерное зрение» и «машинное зрение».

Использование новой элементной базы фотоники в таких составляющих СТЗ, как системы освещения, оптические и сенсорные системы, позволяет существенно расширить области контроля производства в процессе повышения интеллектуального уровня предприятия. При этом появляется возможность решать новые нестандартные задачи видеоконтроля и видеоанализа, устранять проблемы применения классических видеосистем, связанные со сложностью размещения видеокамер при наличии пространственных и весогабаритных ограничений, организации необходимого освещения.

СТЗ на основе дифракционно-оптических систем позволяет решать многие задачи встраивания видеоконтроля там, где это было ранее невозможно, тем самым оказывая значительное влияние на технологическое развитие в широком спектре отраслей. Уникальные компоненты фотоники на основе дифракционно-оптических элементов, а именно изображающие дифракционно-оптические системы и компактные изображающие гиперспектрометры, в сотни раз превосходят существующие аналоги, существенно снижая вес, уменьшая габариты и стоимость изготовления [41].

Значительным преимуществом компактных дифракционно-оптических систем является возможность одновременного получения видеоданных видимого, инфракрасного и гиперспектрального режимов съёмки. Однако изображения и видео, получаемые при помощи таких элементов, не пригодны к использованию без применения серьёзной постобработки. Таким образом, разработка но-

вых дифракционно-оптических элементов неотделима от разработку соответствующих им программных методов, обеспечивающих реконструкцию, обработку и анализ «сырых» видеоданных. И наоборот, сложные методы обработки и анализа видеоданных зачастую проще реализовать, используя данные, формируемые специально рассчитанными для них дифракционно-оптическими элементами [42].

В настоящий момент можно говорить, что СТЗ реализуется в рамках сквозной цифровой платформы киберфотоники (рисунок 3.5), которая включает в себя следующие уровни: уровень средств расчёта и моделирования системы формирования, обработки и анализа изображений/видеоданных; уровень системы освещения, уровень оптической системы формирования изображений; уровень периферийных вычислений; уровень специализированных систем; уровень распределённой потоковой обработки в облачной среде.



Рисунок 3.5 – Архитектура цифровой платформы киберфотоники

Новые современные методы компьютерного дизайна, используемые при расчёте систем освещения, позволяют разработать све-

одиодные системы безбликовой подсветки с высокой степенью равномерности освещения по всему полю зрения. Создание равномерного светового потока по всему полю зрения видеокамер системы при отсутствии бликов на контролируемых объектах является отдельной сложной научно-технической задачей. В отличие от классических устройств оптические элементы светодиодов в таких системах имеют сложную внешнюю преломляющую поверхность в виде бикубического сплайна, рассчитанную с помощью специального интегрального выражения, учитывающего френелевские потери и размеры источника излучения [43]. Платформа киберфотоники предоставляет программные средства, выполняющие автоматизированный расчёт поверхности оптического элемента светодиода по требуемому распределению освещённости при заданных характеристиках и размерах излучающего элемента светодиода.

Равномерное освещение позволяет понизить вычислительную сложность алгоритмов этапа предварительной обработки или даже полностью устранить этот этап, сократив время обработки одного кадра видеопотока, и, следовательно, либо повысить рабочую частоту кадров потока видеоданных, либо использовать более интеллектуальные алгоритмы на последующих этапах обработки.

Важнейшей частью многих СТЗ является специальная структурированная подсветка, которая позволяет существенно расширить круг решаемых задач, а в некоторых случаях существенно упростить и снизить стоимость всей системы в целом [44].

В системах трёхмерного компьютерного зрения [45, 46] используются разнообразные системы структурированной подсветки со сложной, меняющейся во времени и пространстве структурой светового потока [47], для формирования которого необходимо использовать видеопроекторы с большой светосилой. Такие системы необходимы для решения проблемы идентификации линий подсветки на изображениях со сложной структурой сцены, на которой

не всегда возможно полностью проследить конкретную линию на всём её протяжении.

Структурированная подсветка в виде проекции последовательности пространственно-модулированных шаблонов на целевую сцену или объекты используется в системах однопиксельной визуализации, важным преимуществом которых является возможность использования единственного детектора без пространственного разрешения, что снимает характерные для матрицы детекторов технологические проблемы, связанные с ограничениями спектрального диапазона чувствительности кремния. В таких системах можно использовать, например, однофотонный детектор в ближней инфракрасной области [48] или фоторезистор с широким спектральным диапазоном [49].

В системах технического зрения в большинстве случаев не требуется полное и точное восстановление трёхмерной модели наблюдаемой сцены – вполне достаточно получать информацию о наличии объекта в определённой области контролируемого пространства, расстоянии до него и другое ограниченное число вполне конкретных данных. В каждом конкретном случае можно подобрать необходимое структурированное освещение, которое бы решало задачу надёжного и простого получения требуемой информации с точки зрения сложности алгоритмов обработки изображений. С развитием методов проектирования систем освещения с заданной диаграммой направленности светового потока [50–53] такие решения позволяют значительно расширить функциональность и улучшить надёжность и качество систем технического зрения при сохранении или в некоторых случаях уменьшении стоимости их создания и эксплуатации.

Уровень оптической системы формирования изображений: в качестве базового набора устройств регистрации видеоданных на платформе киберфотоники используются изображающие маломас-

согабаритные дифракционно-оптические системы и сверхкомпактные гиперспектрометры.

Оптические схемы на основе дифракционной оптики и новых подходов к реконструкции получаемых видеоданных демонстрируют качество изображений, достаточное для прикладных систем технического зрения.

Сверхкомпактный кольцевой планарный объектив, состоящий из гармонической линзы и двух зеркал на противоположных поверхностях пластины, соответствует объективу с фокусным расстоянием 100 мм и может быть использован в СТЗ, для которых критичны массогабаритные характеристики. Такая система формирования изображения может быть преобразована в плоский датчик с расстоянием 1 мм между первичным и вторичным зеркалами, рабочим сегментом нулевой длины, в котором оптическая часть и фотосенсор выглядят как две близко расположенные пластины. Поскольку матрица фотодатчиков обычно защищена плёнкой оксида кремния, защитную плёнку можно заменить на предлагаемую конструкцию объектива [41].

Другой проблемой СТЗ являются пространственные ограничения при размещении камеры, то есть расстояние от объекта до оптической системы таково, что обычный объектив просто не работает. Средства разработки платформы киберфотоники позволяют рассчитать фазовый оптический элемент, который обеспечивает увеличение глубины фокуса оптической системы. Такой специальный бинарный оптический элемент за счёт фазовой аподизации функции зрачка оптической системы обеспечивает увеличение глубины резкости оптической системы с выбранными спектральными каналами для определённого диапазона расстояний на оптической оси [54]. Его применение в изображающих системах требует дополнительной цифровой операции декодирования. Этот бинарный оптический фазовый элемент используется в качестве дополнительного элемента к линзе оптической системы для увеличения глубины рез-

кости в наклонной системе формирования изображений. Данная оптическая схема актуальна для задач классификационного обследования судов и морских сооружений и задач мониторинга технического состояния железнодорожного подвижного состава.

Сочетание специально рассчитанного оптического элемента фазовой аподизации и целевым образом обученной модели нейронной сети для декодирования позволяет устойчиво решать задачу классификации объектов без процедуры формирования изображений.

Уровень периферийных вычислений реализует информационную технологию необходимого этапа постобработки (реконструкции) видеоданных, полученных дифракционно-оптическими системами, использующими как одну дифракционную линзу, так и одновременно нескольких дифракционных элементов [42]. Для вычислительно сложных вариантов постобработки на данном уровне осуществляется только комплексирование данных и организация их передачи на верхний уровень обработки [55]. Аппаратной основой на данном уровне являются системы интеллектуальных видеокамер и/или встраиваемые вычислительные модули линейки NVIDIA Jetson и/или встраиваемые модули на базе Edge TPU.

Уровень специализированных систем представляет собой законченные решения на базе компьютеров со специализированными платами GPU и/или TPU.

Уровень потоковой обработки в облачной среде основан на распределённой архитектуре, объединяющей облачные модели обслуживания iPaaS и SaaS [56].

Платформа интеграции как услуга (iPaaS, *Integration Platform as a Service*) – это набор облачных сервисов, обеспечивающих разработку, выполнение и управление интеграционными потоками, соединяющими любые комбинации локальных и облачных процессов, сервисов, приложений и данных внутри одной или нескольких организаций. iPaaS можно интерпретировать как систему метапрограммирования программных потоков вычислений на основе сер-

висов, которая формирует программную сеть из независимых сервисов, связывая их между собой, согласовывая их интерфейсы специализированными коннекторами.

СaaS (*Containers-as-a-Service*) – это комплекс сервисов управления рабочими нагрузками на основе контейнеров. СaaS предлагает платформу для развертывания и управления кластерами приложений и контейнеров путём предоставления пользователям средств исполнения контейнеров, служб их оркестровки и базовых ресурсов.

Архитектура облачного уровня программной платформы видеосенсорики основана на динамическом формировании распределённой программной сети контейнеризованных параметризуемых задач типовых операций обработки видеоданных, которые взаимодействуют посредством межузловых и программных коммуникаций с адаптивной буферизацией данных. Для сокращения времени формирования/перестройки программной сети все задачи оформлены в виде контейнеров, предварительно загружены в оперативную память узлов распределённой вычислительной среды, имеют развитый механизм параметризации встроенных операций.

Основной инфраструктурой для развёртывания фреймворков распределённой потоковой обработки является облачная вычислительная среда. Наряду с этим, используются такие концепции, как мобильные пограничные вычисления и туманные вычисления, когда обработка выполняется на базовых станциях мобильных сетей или серверах, которые находятся на границе сетевой инфраструктуры, иногда даже называемых пограничным облаком. Пограничные вычисления становятся потенциальной вычислительной парадигмой, которую можно использовать для разделения рабочих нагрузок с облаком [57, 58].

3.3 Киберфотоника и живые системы

Современное здравоохранение связывает прогресс в лечении социально значимых заболеваний с развитием новых высокотехнологичных методов терапии, хирургии и ранней диагностики. Это формирует новые технические вызовы по созданию компактных и надёжных приборов, обеспечивающих биомедицинскую визуализацию высокого разрешения. Следует отметить, что стандартные методы визуализации (УЗИ, КТ, МРТ, ПЭТ) имеют физические ограничения по разрешению и требуют значительных финансовых ресурсов и инфраструктуры, что ограничивает доступ к этим методам населения и исключает их использование для скрининга и ранней диагностики. В отличие от этого стратегии оптической визуализации, обладающие потенциалом снижения стоимости, повышения портативности и оперативности, становятся инструментами для раннего выявления и диагностики патологии. Биомедицинская визуализация принципиально отличается от традиционной оптической рефракционной визуализации, основанной на визуализации градиентов оптической плотности биологических тканей. Эти отличия связаны с необходимостью контрастного выделения и визуализации патологически изменённых тканей, что требует привлечения принципиально новых методов их визуализации, основанных на изменениях оптических свойств тканей ввиду трансформации их химического состава в области патологии. Это прежде всего спектральные методы, такие как гиперспектральная визуализация (HSI), оптическая когерентная томография (ОСТ), методы флуоресцентного анализа (FLIP, FTIR и т.д.), рамановская спектроскопия (RS).

Известно, что ранняя диагностика позволяет добиться полного излечения многих заболеваний, признанных основными медико-социальными проблемами, приводящими к смертности и инвалидности. Наиболее социально значимыми заболеваниями, ассоциированными с патогенными изменениями тканей, атеросклерозом яв-

ляется ишемическая болезнь сердца, заболевания церебральных артерий, артериальная гипертензия, сахарный диабет, хронические болезни почек, онкологические заболевания. Наряду с химическими изменениями, каждая патология характеризуется структурными и морфологическими особенностями её развития и роста. Изучение процессов старения и механизмов развития заболеваний, связанных с возрастом, продемонстрировало накопление модифицированных белков, липидов в сосудистой стенке, тканях жизненно важных органов. Объединяющим патогенетическим фактором этих состояний являются изменения метаболизма (углеводного, жирового и белкового), которые имеют общую направленность, отражают воспалительные, дегенеративные процессы в жизненно важных органах – сердце, мозге, почках. Ранняя диагностика сопряжена с необходимостью извлечения значимой информации о происходящих в организме биохимических изменениях, обнаружении метаболитов, синтезируемых организмом, выявлении предельно малых патогенных очагов, размер которых может быть существенно меньше 1 мм. Таким образом, переход к ранней диагностике сопряжён с обработкой огромного объёма данных, что требует привлечения и использования методов машинного обучения и больших данных, а учитывая высокую вариабельность биохимических характеристик организма человека, методы диагностики и лечения должны быть персонализированы. Для решения таких задач требуется разработка и внедрение нового класса медицинской техники – киберфотонных приборов, которые объединяют возможность диагностики и визуализации на клеточном уровне с возможностями искусственного интеллекта по выявлению биомаркеров – суррогатных критериев, имеющих доказанное прогностическое значение, что позволит проводить стратификацию риска с тем, чтобы в группе пациентов с неблагоприятными параметрами осуществлять наиболее агрессивную стратегию, направленную на их нормализацию.

Одной из принципиальных особенностей современных трендов развития медицинской техники является объединение методов диагностики и лечения в единую технологию, включающую в себя и объективный контроль, и коррекцию лечения, основанных на оптической биопсии. Этот тренд в развитии современной медицинской техники привёл к необходимости комплексного решения проблемы – создания мультимодальных диагностических систем, объединяющих несколько оптических методов анализа. Мультимодальный подход обеспечивает уникальное сочетание структурной, морфологической, молекулярной и метаболической информации. Сложность интеграции различных методов компенсируется потенциальным повышением как чувствительности, так и специфичности диагностики патологии, скрининга, мониторинга лечения или хирургического вмешательства под визуальным контролем.

Исторический обзор оптических медицинских технологий

За последние 100 лет оптика и визуализация позволили врачу увидеть то, что раньше невозможно было обнаружить. Например, проточные лазерные цитометры обеспечивают детальную количественную оценку критических типов клеток крови, что является одним из основных инструментов диагностики и мониторинга лечения пациентов со СПИДом. Разработанные в 1980-х годах оптические пульсоксиметры, которые определяют оксигинацию крови на основе измерения дифференциального поглощения на двух длинах волн с помощью удобных, недорогих оптических зондов на основе светоизлучающих диодов (LED) и недорогих твердотельных детекторов, позволили существенно снизить осложнения при хирургических операциях за счёт включения их в системы мониторинга состояния пациента. Развитие и создание мультиспектральных пульсоксиметров позволило существенно поднять их точность и контролировать не только оксигинацию крови, но и фракции гемоглобина.

Эндоскопическая визуализация фактически стала стандартом лечения для скрининга рака толстой кишки и диагностики рака пищевода, используется в лапароскопической хирургии внутренних органов, ортопедической хирургии для восстановления при травмах крупных суставов, трансформировав многие операции в амбулаторные процедуры, исключив необходимость пребывания в больнице и значительно сократив расходы на здравоохранение.

В клинической лабораторной практике спектральные методы анализа являются одними из основных, позволяя определять огромное количество параметров биожидкостей с использованием химических биомаркеров и уникальных микроскопических свойств клеток и их структур. Причём, учитывая размеры клеток (2–20 мкм), в микроскопических исследованиях оптические методы являются безальтернативными, поскольку разрешение «диагностического инструмента», которое определяется длиной волны излучения, должно быть меньше, чем размеры исследуемых объектов.

Наиболее широко фотоника используется в офтальмологии, а оптический когерентный томограф был признан медицинским прибором XX века, позволившим совершить качественное изменение диагностики офтальмологических заболеваний за счёт трёхмерной *in vivo* визуализации тканей глазного дна с микронным разрешением. Одной из самых массовых лазерных операций стала коррекция близорукости за счёт изменения фокуса хрусталика глаза путём профилирования формы роговицы с использованием фемтосекундных УФ-лазеров.

Таким образом, медицинские фотонные приборы де-факто стали неотъемлемой ключевой частью многих медицинских систем и технологий, которые прочно вошли в практику современного здравоохранения.

Современные тренды в развитии медицинской фотоники

Стремительный прогресс в области новых технологий фотоники, разработка надёжных и экономичных малошумящих детекторов и полупроводниковых лазеров, волоконно-оптических устройств, методов нелинейной спектроскопии терагерцового, видимого и ИК-диапазонов, создание интегрированных устройств, регистрирующих оптические, электромагнитные, тепловые и структурные свойства биотканей, предопределил новый качественный скачок в биомедицинской диагностике и определяет современные тренды в развитии медицинских технологий. Важным трендом развития медицинских технологий является активное применение методов машинного обучения, больших данных, новых моделей нейронных сетей, позволяющих достоверно предсказывать и интерпретировать большие объёмы информации, получаемые с применением в том числе и фотонных технологий. Объединение данных технологий формирует новый класс устройств – киберфотонные медицинские системы, которые, наряду с перечисленными выше качествами, добавляют «прогностический анализ» и «учёт индивидуальных особенностей». Фактически это является принципиальным фактором, позволяющим перейти к персонализированной диагностике, персонализированному лечению, персонализированному контролю результатов лечения, персонализированной прогностической диагностике, направленной на выявление рисков развития заболевания. Последнее позволит разрабатывать превентивные стратегии профилактики заболеваний, причём с учётом персональных особенностей пациента. Если современное здравоохранение направлено на раннее выявление заболевания, позволяющее повысить эффективность лечения, улучшения за счёт этого качества жизни и снижения затрат на лечение, снижение времени нахождения в стационаре, то реализация принципов персонализированной превентивной диагностики может привести к исключению тяжёлых форм заболева-

ний, что эквивалентно принципиально новому уровню жизни населения и, как следствие, существенному снижению затрат государства на здравоохранение.

Для реализации стратегии превентивной и ранней диагностики требуется получение многофакторной информации, причём без привлечения дорогостоящих специализированных и сложных процедур, т.к. данные должны регистрироваться для практически здоровых людей, не имеющих явно выявляемых макропризнаков заболеваний. Причём объём информации должен быть достаточен для доказательного прогностического вывода, т.е. требуются большие объёмы данных, которые должны аккумулироваться либо в процессе ежегодного профилактического скрининга населения, либо за счёт ежедневного персонализированного сбора информации. И то, и другое требует наличия надёжных и одновременно дешёвых средств диагностики, причём реализующихся единовременно с применением различных оптических методов с использованием портативных интегрированных биосенсоров.

Рассмотрим некоторые наиболее интересные направления, в которых уже удалось достичь определённых успехов в создании киберфотонных систем.

Мультимодальная оптическая диагностика рака

Диагностика онкологических заболеваний является сложным процессом и требует проведения ряда диагностических исследований. Существует множество спектроскопических методологий и технологий оптической визуализации практически для всех видов рака. Тем не менее, в настоящее время золотым стандартом в диагностике рака является осмотр новообразования тренированным глазом врача с последующим гистологическим исследованием инвазивной эксцизионной биопсии образца опухолевой ткани, или дополнительно проводится иммунный, гистохимический или молекулярно-патологический анализ для более точного диагноза, клас-

сификации и прогноза в отношении раковой опухоли. В большинстве случаев патологоанатом работает с зафиксированными и внедрёнными образцами тканей или как минимум с замороженными срезами. По своей сути гистологический процесс занимает много времени. Очевидно, что для быстрого и достоверного получения *in vivo* диагностически значимой дополнительной информации требуются новые молекулярно-чувствительные оптические методы, включая линейную и нелинейную рамановскую спектроскопию и её комбинации с другими спектроскопическими/оптическими модальностями для визуализации, точного хирургического контроля границы патологии и интраоперационного гистопатологического исследования тканей [59].

Расширение роли спектрального анализа и оптической визуализации стало реальностью в глобальном лечении рака, включая скрининг, раннее выявление в месте оказания медицинской помощи, руководство биопсией и гистологию в режиме реального времени за счёт оптической биопсии. В сочетании с интеллектуальным онлайн-анализом данных и многомерной статистикой, мультимодальная спектральная диагностика и оптическая визуализация могут помочь в высокочувствительном выявлении и лечении предрака, сочетая особенности топологии тканей и их химического состава. Однако из-за довольно длительного времени получения спектроскопических данных тканей сканирование больших областей является довольно сложной задачей. Объединение детального спектрального исследования опухоли с методом оптической визуализации, обеспечивающим быстрый выбор области интереса (ROI), способствует синхронному последовательному многоуровневому уточнению диагноза как путём пространственной локализации, так и путём определения типа рака.

Гиперспектральная визуализация (HSI), оптическая когерентная томография (ОКТ) или флуоресцентная прижизненная визуализация (FLIM) предлагают большой потенциал для такой комбинации с

возможностью реализации волоконной оптики, подходящей для клинических условий [60–62]. Показано, что мультимодальный метод регистрации, предобработки и анализа спектральных данных оптического зондирования тканей кожи человека позволяет эффективно производить диагностику онкологических заболеваний, а использование свёрточных нейросетевых классификаторов позволяет достигать точности на уровне 0,96 даже на ранних стадиях заболевания.

Применение статистических, частотных и стохастических методов анализа текстуры дерматоскопических, гиперспектральных и ОКТ-изображений (Харалик, Тамура, Габор, Марковское случайное поле, комплексное направленное поле, фрактальные размерности) для дифференцировки и распознавания различных опухолей одновременно с высокобалльной идентификацией типа опухоли демонстрируется в реальных клинических условиях путём вычисления сравнительных персональных текстурных дескрипторов и реализации многотекстурного анализа [63–65]. Мультимодальный интеллектуальный анализ с применением нейронных сетей модифицированной архитектуры позволяет ещё более повысить точность диагностики (рисунок 3.6) за счёт комплексного взаимодополнения выделяемых пространственных признаков дерматоскопических изображений и спектральных характеристик рамановского рассеяния [66].

Уникальным подходом в лечении рака является фотодинамическая терапия (ФДТ) [67], где лазерное излучение является инструментом и диагностики, и целеуказания, и лечения. ФДТ – это минимально инвазивная процедура, при которой используется свет определённой длины волны и химически нетоксичный лекарственный фотосенсибилизатор (ФС) для получения активных форм кислорода, которые могут избирательно уничтожать раковые клетки ткани. Следует отметить, что ФДТ-системы являются мультиспектральными, т.к. один спектральный диапазон используется для возбуждения флуоресценции в фотосенсибилизаторе для его точной

локализации, а вторая длина волны – для запуска процесса выделения синглетного кислорода и фотохимической деградации раковых клеток. Эффективность ФДТ была продемонстрирована для определённых форм рака (рак легкого, желудочно-кишечного тракта), которые хорошо доступны для оптического излучения при применении эндоскопического оборудования, при пассивном или активном таргетировании используемых фотосенсибилизаторов.

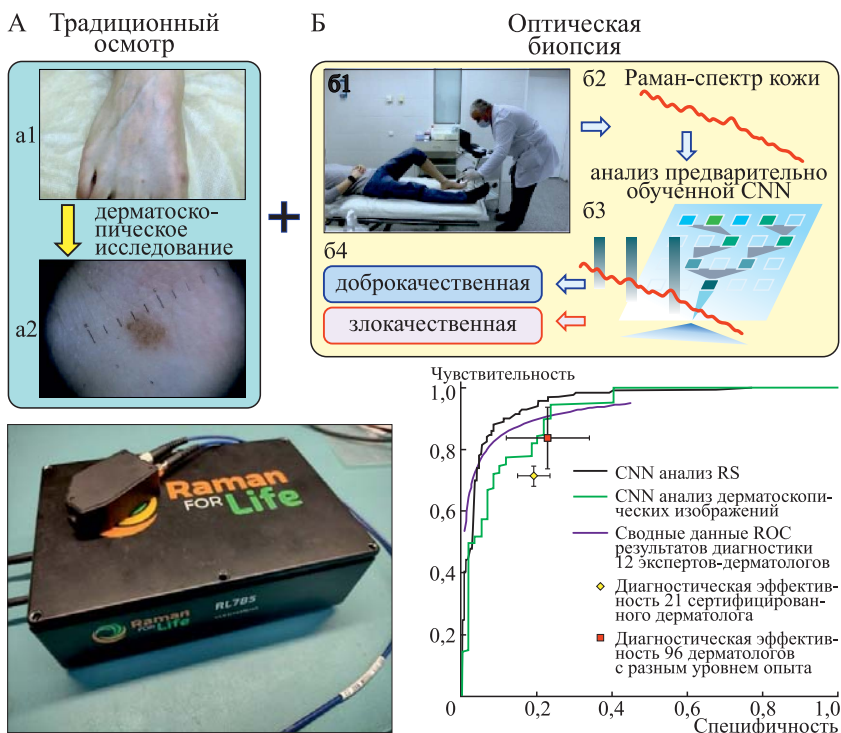


Рисунок 3.6 – Мультиимодальная ИИ HSI-RS система оптической биопсии

Спектральные изображающие и диагностические биомедицинские системы

Диффузная отражательная спектроскопия

ДОС основана на анализе изменений диффузного отражения тканей, который даёт информацию об их морфологическом и физиологическом состоянии в силу зависимости показателя преломления, коэффициентов поглощения и рассеяния различных биотканей от длины волны и поляризации [68]. Наиболее известным применением ДОС является оценка периферического кровотока и состояния насыщения кислорода, основанная на неинвазивном измерении изменений концентрации оксигенированного (сHbO₂) и дезоксигенированного (сHb) гемоглобина. Данный метод применяется как в носимых гаджетах, так и в более сложных медицинских устройствах. Наиболее эффективным его применением является функциональная оптическая диффузная томография (ОДТ) для нейровизуализации процессов в коре головного мозга [69]. Не менее перспективным применением ОДТ является оптическая маммография, позволяющая с высокой достоверностью и точностью локализации выявлять рак молочной железы без использования ионизирующего рентгеновского излучения [70].

Лазерная доплеровская флоуметрия

В настоящее время лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) является широко используемым методом оценки состояния микроциркуляторного кровотока *in vivo*. Лазерная доплерография измеряет общую местную микроциркуляторную перфузию крови и основана на доплеровском сдвиге частоты при рассеянии лазерного излучения на движущихся эритроцитах. Были проведены многочисленные исследования с использованием ЛДФ для оценки заболевания периферических артерий при сахарном диабете [71].

Лазерная спекл-контрастная визуализация

Лазерная спекл-контрастная визуализация является мощным методом динамического рассеяния света, позволяющим бесконтактно визуализировать потоки в реальном времени во всём поле путём анализа вариаций спекл-контраста [72] в результате интерференции рассеянного в биоткани излучения. Их корреляционный анализ позволяет определить с высоким пространственным и временным разрешением состояние кровотока в мозге и сетчатке.

Флуоресцентная диагностика и исследования процессов метаболизма

Накопление конечных продуктов гликирования (КПГ) и окислительный стресс являются одними из ключевых механизмов развития многих осложнений для таких заболеваний, как сахарный диабет, хроническая сердечная недостаточность, хроническая болезнь почек. Накапливаясь в организме, КПГ запускают процесс сшивки белков, в частности, в молекулах коллагена, миелина и гемоглобина. Гликированные белки обладают высоким квантовым коэффициентом флуоресценции при облучении ультрафиолетовым излучением [73], что позволяет использовать их автофлуоресценцию для определения уровня КПГ в коже, который отражает отдалённые метаболические нарушения и служит предиктором микрососудистых осложнений, нейропатии и заболеваний почек. Эффективность флуоресцентного анализа может быть существенно повышена комплексированием с методами рамановской спектроскопии и машинного обучения [74, 75].

Протеомное профилирование

Протеомный анализ позволяет провести глобальное изучение экспрессии белков и её регуляции, открывает качественно новые возможности для углублённого и детального изучения этиологии и патогенеза с использованием микрофлюидики, робототехники в сочетании с автоматическим сканированием лазером и выделением

флуоресцентно меченых антител, которые прикрепляются к специфическим белкам.

Терагерцовая диагностика

Терагерцовая спектроскопия в диапазоне частот от 0,1 до 10 ТГц очень чувствительна к содержанию воды в тканях, и поэтому она нашла применение в областях медицины, связанных с оценкой гидратации биотканей. Поскольку многие патологии проявляются в изменении гидратации, то терагерцовая спектроскопия обеспечивает очень высокий контраст патологий, который был подтверждён и протестирован при исследованиях и визуализации рака кожи, лёгких, молочной железы, оценке тяжести ожогов и заживлении ран [76]. Уникальные результаты получены в диагностике и высокоразрешающей визуализации глиом головного мозга [67].

Гиперспектральная визуализация

Естественным подходом к повышению диагностической ценности метода визуализации патологии является увеличение её контраста на фоне нормальных тканей. Учитывая, что химические изменения в патологически изменённых тканях приводят к спектральной пространственной неоднородности, то естественным развитием диагностических методов визуализации стало сначала создание мультиспектральных систем, в которых использовались касетные турели с узкополосными фильтрами. Затем данные системы естественно были заменены на гиперспектральные системы визуализации (HSI), которые формируют гиперспектральный куб с 1000 или более монохроматических изображений на отдельных длинах волн.

Фактически HSI – это гибридный метод, сочетающий в себе визуализацию и спектроскопию. Собирая спектральную информацию в каждом пикселе двумерной (2D) матрицы детекторов, HSI генерирует трёхмерный (3D) гиперкуб – набор пространственной и спектральной информации. Спектральная сигнатура каждого пикселя на изображениях позволяет HSI идентифицировать различные

патологические состояния. Таким образом, HSI обладает потенциалом для выявления тонких спектральных различий патологических состояний.

Современная медицинская гиперспектральная визуализация применяется во многих медицинских приложениях: визуализация онкологических патологий разных нозологий; сканирование структуры желчевыводящих путей; заболевания периферических артерий, включая атеросклеротическую окклюзию артериального кровообращения; микроциркуляция диабетической стопы; определение границы патологии в интраоперационной диагностике; выявление дегенерации хряща; наблюдения сетчатки для перекрёстного обнаружения болезни Альцгеймера и т.д.

Оптическое просветление тканей

Основным ограничением любых оптических методов диагностики является многократное рассеяние и быстрое затухание оптического излучения в биологических тканях, что сужает глубину визуализации и, как следствие, ограничивает область визуализации и диагностики. В этом случае на первый план выходит возможность снижения рассеяния в тканях и управление их оптическими характеристиками. Принципиальный вклад в развитие этого направления внесла школа В.В. Тучина [70, 78, 79], предложившая эффективные способы управления оптическими свойствами биотканей, в частности уменьшения рассеяния с использованием иммерсионных, компрессионных, фотодинамических и фототермических способов оптического просветления фиброзных и клеточных тканей. Применение данных технологий позволило увеличить глубину проникновения света в 4 раза для ОКТ, гиперспектральных устройств, в 2 раза для рамановской микроскопии и в 35 раз для конфокальной микроскопии.

Рамановская спектроскопия – инструмент дистанционного биохимического анализа

Одним из наиболее чувствительных методов диагностики является рамановская спектроскопия (RS), которая регистрирует суперпозицию интенсивностей различных мод колебаний активных молекул исследуемого образца на основании измерения рамановского сдвига частоты рассеянного излучения относительно частоты зондирующего лазера [80, 81] на величину частоты колебаний рассеивающей молекулы. Анализ закодированных информационно насыщенных спектров образца позволяет извлечь биологическую информацию об изменениях количественного и качественного состава биоткани [82, 83]. В настоящее время рамановская спектроскопия успешно используется для дифференциации раковых тканей молочной железы [84], предстательной железы [85], лёгких [86], кожи [61], шейки матки [87], колоректальной [88] и других онкологических патологий. Достигнут значительный прогресс в выявлении биомаркеров хронических заболеваний (почек, сердца, диабета) с использованием жидкостной биопсии крови и других биожидкостей [89]. В связи с пандемией большое внимание уделяется разработке рамановских сенсоров инфекционных заболеваний [90, 92]. Например, в работе [93] было продемонстрировано, что обнаружение аденовируса в клетке человека возможно уже через 3 часа после заражения.

Можно выделить несколько направлений развития рамановской биосенсорики: (а) использование математических методов хеометрики, машинного обучения, искусственного интеллекта [61, 91], (б) повышение чувствительности за счёт использования методов когерентного антистоксового комбинационного рассеяния (CARS), стимулированного рамановского рассеяния (SRS) [94], зондово-усиленной рамановской спектроскопии (TERS), поверхностной рамановской спектроскопии (SERS) [81, 89]. Например, последняя обеспечивает усиление рамановского сигнала на 4-5 порядков при

взаимодействии с поверхностью золотых или серебряных наночастиц. SERS-технология фактически стала сенсорной платформой ввиду её естественной интеграции с технологиями жидкостной микрофлюидики. Например, разработаны SERS-технологии диагностики COVID-19 [95, 96], основанные на выявлении IgM, IgG и антиген – наиболее надёжных естественных биомаркеров SARS-CoV-2. Известно успешное применение SERS-биосенсоров для обнаружения биохимических изменений при нейродегенеративных расстройствах – болезни Альцгеймера [97] и болезни Паркинсона [98]; хронической сердечной недостаточности [81] и заболеваниях почек [74]. Создание рамановских твиззеров [99] обеспечивает манипулирование клетками в лазерном пинцете с одновременным их детальным анализом, что существенно повышает эффективность процедур, используемых при искусственном оплодотворении. Разработка RS-OCT [100] позволило объединить высокоточную пространственную трёхмерную визуализацию с детальным химическим анализом.

3.4 Киберфотоника в офтальмологии

Фотоника, важная научная и техническая область, связанная с генерацией, контролем и обнаружением фотонов, играет ключевую роль в офтальмологии, особенно в улучшении диагностических возможностей. Фотоника в офтальмологии становится ключевым аспектом современной медицинской практики. Наблюдается стремительное развитие диагностических технологий, основанных на инновационных физических методах, которые позволяют проводить раннюю диагностику патологий с высокой эффективностью. Киберфотоника в офтальмологии представляет собой применение современных технологий фотоники, совмещённых с цифровыми инновациями, с целью улучшения ухода за глазами и развития новых методов диагностики и лечения глазных заболеваний.

Это направление приобретает всё большее значение по двум причинам. Во-первых, наблюдается стремительное развитие диагностических технологий, основанных на инновационных физических методах, таких как оптическая когерентная томография с адаптивной оптикой (АО-ОКТ) и временная полнопольная оптическая когерентная томография (TD-FF-ОСТ). Во-вторых, современная медицина стала одной из самых технологичных отраслей, сосредоточенных на разработке эффективных методов ранней диагностики различных патологий. За последние десятилетия медицинская сфера претерпела значительные изменения в техническом оснащении, причём компьютерный анализ изображений стал незаменимым инструментом медицинских диагностических систем, способствуя заметному улучшению точности диагностики.

Одним из основных применений фотоники в офтальмологии является оптическая когерентная томография (ОКТ). С помощью света можно получать трёхмерные изображения с микрометровым разрешением внутри оптических рассеивающих сред, таких как глаз [101, 102]. Технология особенно ценна своими возможностями неинвазивной визуализации, которые позволяют детально наблюдать структуру сетчатки, помогая в диагностике и мониторинге различных глазных заболеваний.

Применение фотоники в офтальмологии охватывает широкий спектр технологий и устройств, используемых для диагностики и лечения заболеваний глаз. Одним из примеров является использование адаптивной оптики (АО) для коррекции волновых аберраций в глазах, что позволяет получать изображения сетчатки на клеточном уровне.

Интересно, что интеграция адаптивной оптики с ОКТ, называемая АО-ОКТ, ещё больше повышает разрешение изображений сетчатки за счёт коррекции аберраций оптического волнового фронта, что позволяет получить ещё более детальное представление о тонких структурах глаза и механизмах глазных заболеваний [102].

Адаптивная оптика – ещё одно из применений фотоники, позволяет корректировать волновые aberrации и достигать высокого разрешения при визуализации сетчатки до уровня отдельных клеток [102–104]. Технологии, такие как оптическая когерентная томография и её разновидности, также используют принципы фотоники для получения изображений глазных тканей с высокой точностью [101, 105, 106]. В частности, временная полнополюсная оптическая когерентная томография обладает потенциалом для визуализации *in vivo* на клеточном уровне, несмотря на предыдущие ограничения, связанные с низкой скоростью и ёмкостью камер [107, 108]. Эта технология интегрирована в такие устройства, как адаптивно-оптическая фундус-камера (АО-FC), адаптивно-оптический сканирующий лазерный офтальмоскоп (АО-SLO) и адаптивно-оптическая оптическая когерентная томография (АО-ОСТ), которые используются для улучшения диагностики и исследования механизмов заболеваний глаз [106]. Лазерная и световая диагностика и терапия стали стандартом лечения многих заболеваний глаз, что невозможно представить без использования лазеров в офтальмологии [109, 110].

Фотоника также играет значительную роль в разработке медицинских устройств для диагностики и лечения заболеваний глаз. Оптические устройства в офтальмологии и оптометрии, основанные на принципах оптики, фотоники, метрологии и лазеров, демонстрируют важность фотонных технологий в этой области [107]. Проблемы неравенства в здравоохранении, влияющие на доступность офтальмологической помощи, подчёркивают необходимость интеграции фотонных технологий, таких как телеофтальмология, для улучшения доступа к уходу за глазами и улучшения результатов лечения пациентов [109]. Хотя фотоника широко используется в офтальмологии, основное внимание в литературе уделяется более широким приложениям фотоники, таким как интегрированные фо-

тонные устройства, квантовая оптика и биоинспирированные оптические системы [110–114].

Использование фотонных технологий позволяет улучшить качество и доступность офтальмологической помощи, особенно для уязвимых групп населения. Однако, несмотря на потенциал фотоники в офтальмологии, существуют расовые и социально-экономические диспаритеты в доступе к офтальмологической помощи, которые требуют дополнительного внимания и решения [109, 110]. В области фотоники наблюдается значительный прогресс в разработке интегрированных фотонных устройств, которые могут найти применение в офтальмологии, например, в создании высокопроизводительных фотонных чипов и устройств для управления светом [114, 115]. Также важна разработка биоинспирированных тьюнбельных оптических систем, которые могут быть адаптированы для использования в офтальмологических приложениях [111].

Интеграция цифровых технологий и искусственного интеллекта (AI) в офтальмологическую практику открывает новые возможности для диагностики и лечения, а также для телемедицины [101, 116]. Адаптивная оптика и развитие ОСТ, включая их интеграцию с AI и телемедициной, представляют собой важные направления, которые продолжают развиваться и улучшать офтальмологическую помощь [102–106, 117]. Технологии AI и машинного обучения (ML) всё чаще применяются к данным офтальмологической визуализации для выявления и диагностики различных глазных заболеваний [101, 118, 119]. Эти технологии показали перспективность в повышении точности и эффективности диагностики таких заболеваний, как диабетическая ретинопатия, глаукома и возрастная макулярная дегенерация [120]. Хотя приложения ИИ в офтальмологии быстро развиваются, многие из них всё ещё находятся на стадии исследований и пока не стали стандартной клинической практикой. Потенциал ИИ для выявления системных заболеваний, та-

ких как когнитивные нарушения, деменция и риск инсульта, по офтальмологическим изображениям подчёркивает далеко идущие последствия этих технологий за пределами офтальмологии [121]. Всё чаще применяются роботизированные системы, которые обеспечивают поддержку диагностики и лечения заболеваний.

Современные достижения в области ИИ предоставляют офтальмологам быстрые, точные и автоматизированные средства для диагностики и лечения окулярных состояний (рисунок 3.7), что способствует созданию современной и масштабируемой системы ухода за глазами [121, 122]. Интеграция цифровых технологий здоровья, включая телемедицину и ИИ-алгоритмы, привела к значительным изменениям в диагностике и лечении окулярных расстройств [101]. Несмотря на широкое применение ИИ в офтальмологии, некоторые области, такие как нейроофтальмология, только недавно начали извлекать выгоду из прогресса в этой области [121]. Внедрение ИИ в клиническую практику сопровождается вызовами, включая проблемы с интерпретацией результатов алгоритмов и принятием их врачами и пациентами [108].

Фотоника в офтальмологии представляет собой инновационную сферу, сосредоточенную на разработке передовых технологий и методов, которые революционизируют диагностику и лечение глазных заболеваний. Одним из перспективных направлений является создание технологий, способных с высокой точностью определять патологические и анатомические структуры глазного дна, что открывает путь к индивидуализированным лечебным подходам.

Одним из значимых достижений стала разработка технологии распознавания патологий глазного дна, позволяющей точно определять зоны, требующие лазерного воздействия. Это не только улучшает эффективность процедур лазерной коррекции, но и существенно повышает уровень персонализированного подхода к лечению глазных заболеваний, открывая новые перспективы в борьбе

с различными глазными заболеваниями и обеспечивая более точное и эффективное лечение [123].

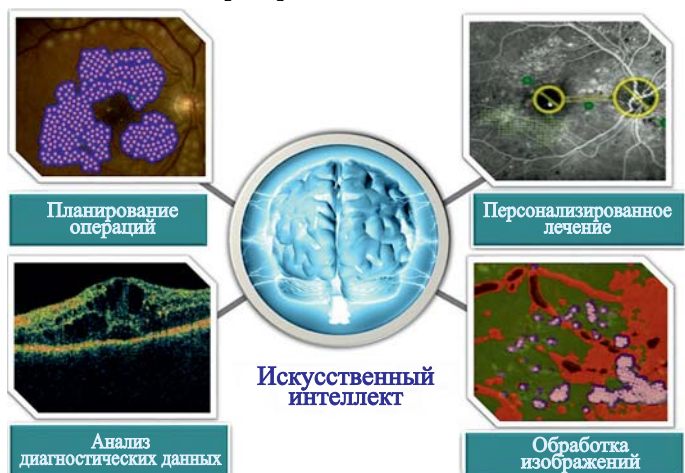


Рисунок 3.7 – Примеры применения ИИ для диагностики и лечения окулярных состояний и анализа данных

Одним из ключевых аспектов оптимизации процессов в офтальмологической фотонике являются методы и алгоритмы формирования плана оптимального расположения коагулянтов (рисунок 3.8) [124–128]. Эти методы, основанные на современных принципах фотоники, позволяют точно определить распределение энергии и интенсивности лазерного воздействия внутри глаза, что существенно повышает эффективность лечения.

Одной из глобальных медико-социальных проблем современного общества признаётся сахарный диабет [129]. На сегодняшний день в мире порядка 450 млн больных сахарным диабетом, а к 2035 году ожидается увеличение этого количества до 600 млн человек. Со стороны зрительной системы наиболее тяжёлым проявлением является диабетическая ретинопатия. Согласно исследованиям Wisconsin Epidemiological Study of Diabetic Retinopathy (WESDR), при длительном заболевании СД ретинопатия детектируется в 80–

100 % случаев, а в 30 % развивается диабетический макулярный отёк.

Развитие офтальмологии в контексте фотоники обеспечивает новые перспективы для лечения сахарного диабета. Исследования направлены на интеграцию методов обработки изображений, применение технологий машинного обучения и создание математических моделей для анализа биофизических процессов [130–132]. Эти разработки нацелены на диагностику и лечение диабетических осложнений.

В качестве успешного примера синергии оптических и кибернетических технологий можно привести современную роботизированную систему для лечения диабетической ретинопатии – лазерную установку NAVILAS от немецкой компании OD-OS [129], обеспечивающую автоматическое наведение лазера по плану коагуляции. Однако данная система на текущем этапе развития имеет множество недостатков, существенно снижающих эффективность её применения. В частности, план коагуляции формируется врачом вручную с помощью заданных паттернов, однако такой способ не учитывает анатомические особенности глазного дна, такие как сосуды, области зрительного диска и макулы. Данные факторы приводят к недостаточной эффективности лечения и чрезмерному воздействию на сетчатку глаза.

Как следствие, важным направлением стала разработка интеллектуальных систем, способных точно локализовать патологические и анатомические образования на глазном дне. Такие системы поддержки лазерной коагуляции глаза [125, 135] необходимы для создания оптимальных зон воздействия лазерного луча и равномерного распределения коагулятов при лечении диабетического макулярного отека (рисунок 3.8). Системы базируются на методах выделения области макулярного отёка сосудов, экссудатов и оптического диска [130, 136] с использованием графовых подходов сегментации [138], глубоких нейронных сетей [139, 140] и эффектив-

ных текстурных признаков [141]. Системы поддержки лазерной коагуляции глаза основаны также на алгоритмах равномерного распределения потенциальных точек для лазерной коагуляции, что способствует повышению эффективности лечения [126, 131] и формированию индивидуального оптимального плана распределения коагулятов в области макулярного отёка, и включают подходы к персонализации локализации лазерных воздействий [133–135] (рисунок 3.9). По оценкам врачей, такой подход позволит в несколько раз снизить вероятность лазерных ожогов за границами отёка, сократить время подготовки пациента к операции и снизить риск послеоперационных осложнений.



Рисунок 3.8 – Интеллектуальная система поддержки принятия решений по персонализации лазерного лечения сетчатки

Современные методы определения зон воздействия лазерного луча на изображениях глазного дна основаны на применении глубоких нейронных сетей и машинного обучения, что значительно повышает точность выделения патологических и анатомических

структур. Использование высокоточных алгоритмов машинного обучения позволяет эффективно определять необходимые зоны лечебного воздействия, обеспечивая точность и надёжность результатов [142–147].

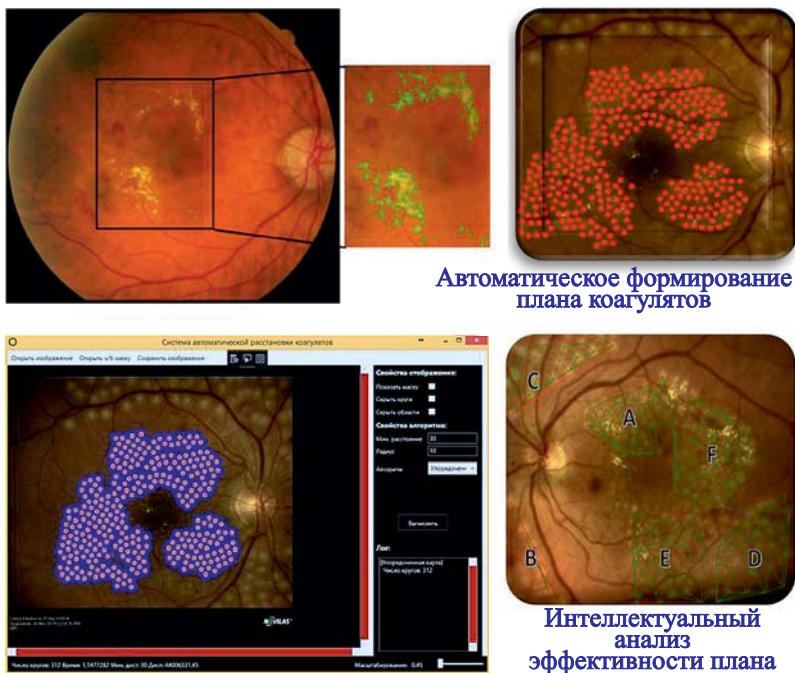


Рисунок 3.9 – Система автоматического формирования предварительного плана коагуляции «DR Treatment System»

Одной из главных задач интеллектуальных систем в офтальмологии является отбор информативных признаков для автоматического выделения анатомических и патологических элементов на изображениях глазного дна [123, 148–154] (рисунок 3.9). Точность и эффективность диагностики зависят от правильного выбора этих информативных признаков для автоматического выделения анатомических и патологических элементов на изображениях глазного

дна, что позволяет системам машинного обучения и глубоким нейронным сетям более точно идентифицировать структурные и патологические изменения.

Для решения этой задачи предложены высокопроизводительные алгоритмы [155–158], способные обрабатывать и анализировать большие объёмы данных [159–162]. Эти данные включают большое количество изображений в обучающей выборке, каждое из которых имеет высокое разрешение. Кроме того, интенсивный поток изображений поступает на вход автоматизированной системы диагностики и лечения во время её эксплуатации. Также необходимо учитывать многочисленные числовые характеристики, вычисляемые по этим изображениям.

Современные алгоритмы справляются с этими вызовами, обеспечивая высокую точность и надёжность автоматического анализа изображений глазного дна. Предложен метод оценки безопасных параметров лазерного воздействия для лечения диабетической ретинопатии, включающий моделирование теплового процесса при применении нескольких точечных лазерных импульсов [163, 164]. В отличие от традиционных подходов, этот метод позволяет без хирургической процедуры лазерной коагуляции определять безопасные параметры воздействия, используя снимки, полученные с помощью оптической когерентной томографии (ОКТ) [125, 165–167]. Это новшество позволяет точно прогнозировать температурные изменения в слоях сетчатки и определять параметры, которые не приводят к превышению критических температурных значений, обеспечивая необходимый терапевтический эффект и минимизируя риски повреждения тканей [132, 168]. Метод может эффективно использоваться для оптимизации лечебных стратегий в офтальмологии, способствуя улучшению результатов и повышению безопасности процедур.

3.5 Киберфотоника в системах специального назначения

Бурное развитие технологий БПЛА и появление сравнительно недорогих и массовых ракет, создающее возможность «перегрузки» традиционных (кинетических) систем ПВО и ПРО остро ставят вопрос о перспективе перехода к лазерным системам ПВО и ПРО (в том числе тактическим).

У разработки лазерных систем ПРО достаточно длинная история. Первые прототипы таких систем появились в СССР и США в разгар холодной войны после разработки лазеров в 50-60-е годы XX века. Потенциал использования лазеров в военных целях интенсивно исследовался военными США со времён проекта «Звёздные войны» в 1984–1992 годах [169]. Однако широкого распространения лазерные системы в XX веке не получили. Это было связано с принципиальными ограничениями:

- КПД существовавших в то время мощных лазеров (в основном газовых) был достаточно мал;
- расходимость лазерного пучка в свободном пространстве приводит к уменьшению плотности мощности с расстоянием;
- поглощение лазерного излучения атмосферными газами приводит к уменьшению мощности пучка, а присутствующие в атмосфере неоднородности приводят к разрушению пространственной структуры пучка и снижению его дифракционного качества;
- для прикрытия разных направлений требуется несколько дорогостоящих лазерных источников.

Последние достижения в разработке твердотельных лазеров [170, 171], такие как волоконные лазеры и лазеры на тонких дисках, предлагают высокую эффективность и высокое дифракционное качество пучка, к тому же техники некогерентного (спектрального) и когерентного сложения пучков [171] позволяют объединять

несколько пучков в один. Появление специальных силовых маломодовых и одномодовых оптоволокон [171, 172] (в частности LMA волокон) ближнего ИК-диапазона позволило сократить расстояние, проходимое лазерным пучком от источника излучения к цели в свободном пространстве и минимизировать потери на расходимость и поглощение, а также создавать распределённые системы лазерной ПВО. Одномодовый или маломодовый характер распространения пучка в LMA-волокне обеспечивает высокое дифракционное качество выходного пучка [172, 173]. Применение иттербиевых LMA(*large mode area*)-волокон, то есть волокон, обладающих одномодовым или маломодовым распространением волноводового излучения при относительно большом диаметре сердечника, позволяет транспортировать пучки с достаточно большой мощностью (до 10 кВт и более) при том, что плотность мощности в центре сердечника будет относительно невысока и волокно не подвергается разрушению. В системе, описанной в [171], использовались одномодовые волоконные лазеры с мощностью порядка 10 кВт производства компании IPG. Когерентное сложение пучков в [171] от различных волокон позволяло получать пучок общей мощности 40–80 кВт.

Описание технологии синтеза, основанной на модифицированном методе химического осаждения из газовой фазы (CVD), а также результаты исследования силовых иттербиевых волокон с малой числовой апертурой приведены, например, в [173].

В работе [172] приведены результаты исследования зависимости поперечно-модового состава силовых LMA-волокон (длина волны $\lambda = 1040$ нм) от микроизгибов с помощью дифракционных оптических элементов, согласованных с модовым составом волноводного излучения. Контроль поперечно-модового состава LMA-волокон критичен, в частности, из-за высоких требований к дифракционному качеству выходного пучка и потерям. Подход [172] может быть также использован для определения момента теплового разрушения сердечника волокна по изменению модового состава

ва. Стоит отметить, что подход к измерению поперечно-модового состава волноводов, использованный в [172] для контроля поперечно-модового состава LMA-волокон, ранее был разработан и использовался для контроля поперечно-модового состава маломощных лазеров видимого диапазона [174].

Для когерентного сложения выходных пучков отдельных волокон в [171] рассмотрено применение оптики телескопа Кассегрена с отдельными зеркалами для каждого волноводного пучка. В работе [171] описано также применение адаптивной оптики для компенсации помех, связанных с атмосферной турбулентностью. Для когерентного сложения отдельных пучков используются также прецизионные дифракционные решётки, изготовленные с помощью высокоразрешающей литографии. Методы расчёта многопорядковых дифракционных решёток с заданным распределением энергии между порядками приведены в [174]. Другим подходом объединения отдельных пучков является фокусировка отдельных пучков с помощью элементов адаптивной оптики на поверхности цели. ВМС США объединяют 6 промышленных иттербиевых волоконных лазеров с выходной мощностью 5,5 кВт для получения выходной мощности лазера 33 кВт в своей системе лазерного оружия (LaWS) [175]. LaWS был установлен на авианосец USS Ponce в 2014 году и успешно продемонстрирован в декабре 2014 года. Сообщалось о разработке более мощной версии мощностью до 100 кВт. Ещё одним успешным проектом HEL была система точечной защиты от дронов и противоракетной обороны компании Rheinmetall, продемонстрированная в 2013 году [171]. Была продемонстрирована система 4-ствольной лазерной пушки Гатлинга на последовательной комбинации иттербиевых волоконных лазеров мощностью 5,4 кВт. Ожидалось, что предложенный концепт должен поступить на вооружение примерно в 2020 году.

Поскольку военные лазеры работают на расстояниях более 2 км, успешные проекты зависят от разработки эффективных ит-

тербиевых волоконных лазеров [171] и стержневых лазеров Nd-YAG. Понятно, что это всего лишь вопрос времени, когда на поверхности дронов и ракет будут наноситься функциональные покрытия, отражающие излучение в рабочем диапазоне военных лазеров, и тогда требования к исходной мощности лазера будут, видимо, изменены на требования к высокой энергии импульса, превышающей порог лазерного повреждения отражающего покрытия дрона. Чтобы удовлетворить этому новому требованию, очевидно, будет необходим переход от режима непрерывной работы к импульсному режиму. Интересный демонстратор был построен компанией Thales Optronique с использованием 19 волоконных лазеров в фемтосекундном режиме [176].

К другим проблемам развития лазерных военных систем можно отнести образование плазмы на пути лазерного луча, что может вызвать случайное рассеяние лазерного луча, как при обработке материалов. Безопасность глаз персонала также, вероятно, в этом случае станет проблемой.

Отметим, что развитая объектовая система ПРО или антидроновая система должны в полной мере удовлетворять определению киберфотонной системы, приведённому ранее. Такая система должна обладать возможностями автоматического поиска, идентификации целей и принятия решения на базе ИИ. Должно быть обеспечено автоматическое управление адаптивной оптикой с обратной связью, фокусирующее лазерное излучение на цели. Источник мощного излучения можно рассматривать в качестве актуатора.

В рамках военного применения фотоники особенно бурное развитие получили системы сенсоров для снятия маскировки. Как уже отмечалось ранее, мульти- и гиперспектральные системы спутникового и авиационного базирования позволяют за счёт отличия спектральных характеристик замаскированного предмета и окружающего фона сформировать синтезированное изображение, на котором замаскированный объект, наоборот, выделяется на окру-

жающем фоне [177]. В [178] в течение нескольких времен года был проведён масштабный полевой эксперимент. Различные маскировочные материалы и конкретные военные цели, представляющие интерес, были размещены в реалистичной природной среде с растительным покровом и различными режимами освещённости (рисунок 3.10).

В ходе нескольких экспериментов были проанализированы такие аспекты, как изменение положения солнца, влажность и перемещение целей. В [179] подробно рассматриваются методы поиска целей, замаскированных маскировочными сетями. В [180] подробно описаны способы определения мест установки мин, наибольший раздел посвящён мульти- и гиперспектральным системам.

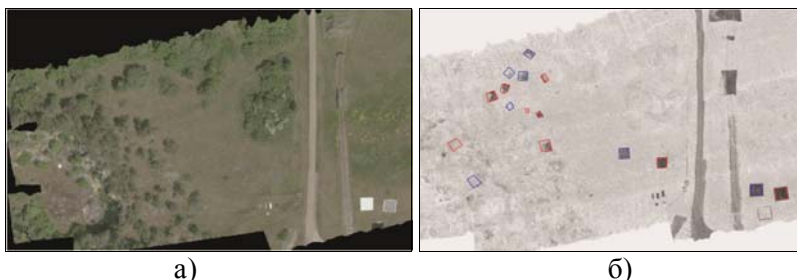


Рисунок 3.10 – Цветное изображение подстилающей поверхности (а), результат демаскировки маскировочных сетей путём обработки гиперспектрального изображения (б)

С помощью гиперспектральных изображений можно снимать и естественную маскировку, например, обнаруживать объекты под слоем воды. На рисунке 3.11 показано выделение углублённых участков на дне реки, где проходила добыча песка [181].

Спектральная информация из нескольких диапазонов, включая коротковолновый ИК и длинноволновый ИК, даёт возможность обнаруживать сложные цели на субпиксельном уровне, анализировать сцену без предварительной информации о материалах, с которыми предстоит столкнуться, различать скрытые объекты и

камуфляж, идентифицировать химические вещества в шлейфах, пометить потревоженную землю поверх захороненных объектов и выполнять классификацию изображений с существенно повышенной точностью [182].

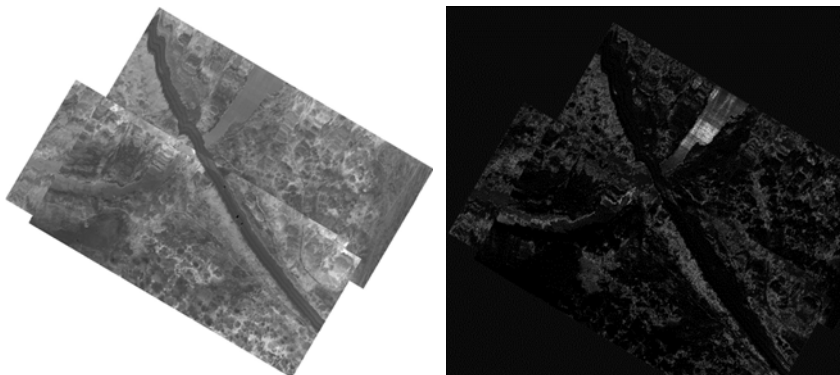


Рисунок 3.11 – Пример обнаружения углублений на дне реки, выделено светлым

3.6 Киберфотоника в идентификации динамических объектов

Одной из важных составляющих обеспечения высокоточного наблюдения и управления динамическими объектами в системах реального времени является восстановление зашумлённых данных. Наиболее эффективные известные подходы – это фильтры, минимизирующие среднеквадратичную ошибку, и калмановская фильтрация [183, 184]. Фильтр Калмана используется для обработки изображений с начала 1970-х годов [185]. Например, в работе [186] он использовался для оценки позы в реальном времени, в [187] рассматривалась задача оценивания динамики объектов с помощью системы стереовидеокамеры. В работе [188] предложена модификация фильтра Калмана для повышения качества трекинга, в част-

ности, для уменьшения количества срывов сопровождения объектов. В [189] решалась задача попиксельной калмановской фильтрации изображений в реальном времени с представлением отсчётов изображения моделью авторегрессии первого порядка. В работе [190] описана технология высокоточного определения координат объектов звёздного неба по текущим изображениям, регистрируемым в заданном направлении. Показано, что эта технология обеспечивает достаточно высокую точность, однако её реализация требует значительных вычислительных ресурсов.

В настоящей работе предлагается новый метод оценки параметров движения динамического объекта с использованием векторной модели изображений. Полагаем, что геометрический объект, изображение которого мы наблюдаем, состоит из примитивов: вершин, рёбер и граней. Здесь мы ограничимся рассмотрением вершин. Несмотря на кажущуюся простоту, предлагаемая модель позволяет адекватно описать изображения широкого класса техногенных объектов. На рисунке 3.12 приведены примеры некоторых простейших изображений этого класса.

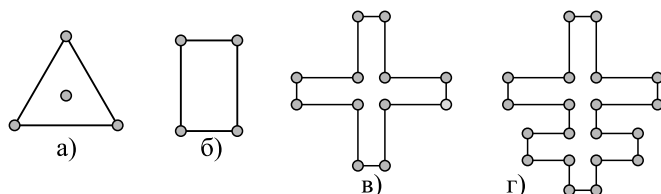


Рисунок 3.12 – Примеры векторных примитивов: три точки и центр (а), четыре точки (б), 12 точек (в), 20 точек (г)

Здесь для простоты рассмотрим модель изображения в виде четырёх точек (вершин). Обобщение решения на N точек может потребоваться для решения задач идентификации и/или управления динамическим объектом, и в этом параграфе не рассматривается.

В данном случае мы рассматриваем случай, когда наблюдаемый динамический объект описывается линейными дифференци-

альными уравнениями движения центра масс вдоль оптической оси камеры и углового движения относительно плоскости изображения. Текущие оценки углового положения и расстояния до объекта вдоль оптической оси вычисляются по вершинам наблюдаемого векторного изображения. Определение координат вершин является самостоятельной задачей, которая успешно решается с использованием широко известных методов обработки изображений. Заметим также, что, поскольку технология построена на использовании ограниченного числа (в настоящей задаче четырёх) точек изображения, это открывает возможность реализации калмановской фильтрации в реальном времени как в дискретном, так и в непрерывном варианте.

Связь параметров движения с точками на изображении

Авторы развивают метод оценивания параметров движения динамического объекта, который представляется в виде ограниченного числа точек на плоскости или сечении объекта плоскостью. Предполагается, что наблюдаемая плоскость изображения объекта удерживается в центре кадра, так что допустимо рассматривать лишь проекцию общего движения на оси системы координат, связанной с оптической осью камеры. В частности, полагаем, что движение динамического объекта описывается совокупностью уравнений поступательного движения центра масс вдоль оптической оси и уравнений углового движения вокруг центра масс. Необходимо прежде всего установить связь координат точек, заданных на объекте, с координатами этих точек на изображении в плоскости наблюдения.

Введём в рассмотрение следующие системы координат. Система координат камеры (используется модель камеры обскуры) – $OXYZ$. Начало системы координат – в точке схода лучей, а плоскость изображения $хоу$ перпендикулярна оптической оси на фокусном расстоянии f от начала системы координат $OXYZ$. Прямоуголь-

ная система координат uov , связанная с плоскостью P_0 объекта, начало которой является точкой пересечения этой плоскости с оптической осью камеры.

На плоскости P_0 зададим объект в виде четырех точек по осям u, v , как показано на рисунке 3.13а: точки 1, 3 на оси ov и точки 2, 4 на оси ou . Сначала рассмотрим решение задачи в предположении, что система координат $OXYZ$ камеры ориентирована таким образом, что ось ou , заданная точками 2, 4, параллельна оси ox системы координат xoy , т.е. поворот плоскости объекта P_0 совершается в плоскости OYZ системы координат камеры. В системе координат камеры $OXYZ$ введём вспомогательную плоскость P_1 , параллельную плоскости P_0 объекта (на рисунке 3.13в показана проекция на плоскость OYZ). В силу сделанных выше предположений точки y_d и y_s на плоскости P_1 являются проекциями точек y_{od}, y_{os} плоскости P_0 объекта. На рисунке 3.13а эти точки обозначены цифрами 1 и 3 соответственно.

На рисунке 3.13в видно, что точки y_d и y_s на плоскости P_1 являются также соответственными для точек y_1, y_3 на изображении, а также являются точками пересечения с линиями $L1$ и $L2$ соответственно.

Опуская математические выкладки, запишем:

$$\alpha = \arcsin \left[\frac{f(y_3 - y_1)}{R(y_3 + y_1)} \right]. \quad (3.1)$$

Таким образом, мы получили соотношение, позволяющее по координатам точек 1 и 3 на изображении вычислить угол между объектом и изображением в плоскости YOZ системы координат камеры.

Координаты точек y_1, y_3 на изображении могут также использоваться для вычисления текущего расстояния от центра объекта до изображения. В частности, из подобия треугольников на рисун-

ке 3.13в следует, что расстояние z от начала системы координат камеры до центра объекта можно определить так

$$z = 2Rf(y_1 + y_3)^{-1}. \quad (3.2)$$

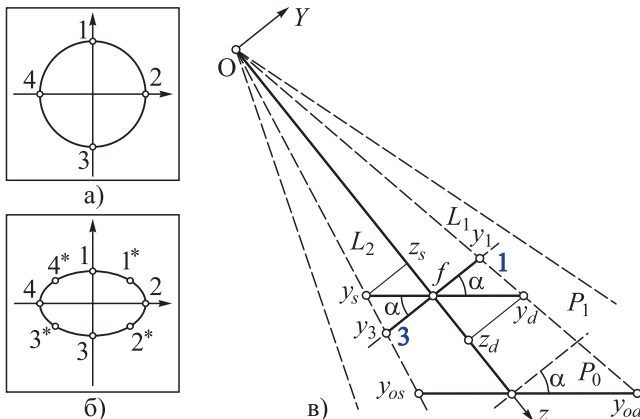


Рисунок 3.13 – Схематичное представление точечных изображений: фронтального (а); повернутого (б); в виде проекции на плоскость YOZ (в)

Построение фильтра Калмана–Бьюси. Пусть динамика объекта описывается системой дифференциальных уравнений углового движения в плоскости YOZ и движения центра масс вдоль оси (OZ):

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} &= a_\alpha \dot{\alpha} + q_\alpha, \\ \ddot{z} &= a_z \dot{z} + q_z, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где α – угол между наблюдаемой плоскостью объекта и плоскостью изображения, z – расстояние от начала системы координат камеры до центра объекта вдоль оптической оси, а a_α , q_α , a_z , q_z – (по предположению известные) параметры объекта. Полагаем также, что параметры движения объекта α и z доступны для «измерения» пу-

тём их вычисления по соотношениям (3.1), (3.2) с использованием координат y_1, y_3 на изображении.

В работе [191] получено уравнение фильтра Калмана для канала углового движения и канала движения центра масс.

Пример. Рассмотрим пример построения калмановских оценок параметров углового движения динамического объекта, описываемого уравнениями. Рассмотрим простой случай движения объекта в плоскости OYZ системы координат камеры, т.е. в данном примере использование точек 2 и 4 для определения направления оси поворота не понадобится. Будем моделировать собственное движение объекта для двух вариантов начального отклонения угла: $\alpha_0 = \pi/6$ и $\alpha_0 = \pi/3$ (30° и 60°).

Легко проверить, что система с указанными параметрами управляема и наблюдаема.

$$\begin{aligned} 2p_{12} - p_{11}^2 \sigma_{v_1}^{-2} &= 0, & p_{22} - p_{12} - p_{11} p_{12} \sigma_{v_1}^{-2} &= 0, \\ 2p_{22} + p_{12}^2 \sigma_{v_1}^{-2} &= 0. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Текущие оценки вектора состояний вычислялись с шагом 0,05 с на интервале 2,5 с. При этом использовался простейший способ замены производных разностями первого порядка. В таблице 3.3 приведены значения среднеквадратических ошибок оценивания для различных значений отношения сигнал/шум в диапазоне от 20 до 30 дБ. Как и следовало ожидать, независимо от начального значения угла α_0 , ошибки оценивания снижаются с увеличением отношения сигнал/шум.

Таблица 3.3 – Среднеквадратические ошибки оценивания угла

Начальный угол α_0	Отношение сигнал/шум (SNR)					
	20	22	24	26	28	30
$\alpha_0 = \pi/6$	0,067	0,056	0,051	0,047	0,028	0,022
$\alpha_0 = \pi/3$	0,034	0,028	0,021	0,018	0,015	0,011

На рисунке 3.14 в качестве иллюстрации приведены типичные графики процессов, полученных в ходе моделирования для $\alpha_0 = \pi/3$ при значениях $SNR = 30,0$ (рисунок 3.14а) и $SNR = 20,0$ (рисунок 3.14б).

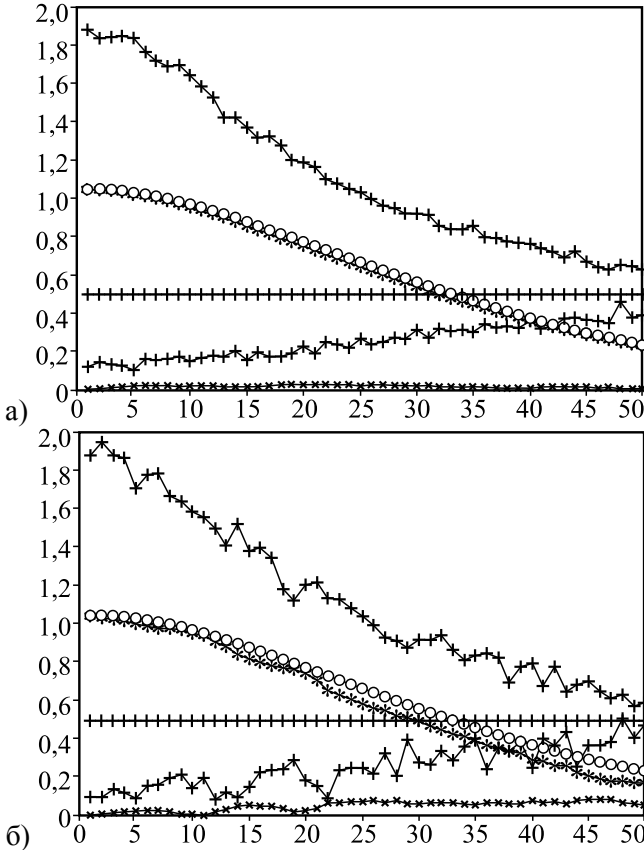


Рисунок 3.14 – Графики изменения угла (о), оценок угла (*), координат y_1, y_3 (+) и ошибок оценивания (\times):
(а) $SNR = 30,0$, (б) $SNR = 20,0$

Здесь маркером (+) отмечены графики изменения зашумлённых координат y_1, y_3 . В частности, верхний график изображает измене-

ние координаты y_1 , а нижний – координаты y_3 , горизонтальная линия на уровне 0,5, также отмеченная маркером (+), соответствует случаю фронтального изображения, когда эти координаты совпадают. Маркером (o) отмечен график изменения текущего угла, полученный путём моделирования динамики объекта по исходным дифференциальным уравнениям, а маркером (*) – калмановская оценка этого процесса. Маркером (x) отмечен график изменения ошибок оценивания. Видно, что точность оценок сохраняется при заметном увеличении интенсивности помех.

Рассмотрим возможную аппаратную реализацию фильтра Калмана–Бьюси. Следуя [192], положим, что состояние $x(t)$ некоторой стохастической системы с непрерывным временем и процесс наблюдения $y(\tau)$ при $t_0 \leq \tau \leq t$ описываются соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + v(t), \\ y(t) &= C(t)x(t) + w(t), \end{aligned} \quad (3.5)$$

с условием, что математическое ожидание $x(t_0)$ равно нулю, а начальное положение системы, входные возмущения v и ошибки измерений w взаимно не коррелированы. Тогда, согласно [192], линейная несмещённая оценка (задающая фильтр Калмана–Бьюси) с минимальной среднеквадратической ошибкой описывается уравнением:

$$\frac{d}{dt} \hat{x}(t) = A(t)\hat{x}(t) + K(t)(y(t) - C(t)\hat{x}(t)) \text{ при } \hat{x}(t_0) = 0, \quad (3.6)$$

где $\hat{x}(t)$ – оптимальная оценка состояния системы, $K(t)$ – матрица усиления.

На рисунке 3.15 фильтр Калмана–Бьюси [192] изображён в нижней части.

В вычислительной практике решение уравнения (3.6) свяжем с методом Эйлера. Тогда вычислительный процесс фильтрации можно задать соотношением:

$$\hat{x}(t_{i+1}) = \hat{x}(t_i) + [A(t_i)\hat{x}(t_i) + K(t_i)(y(t_i) - C(t_i)\hat{x}(t_i))]h_i, \quad (3.7)$$

где h_i – шаг дискретизации по времени, а t_i – отсчёт времени при такой дискретизации.

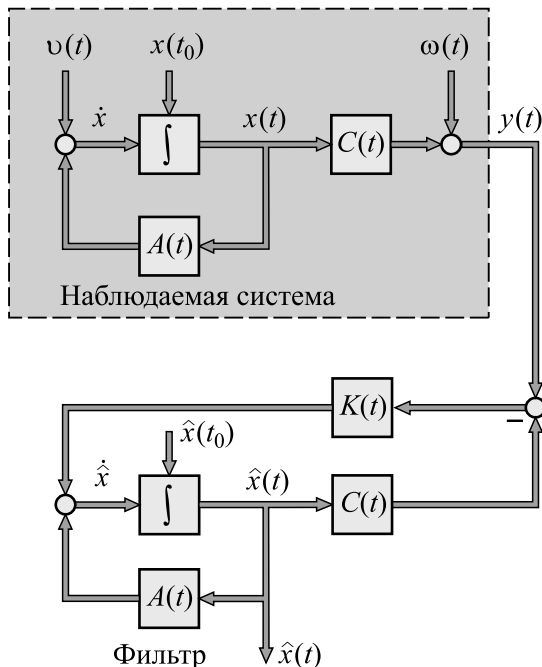


Рисунок 3.15 – Наблюдаемая система с непрерывным временем и фильтр Калмана–Бьюси [192]

В случае, если входные возмущения и ошибка измерения могут считаться стационарными процессами, упрощая, считаем, что A , K и C в (3.7) – константы. Тогда, анализируя рисунок 3.15 и (3.7), можно прийти к выводу, что для аппаратной реализации фильтра Калмана необходимо выполнить следующие операции над сигналом: реализацию линии задержки, умножение на константу, смену знака, сложение. В случае оптического сигнала такое устройство можно реализовать как в дискретном, так и в интегральном исполнении, используя в качестве линии задержки оптический волновод

необходимой длины, в качестве устройства, реализующего смену знака, – оптический волновод с длиной, обеспечивающей смену фазы на π , оптические сумматоры [193] и оптические умножители [194]. Дальнейшее развитие фотонной компонентной базы позволит осуществлять более сложные схемы фильтрации сигнала.

3.7 Мобильные киберфизические системы

Развитие современных технологий в настоящее время неотрывно связано с киберфизическими системами (КФС). Одним из таких перспективных направлений является создание и эксплуатация мобильных киберфизических систем (МКФС). Мобильные киберфизические системы, у физической части которых есть собственная мобильность, являются важной подкатегорией киберфизических систем. Примеры мобильных физических систем включают мобильную робототехнику, беспилотные авиационные системы, группировки космических аппаратов и т.п. Смартфоны увеличили интерес к области мобильных киберфизических систем. Платформы для смартфонов позволяют строить почти идеальные мобильные киберфизические системы. МКФС представляют собой сложные системы, объединяющие механическую (мехатронную), энергетическую (электрическую, гидравлическую, пневматическую, механическую или их комбинаций) и программную (в самом широком смысле) составляющие. Совершенствование КФС идёт по всем перечисленным составляющим как в части использования новых технологий и материалов, так и в части взаимодействия составных частей КФС и повышения интеллектуализации поведения КФС [195].

КФС имеют различную среду функционирования, структуру, степень автономности, сенсорное обеспечение и интерфейсы, коммуникационную составляющую, вычислительные возможности и другие характеристики. Отметим, что использование фотоники в КФС позволяет решить ряд задач по повышению энергетической

эффективности, быстродействия, а также расширения спектра получаемых данных с сенсоров.

3.7.1 Классы мобильных киберфизических систем по степени автономности

Исторически понятие киберфизических систем тесно сочетается с робототехническими системами, являются их расширением. Системы указанного класса в мобильном исполнении развивались от дистанционно-управляемых машин до полностью автономных, которые функционируют в недетерминированной среде. Широта МКФС как класса систем может быть задана критерием автономности.

Дистанционно-управляемые машины предназначены для выполнения действий с использованием средств передачи команд управления через среду на различных физических принципах от человека к МКФС и его исполнительным органам. Как правило, человек наблюдает за действиями МКФС (как непосредственно внешним наблюдателем, так и с использованием систем технического зрения) и ставит задачи различной степени детализации – от команд на конкретные двигатели и схваты, так и укрупнённо – взять предмет или переместиться на определённое расстояние.

Повышение автономности МКФС проводится в направлении постановки более абстрактных и крупных задач, например, как перемещение в определённую координату, обзор окружающей среды и других. Такие задачи, как правило, состоят из последовательности элементарных действий, которые могут быть однозначно интерпретированы и формализованы. Следует отметить, что при возникновении нештатных ситуаций МКФС переводится в режим останова и ожидает принятия соответствующих решений со стороны человека-оператора. Перспективные работы ведутся по созданию роботов-аватаров, в которых конструкция роботов представляется человекоподобным механизмом [196]. При этом оператор надевает

специальное копирующее устройство, которое передаёт информацию с одной стороны команды МКФС и, с другой стороны, даёт оператору обратную связь о местоположении органов в пространстве.

Увеличение количества сенсоров позволяет ещё увеличить степень автономности и начать принимать некоторые простые решения с более широкой вариативностью. Принятие решений предполагается на уровне простейших выборов из заранее заложенных в программе управления. В ряде МКФС существует возможность закладывания заданий, которые требуют выполнения. Можно привести в качестве примера формирование полётных заданий для беспилотных летательных аппаратов – задаются координаты промежуточных точек и действия, которые необходимо выполнять при прохождении участка траектории и/или на промежуточной или итоговой точке.

Использование фотонных сенсоров позволяет повысить точность получаемой информации и расширить спектр сигналов для функционирования МКФС, в частности, очевидно, что привязка к визуальным маякам с использованием гипер- или мультиспектральной камеры расширяет используемый диапазон времени суток, а также увеличивает надёжность (помехоустойчивость) получаемой информации для использования алгоритмов SLAM.

Самая высокая степень автономности предполагает, что МКФС обладает всей необходимой информацией для принятия решений в условиях неопределённости. Одной из наиболее известных и проработанных направлений по автономности и определению степени является оценка SAE [197].

3.7.2 Классы мобильных киберфизических систем по среде функционирования

Нередко среда функционирования накладывает свои ограничения на сенсорную и исполнительные подсистемы МКФС. Также

важно иметь внутренние специализированные параметры управления, которые определяют алгоритмы поведения и могут определять их степень интеллектуальности. Что существенно влияет на требования по необходимым вычислительным ресурсам на борту МКФС.

Особенности воздушной среды определяются самой средой функционирования: конструктивно используются различные аэродинамические схемы, которые, как правило, сводятся к самолётному или мультикоптерному типу, либо комбинированные схемы типа конвертоплана. Есть варианты перемещения в воздушном пространстве с помощью летательных аппаратов с использованием схем дирижаблевого типа, но они имеют ограничения на поддержание высоты. Вместе с тем все БПЛА являются частью беспилотной авиационной системы (БАС) [198].

Отметим, что в целом БАС включает в себя не только БПЛА, но и наземную инфраструктуру, каналы связи между ними, а также людей. Это формирует единую социокиберфизическую систему, в которой мобильная часть представлена беспилотными летательными аппаратами.

Первой задачей, которая ставится перед БПЛА, – это формирование полётного задания. При его выполнении требуется использование различных интеллектуальных алгоритмов коррекции полётного задания на различных этапах. Очевидно, что необходим учёт характеристик внешней среды – метеорологических условий, динамических препятствий, проблем со связью и пр. Интеллектуальность определяется вариативностью алгоритмов принятия решения при различных ситуациях [198].

Другой задачей, требующей интеллектуализации, является определение местоположения БПЛА в различных системах координат, в которых представлено полётное задание. Сигналы ГНСС, как правило, обладают невысокой точностью, но достаточны для перемещения в воздушной среде, а также могут быть использованы более точные датчики для локализации, например, RTK (*Real Time*

Kinematic) [199]. При перемещении в закрытых пространствах требуется ещё большая точность и могут использоваться сенсоры на основе лидаров и других систем технического зрения [200]. Также можно использовать группу БПЛА для обеспечения связи и навигации в сложных условиях (рисунок 3.16) [201].

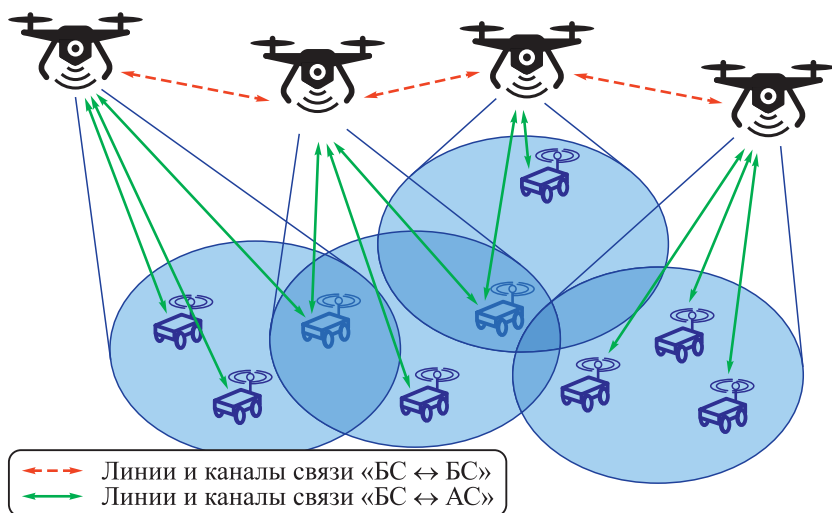


Рисунок 3.16 – Обеспечение связи и навигации с использованием БПЛА

В отличие от БПЛА наземные робототехнические комплексы, как правило, имеют возможность остановки и оценки ситуации. Это позволяет использовать более сложные интеллектуальные методы, например, движение в колонне. Известные методы SLAM представляют собой комбинацию интеллектуальных методов получения, обработки, хранения и передачи информации. Это чрезвычайно актуально для отработки сценариев поведения различных транспортных средств на полигонах.

МКФС, ориентированные на работу в водной среде, разделяются на безэкипажные катера (БЭК) и необитаемые подводные аппараты – автономные (АНПА) и телеуправляемые (ТНПА). Особен-

ность водной среды определяется наличием течений, различных плотностей, различной прозрачностью, что формирует отдельную задачу по позиционированию в водной среде. Интеллектуальность определяется возможностью решения перечисленных выше задач.

Межсредные роботы представляют собой МКФС, которые функционируют в разных средах. Так, возможность переходить из воздушной среды в водную представлена классом БПЛА типа аквадрон, а между землёй и водой – амфибиями. Указанное направление нередко решается за счёт размещения различных движителей на МКФС, что, с одной стороны, приводит к расширению сред, а с другой вносит конструктивные решения, которые снижают общую эффективность функционирования в каждой из сред. Очевидно, что выигрыш в универсальности среды функционирования идёт за счёт снижения эффективности перемещения (для МКФС) в каждой из сред.

Развитие МКФС неуклонно идёт по пути снижения требований к обладанию специальными навыками и качествами и расширения количества модальностей, которые используются при взаимодействии с человеком при выполнении функций управления. Различные интерфейсы позволяют управлять МКФС за счёт получения, обработки биометрических сигналов от человека с последующим автоматическими или автоматизированным формированием команд управления МКФС [200, 202–205].

Активное развитие человекомашинных интерфейсов уже формирует полноценную социокиберфизическую систему, в которой нередко человек становится объектом управления. На рисунке 3.17 представлена схема применения такого гибридного интерфейса.

Создание и развитие технических средств взаимодействия с МКФС, включая интерфейсы и гибридный интеллект, будет идти как со стороны человека – как приспособление, так и со стороны усовершенствования технологий.

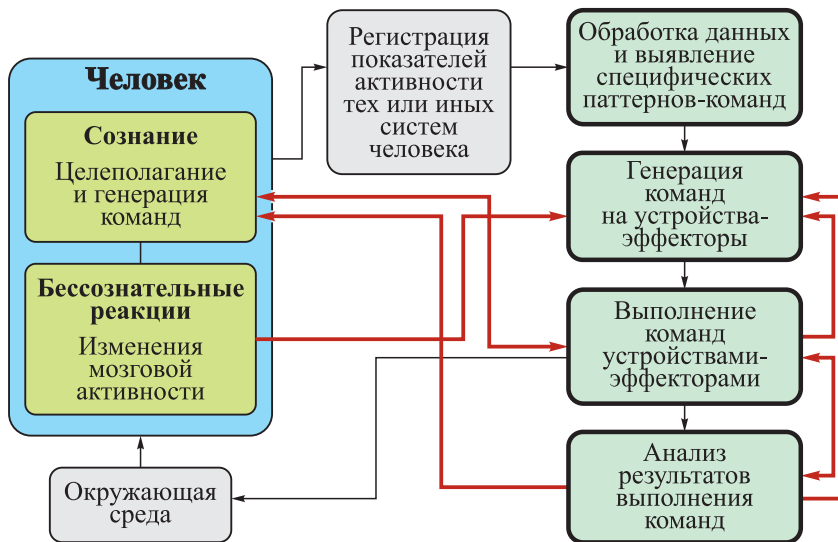


Рисунок 3.17 – Схема применения гибридного интерфейса

Развитие мобильных киберфизических систем не ограничивается исключительно технической составляющей. Использование больших языковых моделей предполагает использование технологий искусственного интеллекта для получения, обработки информации и формирования управляющих команд.

Перспективные направления интеллектуализации киберфизических систем идут в направлении повышения автономности и работы в недетерминированной среде, а также принятия оперативных решений в сложной обстановке.

Большие перспективы повышения эффективности мобильных киберфизических систем открывает фотоника.

Список использованных источников к Главе 3

1. Мониторинг // Гражданская защита: Энциклопедия в 4-х томах. Т. II (К – О). М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.

2. Корнеева Т. В. Толковый словарь по метрологии, измерительной технике и управлению качеством. Основные термины: около 7000 терминов. Мониторинг. М.: Рус. яз., 1990.
3. Мультиспектральный интеллектуальный мониторинг природной и техногенной среды / под ред. В. Я. Панченко. Самара: Новая техника, 2023. 184 с. ISBN: 978-5-88940-164-3.
4. Перспективные информационные технологии дистанционного зондирования Земли / под ред. В. А. Сойфера. Самара: Новая техника, 2015. 255 с. ISBN: 978-5-88940-138-4.
5. Нанофотоника и её применение в системах ДЗЗ / под ред. В. А. Сойфера. Самара: Новая техника, 2016. 384 с. ISBN: 978-5-88940-140-7.
6. Сойфер В. А. Фотоника и её применение в сенсорике, обработке информации и управлении // Материалы XII мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2019 (Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 года). В 4-х т. Издательство Южного федерального университета, 2019. Т. 2. С. 24-26.
7. Small satellites “AIST” constellation – Design, construction and program of scientific and technological experiments / A. Kirilin, E. Shakhmatov, V. Soifer, R. Akhmetov, S. Tkachenko, A. Prokofev, V. Salmin, N. Stratilatov, N. Semkin, V. Abrashkin, I. Tkachenko, S. Saffronov, Y. Zheleznov // Procedia Engineering. 2015. Vol. 104. P. 43–49. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.095.
8. 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements / N. Ivliev, V. Podlipnov, M. Petrov, I. Tkachenko, M. Ivanushkin, S. Fomchenkov, M. Markushin, R. Skidanov, Y. Khanenko, A. Nikonorov, N. Kazanskiy, V. Soifer // Sensors. 2024. Vol. 24(9). Article ID 2885. DOI: 10.3390/s24092885.
9. Agricultural plant hyperspectral imaging dataset / A. V. Gaidel, V. V. Podlipnov, N. A. Ivliev, R. A. Paringer, P. A. Ishkin, S. V. Mashkov, R. V. Skidanov // Computer Optics. 2023. Vol. 47(3). P. 442–450. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1226.
10. Система управления широкозахватной дождевальнoй машины кругового действия для прецизионного орошения / А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко, Р. В. Скиданов, В. В. Подлипов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2019. № 1(73). С. 195–199.
11. Ансамбли спектрально-пространственных сверточных нейросетевых моделей для задачи классификации типов почв на гиперспектральных изображениях / Н. А. Фирсов, В. В. Подлипов, Н. А. Ив-

- лиев, Д. Д. Рыськова, А. В. Пирогов, А. А. Музыка, А. Р. Макаров, В. Е. Лобанов, В. И. Платонов, А. Н. Бабичев, В. А. Монастырский, В. И. Ольгаренко, П. П. Николаев, Р. В. Скиданов, А. В. Никоноров, Н. Л. Казанский, В. А. Соيفер // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 5. С. 795-805. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1260.
12. Neural network classification of coffee varieties on hyperspectral images / A. R. Makarov, V. V. Podlipnov, N. A. Ivliev, A. V. Nikonorov, D. I. Ulyanov, N. A. Firsov // 2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), Samara, Russian Federation. 2022. Pp. 1–3. DOI: 10.1109/ITNT55410.2022.9848735.
 13. Hamza M, Skidanov R, Podlipnov V. Visualization of subcutaneous blood vessels based on hyperspectral imaging and three-wavelength index images // Sensors. 2023. Vol. 23(21). Article ID 8895. DOI: 10.3390/s23218895.
 14. Shippert P. Why use hyperspectral imagery? // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2004. Vol. 70(4). Pp. 377–380.
 15. Бычков И. В., Фереферов Е. С. Цифровые технологии мониторинга и прогнозирования экологической обстановки в Сибири // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92(4). С. 315–323.
 16. Классификация космоснимков Sentinel-2 Байкальской природной территории / И. В. Бычков, Г. М. Ружников, Р. К. Федоров, А. К. Попова, Ю. В. Авраменко // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 90–96. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1022.
 17. Технология оценки валовой первичной продукции по данным спутниковых наблюдений / Ю. И. Шокин, А. А. Лагутин, Е. Ю. Мордвин, Н. В. Волков // Вычислительные технологии. 2023. Т. 28, № 2. С. 103–114. DOI: 10.25743/ICT.2023.282.009.
 18. Радиолокация для всех / В. С. Верба, К. Ю. Гаврилов, А. Р. Ильчук, Б. Г. Татарский, А. А. Филатов, под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2020. 504 с. ISBN: 978-5-94836-555-8.
 19. Развитие подходов к построению информационных систем дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, М. А. Бурцев, А. А. Прошин, Д. А. Кобец // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-53-66.
 20. Зимичев Е. А., Казанский Н. Л., Серафимович П. Г. Пространственная классификация гиперспектральных изображений с использованием метода кластеризации k-means++ // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38(2). С. 281–286. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-281-286.

21. Thematic classification with support subspaces in hyperspectral images / V. A. Fursov, S. A. Bibikov, D. A. Zherdev, N. L. Kazanskiy // *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*. 2020. Vol. 11(4). Pp. 186–193. DOI: 10.1504/IJESMS.2020.111268.
22. Deep learning-based enhancement of hyperspectral images using simulated ground truth / A. V. Nikonorov, M. V. Petrov, S. A. Bibikov, P. Y. Yakimov, V. V. Kutikova, A. A. Morozov, R. V. Skidanov, N. L. Kazanskiy // *Proceedings of the 10th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (PRRS 2018)*. 2018. Pp. 1–9. DOI: 10.1109/PRRS.2018.8486408.
23. Сидорчук Д. С., Волков В. В., Никоноров А. В. Сравнение метода нелинейной контраст-сохраняющей визуализации мультиспектральных изображений с известными алгоритмами деколоризации // *Информационные процессы*. 2020. Т. 20, № 1. С. 41–54.
24. Нейросетевая классификация гиперспектральных изображений растительности с формированием обучающей выборки на основе адаптивного вегетационного индекса / Н. А. Фирсов, В. В. Подлипов, Н. А. Ивлиев, П. П. Николаев, С. В. Машков, П. А. Ишкин, Р. В. Скиданов, А. В. Никоноров // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45, № 6. С. 887–896. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1038.
25. Спектральная гармонизация данных БПЛА и данных спутниковой съемки для нужд точного земледелия / А. Л. Нурмухаметов, Д. С. Сидорчук, И. А. Коноваленко, А. В. Никоноров, М. А. Грачева // *Информационные процессы*. 2022. Т. 22, № 4. С. 335–346.
26. Zhen J., Hongyuan H., Rulin L. [et al.]. Hyperspectral imaging technology for identification of polymeric plastic automobile lampshade // *Infrared Physics and Technology*. 2023. Vol. 132. Article ID 104712. DOI: 10.1016/j.infrared.2023.104712.
27. A spectral-spatial feature rotation based ensemble method for imbalanced hyperspectral image classification / Y. Su, X. Li, J. Yao, C. Dong and Y. Wang // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2023. Vol. 61. Article ID 5515918. DOI: 10.1109/TGRS.2023.3282064.
28. He M., Li B., Chen H. Multi-scale 3D deep convolutional neural network for hyperspectral image classification // *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Beijing, China. 2017. P. 3904–3908. DOI: 10.1109/ICIP.2017.8297014.
29. Degerickx J., Hermy M., Somers B. Mapping functional urban green types using high resolution remote sensing data // *Sustainability*. 2020. Vol. 12(5). Article ID 2144. DOI: 10.3390/su12052144.
30. Attention-based pyramid network for segmentation and classification of high-resolution and hyperspectral remote sensing images / Q. Xu, X.

- Yuan, C. Ouyang, Y. Zeng // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12(21). Article ID 3501. DOI: 10.3390/rs12213501.
31. Распознавание растительного покрова на гиперспектральных изображениях по показателю сопряжённости / С. А. Бибииков, Н. Л. Казанский, В. А. Фурсов // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42, № 5. С. 846–854. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-846-854.
 32. Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики / Н. Л. Казанский, С. И. Харитонов, А. В. Карсаков, С. Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. 2014. Т. 38(2). С. 271–280. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-2-271-280.
 33. Eurasian Patent for Invention 025868. Dispersing element for spectrometer : published 28.02.17 / Kazanskiy N. L., Serafimovich P. G., Kharitonov S. I.
 34. Eurasian Patent for the Invention 024759. Depicting hyperspectrometer based on diffraction grating with variable height of ridges : published 19.08.16 : Bulletin No 10 / Skidanov R. V., Kazanskiy N. L., Moiseev O. Yu.
 35. Evaluating imaging quality of the Offner hyperspectrometer / A. Nikonorov, M. Petrov, P. Yakimov, V. Blank, S. Karpeev, R. Skidanov, N. Kazanskiy // 9th IAPR Workshop on Pattern Recognition in Remote Sensing (PRRS 2016). 2017. Article ID 7867020. DOI: 10.1109/PRRS.2016.7867020.
 36. An airborne Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements / N. Kazanskiy, N. Ivliev, V. Podlipnov, R. Skidanov // *Sensors*. 2020. Vol. 20(12). Article ID 3411. DOI: 10.3390/s20123411.
 37. Подлипов В. В., Скиданов Р. В. Калибровка изображающего гиперспектрометра // *Компьютерная оптика*. 2017. Т. 41, № 6. С. 869–874. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.
 38. Бланк В. А., Ганчевская С. В., Скиданов Р. В. Программа формирования гиперкуба для гиперспектральной камеры на основе дифракционной линзы // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018663250, 24.10.2018. Заявка № 2018660420 от 27.09.2018.
 39. Компьютерное зрение. Современные методы и перспективы развития / под ред. Р. Дэвис, М. Терк; пер. с англ. В. С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2022. 690 с. ISBN: 978-5-93700-148-1.
 40. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю. В. Визильтер, С. Ю. Желтов, А. В. Бондаренко, М. В. Ососков, А. В. Моржин. М.: Физматкнига, 2010. 672 с. ISBN: 978-5-89155-201-2.

41. Compact imaging systems based on annular harmonic lenses / R. Skidakov, Y. Strelkov, S. Volotovskiy, V. Blank, S. Ganchevskaya, V. Podlipnov, N. Ivliev, N. Kazanskiy // *Sensors*. 2020. Vol. 20(14). Article ID 3914. DOI: 10.3390/s20143914.
42. Нейросетевая реконструкция видеопотока в дифракционных оптических системах массового производства / В. В. Евдокимова, М. В. Петров, М. А. Клюева, Е. Ю. Зыбин, В. В. Косьянчук, И. Б. Мищенко, В. М. Новиков, Н. И. Сельвесюк, Е. И. Ершов, Н. А. Ивлиев, Р. В. Скиданов, Н. Л. Казанский, А. В. Никонов // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45, № 1. С. 130–141. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-834.
43. Kazanskiy N. L., Popov S. B. Integrated design technology for computer vision systems in railway transportation // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015. Vol. 25(2). P. 215–219. DOI: 10.1134/S1054661815020133.
44. Попов С. Б. Использование структурированной подсветки в системах технического зрения // *Компьютерная оптика*. 2013. Том 37, № 2. С. 233–238. DOI: 10.18287/0134-2452-2013-37-2-233-238.
45. Rusinkiewicz S., Hall-Holt O., Levoy M. Real-time 3D model acquisition // *ACM Transactions on Graphics*. 2002. Vol. 21(3). P. 438–446. DOI: 10.1145/566570.566600.
46. Lanman D., Crispell D., Taubin G. Surround structured lighting: 3-D scanning with orthographic illumination // *Computer Vision and Image Understanding*. 2009. Vol. 113(11). P. 1107–1117. DOI: 10.1016/j.cviu.2009.03.016.
47. Salvi J., Pages J., Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems // *Pattern Recognition*. 2004. Vol. 37. P. 827–849. DOI: 10.1016/j.patcog.2003.10.002.
48. Single-pixel camera with a large-area microstrip superconducting single photon detector on a multimode fiber / M. Shcherbatenko, M. Elezov, N. Manova, K. Sedykh, A. Korneev, Yu. Korneeva, M. Dryazgov, N. Simonov, A. Feimov, G. Goltsman, D. Sych // *Applied Physics Letters* 2021. Vol. 118(18). Article ID 181103. DOI: 10.1063/5.0046049.
49. Aguilar R. A., Hermosa N., Soriano M. N. Low-cost Fourier ghost imaging using a light-dependent resistor // *American Journal of Physics*. 2019. Vol. 87(12). P. 976–981. DOI: 10.1119/10.0000163.
50. Формирование эталонных волновых фронтов элементами компьютерной оптики / М. А. Голуб, Н. Л. Казанский, И. Н. Сисакян, В. А. Сойфер // *Компьютерная оптика*. 1990. Вып. 7. С. 3–26.
51. Математическое моделирование светотехнических устройств с ДОО / Н. Л. Казанский, В. А. Сойфер, С. И. Харитонов // *Компьютерная оптика*. 1995. Вып. 14–15, ч. 2. С. 107–116.

52. Проектирование светотехнических устройств с ДОО / Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский, С. И. Харитонов // Компьютерная оптика. 1998. Вып. 18. С. 91–96.
53. Экспериментальное исследование светотехнических устройств с ДОО / А. В. Волков, Н. Л. Казанский, Г. В. Успенцев // Компьютерная оптика. 1999. Вып. 19. С. 137–142.
54. Power phase apodization study on compensation defocusing and chromatic aberration in the imaging system / S. N. Khonina, S. G. Volotovskiy, A. P. Dzyuba, P. G. Serafimovich, S. B. Popov, M. A. Butt // Electronics. 2021. Vol. 10(11). Article ID 1327. DOI: 10.3390/electronics10111327.
55. Казанский Н. Л., Попов С. Б. Распределенная система технического зрения регистрации железно-дорожных составов // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 3. С. 419–428.
56. Цифровые платформы. Методологии. Применение в бизнесе: Коллективная монография / под ред. Б. Б. Славина, Е. П. Зараменских, Н. Механджиева. М.: Прометей, 2019. 228 с. ISBN: 978-5-907166-10-3.
57. ECSNeT++: A simulator for distributed stream processing on edge and cloud environments / G. Amarasinghe, M. D. de Assuncao, A. Harwood, Sh. Karunasekera // Future Generation Computer Systems. 2020. Vol. 111. P. 401–418. DOI: 10.1016/j.future.2019.11.014.
58. Heterogeneous edge computing open platforms and tools for internet of things / H. Ning, Y. Li, F. Shi, L. T. Yang // Future Generation Computer Systems. 2020. Vol. 106. P. 67–76. DOI: 10.1016/j.future.2019.12.036.
59. Multimodal optical diagnostics of cancer / ed. by V. V. Tuchin, J. Popp, V. Zakharov. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. ISBN: 978-3-030-44593-5.
60. Near-infrared autofluorescence spectroscopy of pigmented benign and malignant skin lesions / E. G. Borisova, I. A. Bratchenko, Y. A. Khristoforova, L. A. Bratchenko, T. I. Genova, A. I. Gisbrecht, A. A. Moryatov, S. V. Kozlov, P. P. Troyanova, V. P. Zakharov // Optical Engineering. 2020. Vol. 59(6). Article ID 061616. DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061616.
61. Classification of skin cancer using convolutional neural networks analysis of Raman spectra / I. A. Bratchenko, L. A. Bratchenko, Y. A. Khristoforova, A. A. Moryatov, S. V. Kozlov, V. P. Zakharov // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2022. Vol. 219. Article ID 106755. DOI: 10.1016/j.cmpb.2022.106755.
62. Combination of optical biopsy with patient data for improvement of skin tumor identification / Y. Khristoforova, I. Bratchenko, L. Bratchenko,

- A. Moryatov, S. Kozlov, O. Kaganov, V. Zakharov // *Diagnostics*. 2022. Vol. 12(10). Article ID 2503. DOI: 10.3390/diagnostics12102503.
63. *In vivo* diagnosis of skin cancer with a portable Raman spectroscopic device / I. A. Bratchenko, L. A. Bratchenko, A. A. Moryatov, Y. A. Khristoforova, D. N. Artemyev, O. O. Myakinin, A. E. Orlov, S. V. Kozlov, V. P. Zakharov // *Experimental Dermatology*. 2021. Vol. 30(5). P. 652–663. DOI: 10.1111/exd.14301.
64. Нейросетевой классификатор гиперспектральных снимков кожных патологий / В. О. Винокуров, И. А. Матвеева, Ю. А. Христофорова, О. О. Мякинин, И. А. Братченко, Л. А. Братченко, А. А. Моряттов, С. Г. Козлов, А. С. Мачихин, И. Абдулхалим, В. П. Захаров // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45, № 6. С. 879–886. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-832.
65. Гиперспектральный *in vivo* анализ хромофоров нормальной кожи и визуализация онкологических патологий / В. П. Шерендак, И. А. Братченко, О. О. Мякинин, П. Н. Вольхин, Ю. А. Христофорова, А. А. Моряттов, А. С. Мачихин, В. Э. Пожар, С. Г. Козлов, В. П. Захаров // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 4. С. 661–670. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-661-670.
66. Multidimensional analysis of dermoscopic images and spectral information for the diagnosis of skin tumors / I. Matveeva, A. Komlev, O. Kaganov, A. Moryatov, V. Zakharov // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2024. Vol. 10(1). Article ID 010307. DOI: 10.18287/JBPE24.10.010307.
67. He Y., Ung N. S.-Y., Parrott E. P. J. [et al.]. Freeze-thaw hysteresis effects in terahertz imaging of biomedical tissues // *Biomedical Optics Express*. 2016. Vol. 7(11). P. 4711–4717. DOI: 10.1364/BOE.7.004711.
68. Tuchin V. V. *Tissue optics: Light scattering methods and instruments for medical diagnosis*. Bellingham: SPIE Press, 2015. ISBN: 978-1628415162.
69. Hernandez-Martin E., Gonzalez-Mora J. L. Diffuse optical tomography in the human brain: A briefly review from the neurophysiology to its applications // *Brain Science Advances*. 2020. Vol. 6(4). P. 289–305. DOI: 10.26599/BSA.2020.9050014.
70. Турчин И. В. Методы оптической биомедицинской визуализации: от субклеточных структур до тканей и органов // *Успехи физических наук*. 2016. Т. 186. С. 550–567. DOI: 10.3367/UFN.2015.12.037734.
71. Dremine V. V. Zharebtsov, E. A. Sidorov, V. V. [et al.]. Multimodal optical measurement for study of lower limb tissue viability in patients with diabetes mellitus // *Journal of Biomedical Optics*. 2017. Vol. 22(8). Article ID 085003. DOI: 10.1117/1.JBO.22.8.085003.

72. Eriksson S., Nilsson J., Stureson. C. Non-invasive imaging of microcirculation: a technology review // *Medical Devices (Auckland, N.Z.)*. 2014. Vol. 7. Article ID 445. DOI: 10.2147/MDER.S51426.
73. Meerwaldt R., Graaff R., Oomen P. H. N. [et al.]. Simple non-invasive assessment of advanced glycation endproduct accumulation // *Diabetologia*. 2004. Vol. 47(7). P. 1324–1330. DOI: 10.1007/s00125-004-1451-2.
74. Raman spectroscopy of human skin for kidney failure detection / L. A. Bratchenko, I. A. Bratchenko, Y. A. Khristoforova, D. N. Artemyev, D. Y. Konovalova, P. A. Lebedev, V. P. Zakharov // *Journal of Biophotonics*. 2021. Vol. 14(2). Article ID e202000360. DOI: 10.1002/jbio.202000360.
75. Raman spectroscopy in chronic heart failure diagnosis based on human skin analysis / Y. A. Khristoforova, L. A. Bratchenko, M. A. Skuratova, E. A. Lebedeva, P. A. Lebedev, I. A. Bratchenko // *Journal of Biophotonics*. 2023. Vol. 16(7). Article ID 202300016. DOI: 10.1002/jbio.202300016.
76. Smolyanskaya O., Chernomyrdin N., Konovko A., [et al.]. Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids // *Progress in Quantum Electronics*. 2018. Vol. 62. P. 1–77. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2018.10.001.
77. Lu G., Fei B. Medical hyperspectral imaging: A review // *Journal of Biomedical Optics*. 2014. Vol. 19(1). Article ID 010901. DOI: 10.1117/1.JBO.19.1.010901.
78. Genina E., Bashkatov A., Sinichkin Y. [et al.]. (2015). Optical clearing of biological tissues: prospects of application in medical diagnostics and phototherapy // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2015. Vol. 1(1). P. 22–58. DOI: 10.18287/jbpe-2015-1-1-22.
79. Sdobnov A., Lademann J., Tuchin V. [et al.]. Nonlinear optics of skin: Enhancement of autofluorescence and second harmonic generation signals by immersion optical clearing // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2023. Vol. 9(3). Article ID 030201. DOI: 10.18287/JBPE23.09.030201.
80. Shipp D. W., Sinjab F., Notingher I. Raman spectroscopy: Techniques and applications in the life sciences // *Advances in Optics and Photonics*. 2017. Vol. 9(2). P. 315–428. DOI: 10.1364/AOP.9.000315.
81. Khristoforova Y., Bratchenko L., Bratchenko I. Raman-based techniques in medical applications for diagnostic tasks: A review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24(21). 15605. DOI: 10.3390/ijms242115605.

82. Krafft C., Popp J. The many facets of raman spectroscopy for biomedical analysis // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2015. Vol. 407. P. 699–717. DOI: 10.1007/s00216-014-8311-9.
83. Ye M., Chen Y., Wang Y. [et al.]. Subtype discrimination of acute myeloid leukemia based on Plasma SERS technique // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2022. Vol. 271. Article ID 120865. DOI: 10.1016/j.saa.2022.120865.
84. Nargis H. F., Nawaz H., Bhatti H. N. [et al.]. Comparison of surface enhanced Raman spectroscopy and Raman spectroscopy for the detection of breast cancer based on serum samples // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021. Vol. 246. Article ID 119034. DOI: 10.1016/j.saa.2020.119034.
85. Artemyev D. N., Kukushkin V. I., Avraamova S. T. [et al.]. Using the method of “optical biopsy” of prostatic tissue to diagnose prostate cancer // *Molecules*. 2021. Vol. 26(7). Article ID 1961. DOI: 10.3390/molecules26071961.
86. Zhang K., Liu X., Man B. [et al.]. Label-free and stable serum analysis based on Ag-NPs/PSi surface-enhanced Raman scattering for noninvasive lung cancer detection // *Biomedical Optics Express*. 2018. Vol. 9(9). P. 4345–4358. DOI: 10.1364/BOE.9.004345.
87. Wang J., Zheng C.-X., Ma C.-L. [et al.]. Raman spectroscopic study of cervical precancerous lesions and cervical cancer // *Lasers in Medical Science*. 2021. Vol. 36(9). P. 1855–1864. DOI: 10.1007/s10103-020-03218-5.
88. Cao Z., Pan X., Yu H. [et al.]. A deep learning approach for detecting colorectal cancer via Raman spectra // *BME Frontiers*. 2022. Vol. 2022(8). Article ID 9872028. DOI: 10.34133/2022/9872028.
89. Abalde-Cela S., Wu L., Teixeira A. [et al.]. Multiplexing liquid biopsy with surface-enhanced Raman scattering spectroscopy // *Advanced Optical Materials*. 2021. Vol. 9(15). Article ID 2001171. DOI: 10.1002/adom.202001171.
90. Lukose J., Barik A. K., Mithun N. [et al.]. Raman spectroscopy for viral diagnostics // *Biophysical Reviews*. 2023. Vol. 15(2). P. 199–221. DOI: 10.1007/s12551-023-01059-4.
91. Ralbovsky N. M., Lednev I. K. Raman spectroscopy and chemometrics: A potential universal method for diagnosing cancer // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2019. Vol. 219. P. 463–487. DOI: 10.1016/j.saa.2019.04.067.
92. Ponti G., Maccaferri M., Ruini C. [et al.]. Biomarkers associated with COVID-19 disease progression // *Critical Reviews in Clinical Labora-*

- tory Sciences. 2020. Vol. 57(6). P. 389–399. DOI: 10.1080/10408363.2020.1770685.
93. Moor K., Terada Y., Taketani A. [et al.]. Early detection of virus infection in live human cells using Raman spectroscopy // *Journal of Biomedical Optics*. 2018. Vol. 23(9). Article ID 097001. DOI: 10.1117/1.JBO.23.9.097001.
 94. Yu Q., Yao Z., Zhou J. [et al.]. Transient stimulated Raman scattering spectroscopy and imaging // *Light: Science & Applications*. 2024. Vol. 13. Article ID 70. DOI: 10.1038/s41377-024-01412-6.
 95. Rosado J., Pelleau S., Cockram C. [et al.]. Multiplex assays for the identification of serological signatures of SARS-CoV-2 infection: An antibody-based diagnostic and machine learning study // *The Lancet Microbe*. 2021. Vol. 2(2). P. E60–E69. DOI: 10.1016/S2666-5247(20)30197-X.
 96. Yadav S., Sadique M. A., Ranjan P. [et al.]. SERS based lateral flow immunoassay for point-of-care detection of SARS-CoV-2 in clinical samples // *ACS Applied Bio Materials*. 2021. Vol. 4(4). P. 2974–2995. DOI: 10.1021/acsabm.1c00102.
 97. Cennamo G., Montorio D., Morra V. B. [et al.]. Surface-enhanced Raman spectroscopy of tears: Toward a diagnostic tool for neurodegenerative disease identification // *Journal of Biomedical Optics*. 2020. Vol. 25(8). Article ID 087002. DOI: 10.1117/1.JBO.25.8.087002.
 98. Karunakaran V., Joseph M. M., Yadev I. [et al.]. A non-invasive ultrasensitive diagnostic approach for COVID-19 infection using salivary label-free SERS fingerprinting and artificial intelligence // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2022. Vol. 234. Article ID 112545. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2022.112545.
 99. Tong L., Ramser K., Käll M. Optical tweezers for Raman spectroscopy. In: *Raman spectroscopy for nanomaterials characterization* / ed. by C. S. S. R. Kumar. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. P. 507–530. DOI: 10.1007/978-3-642-20620-7_18.
 100. A clinical instrument for combined raman spectroscopy-optical coherence tomography of skin cancers / C. A. Patil, H. Kirshnamoorthi, D. L. Ellis, T. G. van Leeuwen, A. Ma-hadevan-Jansen // *Lasers in Surgery and Medicine*. 2011. Vol. 43(2). P. 143–151. DOI: 10.1002/lsm.21041.
 101. Pfranpje G., Kadam S. R., Chabukswar S. [et al.]. Digital health technologies in vision care: Transforming diagnostics and management // *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. 2023. Vol. 11(7). P. 387–393. DOI: 10.17762/ijritcc.v11i7.9423.

102. Liu L., Wu Z., Qi M. [et al.]. (2022, April). Application of adaptive optics in ophthalmology. *Photonics*. 2022. Vol. 9(5). Article ID 288. DOI: 10.3390/photonics9050288.
103. Chateau, N. Applications of adaptive-optics in ophthalmology // *Acta Ophthalmologica Scandinavica*. 2007. Vol. 85(s240). P. 0–0. DOI: 10.1111/j.1600-0420.2007.01063_2877.x.
104. Morgan J. I. W. Adaptive optics retinal imaging techniques and clinical applications. In: *Reference module in materials science and materials engineering*. Elsevier, 2018. P. 72–84. DOI: 10.1016/b978-0-12-803581-8.09777-0.
105. Alexopoulos P., Madu C., Wollstein G. [et al.]. The development and clinical application of innovative optical ophthalmic imaging techniques // *Frontiers in Medicine*. 2022. Vol. 9. Article ID 891369. DOI: 10.3389/fmed.2022.891369.
106. Zhang J., Mazlin V., Fei K. [et al.]. Time-domain full-field optical coherence tomography (TD-FF-OCT) in ophthalmic imaging // *Therapeutic Advances in Chronic Disease*. 2023. Vol. 14. Article ID 20406223231170146. DOI: 10.1177/20406223231170146.
107. Masters B. R. Optical devices in ophthalmology and optometry: Technology, design principles and clinical applications // *Journal of Biomedical Optics*. 2014. Vol. 19(7). Article ID 079901. DOI: 10.1117/1.jbo.19.7.079901.
108. Leong Y. Y., Vasseneix C., Finkelstein M. T. [et al.]. Artificial intelligence meets neuro-ophthalmology // *The Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*. 2022. Vol. 11(2). P. 111–125. DOI: 10.1097/apo.0000000000000512.
109. Dave P. Addressing disparities in vision health and eye care in the US. *World Journal of Current Medical and Pharmaceutical Research*. 2024. Vol. 6(1). P. 58–64. DOI: 10.37022/wjcmpr.v6i1.321.
110. Zhou W., Zhao D., Shuai Y. C. [et al.]. Progress in 2D photonic crystal Fano resonance photonics // *Progress in Quantum Electronics*. 2014. Vol. 38(1). P. 1–74. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2014.01.001.
111. Kim D. H., Kim J. J., Kong D. J. [et al.]. Bio-inspired tunable optics and photonics: bridging the gap between nature and technology // *International Journal of Optomechatronics*. 2024. Vol. 18(1). Article ID 2334293. DOI: 10.1080/15599612.2024.2334293.
112. Kurt H. Asymmetric light propagation in photonic devices // *2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. 2013. P. 1–4. DOI: 10.1109/icton.2013.6602935.

113. Radulaski M., Zhang J. L., Tzeng Y. K. [et al.]. Nanodiamond integration with photonic devices. *Laser & Photonics Reviews*. 2019. Vol. 13(8). Article ID 1800316. DOI: 10.1002/lpor.201800316.
114. Wu Y., Li C., Hu X. [et al.]. Applications of topological photonics in integrated photonic devices // *Advanced Optical Materials*. 2017. Vol. 5(18). Article ID 1700357. DOI: 10.1002/adom.201700357.
115. Ferrari M., Taccheo S. Special section guest editorial: Special section on glass photonics for integrated optics // *Optical Engineering*. 2014. Vol. 53(7). Article ID 071801. DOI: 10.1117/1.oe.53.7.071801.
116. Schweitzer M., Ostheimer P., Lins A. [et al.]. Transforming tele-ophthalmology: Utilizing cloud computing for remote eye care // *Studies in health technology and informatics*. 2024. Vol. 313. P. 215–220. DOI: 10.3233/shiti240040.
117. Parthasarathy M. K., Lakshminarayanan V. A brief history of aberrometry applications in ophthalmology and vision science. In: *Advances in Optical Science and Engineering: Proceedings of the Third International Conference, OPTRONIX 2016* / ed. by I. Bhattacharya, S. Chakrabarti, H. S. Reehal, V. Lakshminarayanan. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2017. P. 31–39. DOI: 10.1007/978-981-10-3908-9_4.
118. Akkara J. D., Kuriakose A. Role of artificial intelligence and machine learning in ophthalmology // *Kerala Journal of Ophthalmology*. 2019. Vol. 31(2). P. 150–160. DOI: 10.4103/kjo.kjo_54_19.
119. Ul Kadir S. M., Rehnuma R., Rahman S. [et al.]. Artificial Intelligence (AI) in ophthalmology: An overview // *Ophthalmology Research*. 2022. Vol. 5(1). P. 1–10. DOI: 10.33425/2639-9482.1024.
120. Popescu S. I., Muşat A. A. M., Patoni C. [et al.]. Artificial intelligence in ophthalmology // *Romanian Journal of Ophthalmology*. 2023. Vol. 67(3). Article ID 207. DOI: 10.22336/rjo.2023.37.
121. Leong Y. Y., Vasseneix C., Finkelstein M. T. [et al.]. Artificial intelligence meets neuro-ophthalmology // *The Asia-Pacific Journal of Ophthalmology*. 2022. Vol. 11(2). P. 111–125. DOI: 10.1097/apo.0000000000000512.
122. Application of artificial intelligence in ophthalmology for coagulate map formation to carry out laser eye treatment / N. Yu. Ilyasova, N. S. Demin. In: *Pattern Recognition, Computer Vision, and Image Processing. ICPR 2022 International Workshops and Challenges. Montreal, QC, Canada, August 21–25, 2022, Proceedings, Part II* / ed. by J.-J. Rousseau, B. Kapralos. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2023. P. 387–402. DOI: 10.1007/978-3-031-37742-6_29.
123. Ilyasova N., Paringer R., Kupriyanov A. Regions of interest in a fundus image selection technique using the discriminative analysis methods. In:

- Computer Vision and Graphics. International Conference, ICCVG 2016, Warsaw, Poland, September 19-21, 2016, Proceedings / L. J. Chmielewski, A. Datta, R. Kozera, K. Wojciechowski. Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016. P. 408-417. DOI: 10.1007/978-3-319-46418-3_36.
124. Identification of prognostic factors and predicting the therapeutic effect of laser photocoagulation for DME treatment / N. Ilyasova, A. Shirokanev, D. Kirsh, N. Demin, E. Zamytskiy, R. Paringer, A. Antonov // *Electronics*. 2021. Vol. 10(12). Article ID 1420. DOI: 10.3390/electronics10121420.
 125. Shirokanev A. S., Ilyasova N. Yu. Intelligent system for coagulates preliminary plan analysis for assessment of the diabetic retinopathy treatment effectiveness // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2021. P. 1825–1828. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396089.
 126. Исследование алгоритмов расстановки коагулятов на изображение глазного дна / А. С. Широкаев, Д. В. Кириш, Н. Ю. Ильясова, А. В. Куприянов // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42, № 4. С. 712–721. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-712-721.
 127. Широкаев А. С. Программная система формирования и анализа предварительного плана коагуляции для лечения диабетической ретинопатии // *Биотехносфера*. 2020. № 1(65). С. 49–53. DOI: 10.25960/bts.2020.1.49.
 128. Сравнительная количественная оценка расположения и интенсивности коагулятов при лазерном лечении диабетического макулярного отека / Е. А. Замыцкий, А. В. Золотарев, Е. В. Карлова, Н. Ю. Ильясова, А. С. Широкаев // *Клиническая офтальмология*. 2021. Т. 21, № 2. С. 58–62. DOI: 10.32364/2311-7729-2021-21-2-58-62.
 129. Анализ интенсивности коагулянтов при лазерном лечении диабетического макулярного отека в роботизированной лазерной системе Navilas / Е. А. Замыцкий, А. В. Золотарев, Е. В. Карлова, П. А. Замыцкий // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2017. Т. 13, № 2. С. 375–378.
 130. Технология интеллектуального отбора признаков для системы автоматического формирования плана коагулятов на сетчатке глаза / Н. Ю. Ильясова, А. С. Широкаев, А. В. Куприянов, Р. А. Парингер // *Компьютерная оптика*. 2019. Т. 43, № 2. С. 304–315. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-304-315.
 131. Modeling of fundus laser exposure for estimating safe laser coagulation parameters in the treatment of diabetic retinopathy / A. Shirokanev, N.

- Ilyasova, N. Andriyanov, E. Zamytskiy, A. Zolotarev, D. Kirsh // *Mathematics*. 2021. Vol. 9(9). Article ID 967. DOI: 10.3390/math9090967.
132. Study of thermal field of the retina of the human eye in the laser exposure zone during numerical simulation based on the solution of the heat equation in the layered region / A. V. Raku, A. S. Shirokanev, A. A. Degtyarev, A. S. Kibitkina, N. Yu. Ilyasova, A. V. Zolotarev // *2020 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/ITNT49337.2020.9253346.
 133. Development of a computer system for automatically generating a laser photocoagulation plan to improve the retinal coagulation quality in the treatment of diabetic retinopathy / N. Ilyasova, N. Demin, N. Andriyanov // *Symmetry*. 2023. Vol. 15(2). Article ID 287. DOI: 10.3390/sym15020287.
 134. Применение искусственного интеллекта в офтальмологии на примере решения задачи семантической сегментации изображения глазного дна / Н. С. Демин, Н. Ю. Ильясова, Р. А. Парингер, Д. В. Кириш // *Компьютерная оптика*. 2023. Т. 47, № 5. С. 824–831. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1283.
 135. Information technology for decision-making support for personalized parameter selection in retinal laser treatment and photocoagulation outcome prognostication / N. Yu. Ilyasova, A. S. Shirokanev, N. S. Demin, R. A. Paringer, E. A. Zamytskiy // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2020. Vol. 29(4). P. 358–367. DOI: 10.3103/S1060992X20040098.
 136. Ilyasova N., Kupriyanov A., Paringer. R. The discriminant analysis application to refine the diagnostic features of blood vessels images // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. 2015. Vol. 24(4). P. 309–313. DOI: 10.3103/S1060992X15040037.
 137. Extracting a DME area based on graph-based image segmentation and collation of OCT retinal images / A. Shirokanev, N. Ilyasova, N. Demin, E. Zamyckij // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1780. Article ID 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1780/1/012031.
 138. Localization of diabetic macular edema areas via graph-based segmentation of OCT retinal images / N. Yu. Ilyasova, A. S. Shirokanev, N. S. Demin, E. A. Zamyckij // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1368(2). Article ID 032014. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/3/032014.
 139. Применение нейронных сетей для семантической сегментации изображений глазного дна / Р. А. Парингер, А. В. Мухин, Н. Ю. Ильясова, Н. С. Демин // *Компьютерная оптика*. 2022. Т. 46, № 4. С. 596–602. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1010.

140. Ilyasova N. Yu., Demin N. S. Application of artificial intelligence in ophthalmology for the diagnosis and treatment of eye diseases // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2022. Vol. 32(3). P. 477–482. DOI: 10.1134/S1054661822030166.
141. Ilyasova N., Shirokanev A., Demin N. Analysis of convolutional neural network for fundus image segmentation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1438. Article ID 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1438/1/012016.
142. Интеллектуальный отбор признаков для локализации объектов на изображениях глазного дна на основе анализа свёрточных нейронных сетей для анализа изображений цветовых подпространств / Н. Ю. Ильясова, Р. А. Парингер, Н. С. Ушакова, А. В. Куприянов // III международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). 2017. С. 1740–1746.
143. Ilyasova N. Yu., Paringer R. A., Shirokanev A. S. An approach to semantic segmentation of retinal images using deep neural networks for mapping laser exposure zones for the treatment of diabetic macular edema. In: *An approach to semantic segmentation of retinal images using deep neural networks for mapping laser exposure zones for the treatment of diabetic macular edema* / ed. by S. Kovalev, V. Tarassov, V. Snasel, A. Sukhanov. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. P. 106–116. DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_11.
144. Convolutional neural network application for analysis of fundus images / N. Yu. Ilyasova, A. S. Shirokanev, I. A. Klimov, R. A. Paringer. In: *Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’19)* / ed. by S. Kovalev, V. Tarassov, V. Snasel, A. Sukhanov. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 60–67. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_7.
145. Ilyasova N. Y., Shirokanev A. S., Klimov I. A. Application of convolution neural networks in eye fundus image analysis // *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2416. P. 74–79. DOI: 10.18287/1613-0073-2019-2416-74-79.
146. Systems for recognition and intelligent analysis of biomedical images / N. Yu. Ilyasova, N. S. Demin // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2023. Vol. 33(4). P. 1142–1167. DOI: 10.1134/S105466182304020X.
147. Automatic selection of the optimal zone for laser exposure according to the fundus images for laser coagulation / N. S. Demin, N. Yu. Ilyasova, R. A. Paringer // *Journal of Biomedical Photonics & Engineering*. 2023. Vol. 9(4). Article ID 040308. DOI: 10.18287/JBPE23.09.040308.

148. Ильясова Н. Ю., Баисова А. С., Куприянов А. В. Разработка и исследование методов оценивания параметров сосудов с использованием модификации локального веерного преобразования // III международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). 2017. С. 451–458.
149. A smart feature selection technique for object localization in ocular fundus images with the aid of color subspaces / N. Ilyasova, R. Paringer, A. Shirokanev, A. Kupriyanov, N. Ushakova // *Procedia Engineering*. 2007. Vol. 201. P. 736–745. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.599.
150. Ilyasova N. Yu., Demin N. S., Shirokanev A. S. Application of distributed computation of texture features to the analysis of biomedical images // *Proceedings of SPIE*. 2021. Vol. 11793. Article ID 1179315. DOI: 10.1117/12.2593194.
151. Demin N., Ilyasova N., Gaidel A. Information technology for estimation accuracy of selection macular edema region in fundus images using OCT data // *2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. 2021. P. 1–7. DOI: DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649170.
152. Ilyasova N. Yu., Shirokanev A. S., Paringer R. A. A modified technique for smart textural feature selection to extract retinal regions of interest using image pre-processing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1096(1). Article ID 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012095.
153. Methods of intellectual analysis in medical diagnostic tasks using smart feature selection / N. Yu. Ilyasova, A. S. Shirokanev, A. V. Kupriyanov, R. A. Paringer, D. V. Kirsh, A. V. Soifer // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2018. Vol. 28(4). P. 637–645. DOI: 10.1134/S1054661818040144.
154. Технология выделения и определения подтипов друз на данных оптической когерентной томографии для диагностики возрастной макулярной дегенерации / Н. Ю. Ильясова, Н. С. Демин, Д. В. Кирш // *Компьютерная оптика*. 2024. Т. 48, № 6. С. 903–912. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1556.
155. Biomedical data analysis based on parallel programming technology application for computation features' effectiveness / N. Ilyasova, A. Shirokanev, R. Paringer, A. Kupriyanov // *2019 5th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP)*. 2019. P. 67–71. DOI: 10.1109/ICFSP48124.2019.8938079.
156. High-performance algorithms application for retinal image segmentation based on texture features / N. Ilyasova, A. Shirokanev, N. Demin, A. Zolotarev. In: *Pattern Recognition. ICPR International Workshops and*

- Challenges. Virtual Event, January 10–15, 2021, Proceedings, Part V / ed. by Al. Del Bimbo, R. Cucchiara, S. Sclaroff, G. M. Farinella, T. Mei, M. Bertini, H. J. Escalante, R. Vezzani. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 198–210. DOI: 10.1007/978-3-030-68821-9_19.
157. Ilyasova N. Yu., Shikhevich V. A., Shirokanev A. S. CUDA parallel programming technology application for analysis of big biomedical data based on computation of effectiveness features // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1368(5). Article ID 052006. DOI: 10.1088/1742-6596/1368/5/052006.
 158. Ilyasova N. Y., Shirokanev A. S., Demin N. S. Development of high-performance algorithms for the segmentation of fundus images using a graphics processing unit // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2021. Vol. 31. P. 529–538. DOI: 10.1134/S1054661821030135.
 159. Особенности использования технологий Big Data в задачах медицинской диагностики / Н. Ю. Ильясова, А. В. Куприянов, Р. А. Парингер, С. Б. Попов // *Системы высокой доступности*. 2016. Т. 12, № 1. С. 48–55.
 160. Particular use of BIG DATA in medical diagnostic tasks / N. Ilyasova, A. Kupriyanov, R. Paringer, D. Kirsh // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2018. V. 28(1). P. 114–121. DOI: 10.1134/S1054661818010066.
 161. Big Data application for smart features formation in medical diagnostic tasks / N. Yu. Ilyasova, A. V. Kupriyanov, R. A. Paringer, D. V. Kirsh, A.S. Shirokanev, A.V. Soifer // *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (ICPRAI 2018)*. 2018. P. 597–601.
 162. Ilyasova N. Yu., Kupriyanov A. V. The Big Data mining to improve medical diagnostics quality // *CEUR Workshop Proceedings*. 2015. Vol. 1490. P. 346–354. DOI: 10.18287/1613-0073-2015-1490-346-354.
 163. Information technology of laser coagulation strategy selection in diabetic retinopathy treatment / A. Shirokanev, A. Kibitkina, N. Ilyasova, E. Zamyckij // *Computer Science and Information Technology*. 2020. Vol. 10(4). P. 59–64. DOI: 10.5121/csit.2020.100405.
 164. Development of information technology for selection of effective strategy of diabetic retinopathy treatment / A. S. Shirokanev, A. A. Degtyarev, A. S. Kibitkina, A. V. Raku, N. Yu. Ilyasova // *ICBBT '20: Proceedings of the 2020 12th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Technology*. 2020. P. 94–98. DOI: 10.1145/3405758.340578.
 165. Demin N., Ilyasova N., Golovin A. Retinal layers segmentation technology for optical coherence tomography images // *2021 International Con-*

- ference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT), 2021. P. 1-5. DOI: 10.1109/ITNT52450.2021.9649425.
166. Автоматическое совмещение изображений оптической когерентной томографии и снимков глазного дна / А. Д. Фида, А. В. Гайдель, Н. С. Демин, Н. Ю. Ильясова, Е. А. Замыцкий // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 5. С. 721–727. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-892.
 167. Метод выделения области макулярного отёка с использованием данных оптической когерентной томографии / Н. Ю. Ильясова, Н. С. Демин, А. С. Широканев, А. В. Куприянов, Е. А. Замыцкий // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 2. С. 250–258. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-691.
 168. Методы математического моделирования лазерного воздействия на глазное дно для оценки терапевтического эффекта / А. С. Широканев, А. С. Кибиткина, Н. Ю. Ильясова, А. А. Дегтярев // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 5. С. 809–820. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-760.
 169. John Y., Fitzgerald F. Politics as law?: The anti-ballistic missile treaty, the separation of powers, and treaty interpretation // California Law Review. 2001. Vol. 89(3). P. 851–915. DOI: 10.2307/3481184.
 170. Coffey V. High-energy lasers: new advances in defense applications // Optics and Photonics News. 2014. Vol. 25(10). P. 28–35. DOI: 10.1364/OPN.25.10.000028.
 171. Protz R. [et al.]. High-power beam combining: a step to a future laser weapon system // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8547. Article ID 854708. DOI: 10.1117/12.978844.
 172. Kaiser T. [et al.]. Detection of mode-conversion effects in passive LMA fibers by means of optical correlation analysis // Proceeding of SPIE. 2008. Vol. 6998. Article ID 69980J. DOI: 10.1117/12.783100.
 173. Hupel C., Kuhn S., Hein S. [et al.]. MCVD based fabrication of low-NA fibers for high power fiber laser application // Proceedings Advanced Solid State Lasers Conference (ASSL). 2015. Article ID AM4A.2. DOI: 10.1364/ASSL.2015.AM4A.2.
 174. Дифракционная компьютерная оптика / Д. Л. Головашкин, Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский, В. В. Котляр, В. С. Павельев, Р. В. Скиданов, В. А. Сойфер, С. Н. Хонина, под ред. В.А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с. ISBN: 5-9221-0845-4.
 175. Staton R., Pawlak R. Laser weapon system (LAWS) adjunct to the close-in weapon system (CIWS). Naval surface warfare center Dahlgren DIV VA, 2012. URL: https://archive.org/download/DTIC_ADA557757/DTIC_ADA557757.pdf (дата обращения 23.10.2024).

176. Brocklesby W. S. [et al.]. ICAN as a new laser paradigm for high energy, high average power femtosecond pulses // *The European Physical Journal Special Topics*. 2014. Vol. 223(6). P. 1189–1195. DOI: 10.1140/epjst/e2014-02172-4.
177. Gross W., Böhler J., Twizer K. [et al.]. Determination of target detection limits in hyperspectral data using band selection and dimensionality reduction // *Proceedings of SPIE*. 2016. Vol. 9997. Article ID 99970H. DOI: 10.1117/12.2240931.
178. Vöggtli M. [et al.]. A multi-scale and multi-temporal hyperspectral target detection experiment – From design to first results // *IGARSS 2020 – 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2020. P. 660–663. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323269.
179. Gross W. [et al.]. A multi-temporal hyperspectral target detection experiment: Evaluation of military setups // *Proceedings of SPIE*. 2021. Vol. 11865. Article ID 1186506. DOI: 10.1117/12.2597991.
180. Maathuis B. H. P., van Genderen J. L. A review of satellite and airborne sensors for remote sensing based detection of minefields and landmines // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25(23). P. 5201–5245. DOI: 10.1080/01431160412331270803.
181. Мультиспектральный интеллектуальный мониторинг природной и техногенной среды / С. А. Барталев, Е. В. Бурнаев, В. С. Верба, Н. А. Ивлиев, Н. Л. Казанский, А. Ф. Каперко, Е. А. Лупян, А. В. Никонов, Р. В. Скиданов, А. А. Черниенко. Самара, Новая техника, 2023. ISBN: 978-5-88940-164-3.
182. Shimoni M., Haelterman R., Perneel C. Hyperspectral imaging for military and security applications: Combining myriad processing and sensing techniques // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019. Vol. 7(2). P. 101–117. DOI: 10.1109/MGRS.2019.2902525.
183. Laplante P.A., Neill C. A class of Kalman filters for real-time image processing // *Proceedings of SPIE*. 2003. Vol. 5012. P. 22–29. DOI: 10.1117/12.477499.
184. Validating requirements for fault tolerant systems using model checking / F. Schneider, S. M. Easterbrook, J. R. Callahan, G. J. Holzmann // *Proceedings of IEEE International Symposium on Requirements Engineering: RE '98*. 1998. P. 4–13. DOI: 10.1109/ICRE.1998.667803.
185. Biemond J., Riesek J., Gerbrands J. J. A fast Kalman filter for images degraded by both blur and noise // *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1983. Vol. 31(5). P. 1248–1256. DOI: 10.1109/TASSP.1983.1164186.
186. Xie X., Sudhakar R., Zhuang H. Real-time eye feature tracking from a video image sequence using Kalman Filter // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1995. Vol. 25(12). P. 1568–1577. DOI: 10.1109/21.478445.

187. Lippiello V., Siciliano B., Villani L. A new method of image features pre-selection for real-time pose estimation based on Kalman filter // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2002. P. 372–377. DOI: 10.1109/IRDS.2002.1041417.
188. Разработка алгоритма многообъектного трекинга с необучаемыми признаками сопоставления объектов / В. А. Горбачев, В. Ф. Калугин // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 6. С. 1002-1010. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1275.
189. Piovoso M., Laplante P. A. Kalman filter recipes for real-time image processing // Real-Time Imaging. 2003. Vol. 9(6). P. 433–439. DOI: 10.1016/j.rti.2003.09.005.
190. Василюк Н. Н. Коррекция вращательного смаза в изображениях звёзд, наблюдаемых астроинерциальным датчиком ориентации на фоне дневного неба // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 1. С. 79-91. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1141.
191. Сойфер В. А., Фурсов В. А., Харитонов С. И. Калмановская фильтрация одного класса изображений динамических объектов // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23, № 4. С. 953–968. DOI: 10.15622/ia.23.4.1.
192. Фильтр Калмана–Бьюси: Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация / К. Браммер, Г. Зиффлинг; пер. с нем. В. Б. Колмановского. Москва: Наука, 1982. 199 с.
193. Fang X., MacDonald K., Zheludev N. Controlling light with light using coherent metadevices: All-optical transistor, summator and inverter // Light: Science & Applications. 2014. Vol. 4. Article ID e292. DOI: 10.1038/lsa.2015.65.
194. Koch T. L. Optical fiber telecommunications IIIA (Volume 3A). Academic Press, 1997. P. 265–301. ISBN: 9780123951700.
195. Meshcheryakov R. Control of hyperlinked cyber-physical systems. In: Proceedings of 14th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” / ed. by A. Ronzhin, V. Shishlakov. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. P. 27–33. DOI: 10.1007/978-981-13-9267-2_3.
196. Дудоров Е.А. Робототехнические системы космического назначения // Космическая техника и технологии. 2022. № 3(38). С. 66–81.
197. SAE Levels of Driving Automation. URL: <https://www.sae.org/blog/sae-j3016-update> (дата обращения 3.11.2024).
198. Кутахов В. П., Мещеряков Р. В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: Постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 67–74. DOI: 10.25728/ru.2022.1.5.

199. Вольф Д. А., Александров В. А., Резков И. Г. Автоматизация поведения пилота БПЛА с применением отечественного микроконтроллера // Промышленные АСУ и контроллеры. 2023. № 3. С. 9–16. DOI: 10.25791/asu.3.2023.1421.
200. Алгоритмическое обеспечение интерфейса управления робот-человек при выделении зрительных вызванных потенциалов на основе многомерного индекса синхронизации / Я. А. Туровский, С. С. Харченко, Р. В. Мещеряков, А. Ю.Исхаков, А. О. Исхакова // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1(211). С. 66–78. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-1-66-73.
201. Мамченко М. В., Зорин В. А., Романова М. А. Эмпирическая модель расчета затухания сигнала с учетом коэффициента застройки местности для беспилотных транспортных средств // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 1(105). С. 59–72. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-59-73.
202. Мещеряков Р. В., Туровский Я. А. Перспективные направления развития человеко-машинных интерфейсов // В сборнике: Информационные технологии в науке, образовании и производстве (ИТ-НОП-2023). Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. Белгород, 2023. С. 23–29.
203. Мещеряков Р. В., Вольф Д. А., Туровский Я. А. Автокодировщик электрической активности головного мозга человека // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2023. Т. 15, № 1. С. 34–42. DOI: 10.14529/mmph230104.
204. Implementation of robot–human control bio-interface when highlighting visual-evoked potentials based on multivariate synchronization index / S. Kharchenko, R. Meshcheryakov, Y. Turovsky, D. Volf // In: Proceedings of 15th International Conference on Electromechanics and Robotics “Zavalishin's Readings” / ed. by A. Ronzhin, V. Shishlakov. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021. P. 225–236. DOI: 10.1007/978-981-15-5580-0_18.
205. Туровский Я. А., Кургалин С. Д., Борзунов С. В. Оценка скорости работы нейрокомпьютерного интерфейса, реализованного с использованием гибридного интеллекта // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2023. Т. 25, № 3. С. 30–40.

4 ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА КИБЕРФОТОНИКИ

4.1 Дизайн наноструктур и создание компонентов фотоники

4.1.1 Проектирование компонентов фотоники

Характерные размеры создаваемых оптических структур относительно длины волны излучения определяют методы, которые необходимо использовать при их расчёте и моделировании. Для расчёта структур с характерными размерами в сотни микрометров (обычно это оптический и инфракрасный диапазон частот) достаточно методов на основе скалярной теории дифракции света [1–3]. В частности, эти методы применяются для расчёта и моделирования дифракционных оптических элементов (ДОЭ) инфракрасного диапазона (см. таблицу 4.1). Для компонентов нанофотоники с характерными размерами элементов дифракционного микро- или нанорельефа в десятки нанометров используются методы на основе строгой электромагнитной теории (см. таблицу 4.1), а для компонентов фотовольтаики используются подходы в рамках квантовой теории линейного взаимодействия электромагнитного излучения в области оптического и ближнего УФ-диапазонов с электронной системой функциональных материалов с перовскитной структурой [4, 5]. Методы квантовой механики необходимо также использовать, если мы исследуем падение на оптическую наноструктуру одиночных фотонов [6].

Методы проектирования структур нанофотоники основаны на численном решении уравнений Максвелла [7–22], а также, в случае элементов фотовольтаики, на решении уравнения Шредингера с использованием различных одночастичных аппроксимаций (Хартри–Фока, Кона–Шэма) [4, 5] и современных пакетов компьютерных программ. За основу также берутся метод разложения по пло-

ским волнам, а также векторные интегралы Рэлея–Зоммерфельда, формализм Ричардса–Вольфа и многое другое. Методы должны обеспечивать решение обратной задачи теории дифракции с учётом возможности технологической реализации рассчитанной структуры, для чего используются градиентные и стохастические методы оптимизации (в частности, генетические алгоритмы), позволяющие заменить решение обратной задачи на многократное решение прямых задач. Высокая вычислительная сложность таких методов оптимизации предполагает использование новых технологий параллельных и векторных вычислений [23–25].

В предыдущих монографиях нашего коллектива [2, 3, 7–22] подробно описаны разнообразные методы проектирования, расчёта, моделирования и оптимизации оптических наноструктур и компонентов фотоники. Схематично последовательность действий можно описать следующим образом.

Для создания дифракционных оптических элементов с недостижимыми в классической оптике свойствами надо решить некорректную обратную задачу теории дифракции [2, 3, 7–22]. Для каждого класса таких задач и для интересующего диапазона параметров оптической схемы выбираются физическое приближение и необходимые уравнения, а также формулируются граничные условия. На рисунке 4.1 представлен пример постановки одного из вариантов этой задачи для пропускающего оптического элемента с аксиальной симметрией. В данном случае на дифракционный оптический элемент, расположенный в плоскости $\mathbf{u}=(u, v)$ и имеющий фазовый микрорельеф высотой $h(\mathbf{u})$, падает электромагнитное поле, описываемое комплексной амплитудой $W_0(\mathbf{u})$. Необходимо рассчитать такой микрорельеф $h(\mathbf{u})$, чтобы выходное поле $W(\mathbf{x}, z)$ обладало требуемыми свойствами. Здесь $\mathbf{x}=(x, y)$ – декартовы координаты в фокальной плоскости, расположенной на расстоянии f_0 от оптического элемента. Задача проектирования касается получения (непосредственно сразу за поверхностью оптической наноструктуры или

в фокальной области оптического элемента) волнового фронта с требуемыми оптическими свойствами, например:

- 1) заданного распределения интенсивности света в фокальной области $I_d(\mathbf{x}, z) = |W_d(\mathbf{x}, z)|^2$, или
- 2) требуемой формы волнового фронта (т.е. заданной фазы выходного поля $\varphi_d(\mathbf{x}, z) = \arg\{W_d(\mathbf{x}, z)\}$), или
- 3) заданных амплитуды и фазы выходного поля $W_d(\mathbf{x}, z)$.

Одним из вариантов задачи 3 может быть осуществление математически заданного преобразования падающего волнового фронта, например, формирование волнового фронта, огибающая которого описывается функцией, являющейся преобразованием Лапласа, производной или интегралом огибающей падающего пучка [15, 19, 26–28]. Технологические нюансы расчёта и изготовления дифракционного микрорельефа вносят свои ограничения на класс возможных решений. Например, использование литографических методов [7, 8, 29] обеспечивает формирование кусочно-постоянного микрорельефа, что математически приводит к квантованию фазовой функции ДОЭ и задача формирования требуемого распределения интенсивности записывается как минимизация функционала невязки

$$\min_{h(\vec{u}) \in H} \varepsilon(h) = \min_{h(\vec{u}) \in H} \left\| |W_h(\vec{x}, z)|^2 - I_d(\vec{x}, z) \right\|_{(\vec{x}, z) \in D} \quad (4.1)$$

в классе дискретных функций

$$H = \left\{ h_i = \frac{1}{M} \frac{i\lambda}{n-1}, \quad i = 1, 2, \dots, M \right\} \quad (4.2)$$

методами математического программирования. Здесь λ – длина волны падающего поля (монохроматического пучка), n – показатель преломления материала ДОЭ, M – число уровней квантования микрорельефа (фазы), D – фокальная область, $W_h(\mathbf{x}, z)$ – поле в фокальной области, получающееся при падении поля $W_0(\mathbf{u})$ на ДОЭ с микрорельефом $h(\mathbf{u})$.

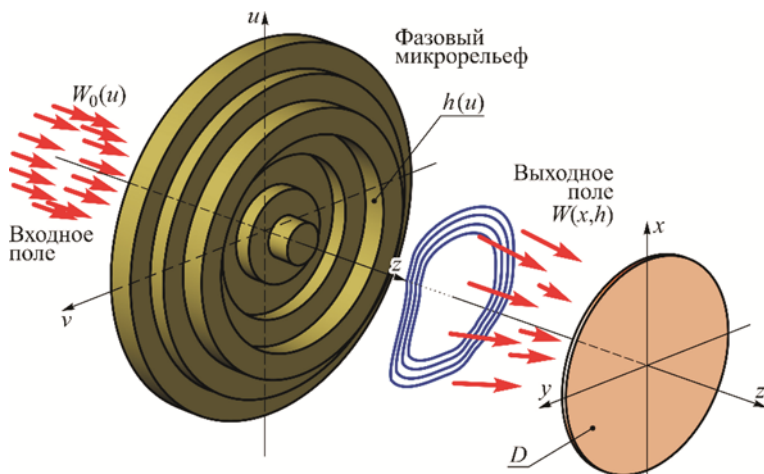


Рисунок 4.1 – Постановка обратной задачи теории дифракции для нахождения границ и профиля зон ДОЭ

Решение задач 2 или 3 приводит к другой записи функционала невязки, а использование альтернативных методов формирования дифракционного микрорельефа [7, 8, 29–42] – к другим ограничениям на класс возможных решений.

При этом одно из основных узких мест – перевод результатов расчёта в физическую форму, именно прогресс в этой области, использование достижений электронной, лазерной и рентгеновской литографии для записи рассчитанных шаблонов оптических элементов позволили перейти к использованию дифракционных оптических элементов ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов и к созданию дифракционных компонентов и устройств нанофотоники [10–22] (см. таблицу 4.1).

В нашем коллективе [42, 43] мы по-прежнему используем лучевой расчёт в рамках геометрической оптики для проектирования оптической части светодиодных устройств [7, 8, 44–48], ряда длиннофокусных ДОЭ. Мы использовали и продолжаем использовать приближение скалярной теории дифракции для итерационного расчёта ДОЭ и анализа новых типов ДОЭ [7–22]. Отдельное на-

правление моделирования связано с анализом новых методов и устройств формирования дифракционного микрорельефа [49, 50]. Но основным инструментом для проектирования и численного исследования элементов микрооптики и дифракционной нанофотоники является решение уравнений Максвелла [7–25].

Таблица 4.1 – Разрешение устройств записи и физическое приближение, используемое для моделирования

Тип оптического элемента	Тип устройств записи информации	Разрешение устройства записи	Физическое приближение. Математический аппарат
Фокусаторы излучения CO ₂ -лазеров	Фотопостроители	10–50 мкм	Геометрическая оптика. Уравнение эйконала
ДОЭ видимого и ближнего ИК-диапазона	Устройства лазерной записи	0,5–2 мкм	Скалярная теория дифракции. Уравнение Кирхгофа
Короткофокусные ДОЭ и ДОЭ ультрафиолетового диапазона, оптические наноструктуры	Электронные и лазерные литографы, ионный пучок	10–50 нм	Электромагнитный расчет. Уравнения Максвелла
Квантовая оптика, фотовольтаика	Рентгеновская литография	1–10 нм	Квантовая механика. Уравнение Шредингера

В нашем коллективе [42, 43] мы исследуем основные методы решения уравнений Максвелла применительно к задачам микрооптики и дифракционной нанофотоники [7–25]. Наиболее универсальным является подход, основанный на разностном решении уравнений Максвелла (FDTD-метод). Основные проблемы при разностном решении уравнений Максвелла в микрооптике связаны с заданием граничных и излучающих условий, а также с гигантским объемом вычислений. Мы предложили численный способ задания

прозрачного излучающего условия, который имеет меньшую вычислительную сложность (за счёт адаптации к задачам микрооптики) и не порождает несуществующих в природе отражённых волн [51]. При такой записи прозрачного излучающего условия мы предложили эффективный метод декомпозиции сеточной области для распараллеливания вычислений [52], который требует в несколько раз меньшее количество операций, чем существующие аналоги. Разработанная информационная технология позволила исследовать ряд проблем микрооптики. Достоинством разностных схем является возможность анализа переходных процессов. Примеры расчёта дифракции плоской волны на цилиндрической, дифракционной и бинарной линзах показывают [7–15], что технология моделирования позволяет исследовать изменения процесса во времени, как волна стабилизируется и выявляется область фокуса. При этом учитываются все отражения, включая многократные – от входной и выходной поверхностей линзы. Развиваемые подходы позволили уже конце 90-х годов прошлого века перейти к электромагнитному расчёту дифракционных оптических элементов [53, 7–15].

Для эффективного применения методов численного решения уравнений Максвелла мы адаптировали наши параллельные алгоритмы для использования на графических вычислительных устройствах [23, 24] и в облачных технологиях [25]. Мы подбирали соответствующие вычислительные платформы для реализации разработанных алгоритмов. Специфика решаемых задач в ходе создания и исследования дифракционных оптических элементов и компонентов нанофотоники диктует требования к организации вычислительных ресурсов и единого информационного пространства. При этом работа с большими массивами изображений приводит к необходимости развивать кластеры, состоящие из модулей с большими графическими платами, и реализовывать соответствующие информационные технологии. Развиваемые подходы и программное обеспечение ориентированы на трансформацию интенсивных по

вычислениям методов и алгоритмов в методы и алгоритмы, интенсивные по обработке данных [25].

Следующим этапом создания компонента нанофотоники после расчёта дифракционного микрорельефа или оптической наноструктуры должен быть расчёт, учитывающий конкретные размеры изготавливаемого оптического элемента и эффекты дифракции на его апертуре. Обычно такие оценки приходится получать в рамках скалярной теории дифракции. Заключительным этапом проектирования является расчёт и моделирование оптического устройства в целом, с учётом полученных ранее характеристик входящих в него компонентов нанофотоники. Этот этап обычно выполняется на основе лучевого расчёта в приближении геометрической оптики [1], геометрической [54] или скалярной [55, 56] теории дифракции.

В последние годы появились публикации, в которых для оптимизации функционирования нанофотонных устройств применяются методы искусственного интеллекта [57–64], что требует использования ещё более мощных вычислительных систем и длительного времени расчёта.

4.1.2 Используемое программное обеспечение

При проектировании оптических наноструктур, дифракционных оптических элементов, компонентов нанофотоники и оптических устройств мы опираемся как на имеющиеся в нашем распоряжении коммерческие программные пакеты (OlympIOs, TraceProExpert, FRED, FullWAVE, FIMMWAVE, BeamProp, Comsol Multiphysics, Ansys Lumerical), так и на программные комплексы, разработанные в Самарском университете и ИСОИ РАН: QUICK-DOE, ITER-DOE, Grating 2D, Grating 3D, DiffractMOD, GratingMOD, DOE, HyperSc, Harmony и др. Создание любого проектируемого оптического элемента или устройства начинается с расчёта и тщательного предварительного моделирования [55].

Кратко остановимся на описании и некоторых результатах использования имеющихся программных продуктов.

В начале 90-х годов в ИСОИ РАН было разработано программное обеспечение (ПО) по компьютерной оптике “Quick-DOE” [7, 8, 65, 66], позволяющее рассчитывать дифракционные оптические элементы с аналитически задаваемой функцией комплексного пропускания: дифракционные линзы; дифракционные призмы; фокусаторы в круг, прямоугольник, отрезок; элементы, предназначенные для формирования мод Гаусса–Эрмита и Гаусса–Лагерра, и другие. Для кодирования функции комплексного пропускания в чисто амплитудную или чисто фазовую функцию были реализованы методы кодирования, основанные на модуляции введённой несущей (метод Кирка–Джонса и метод Хсу–Савчука) [7, 8]. ПО обладает возможностями для вывода рассчитанных массивов значений фазовой или амплитудной функции пропускания элементов в растровом формате представления данных, имеется возможность генерации комплекта фотошаблонов для реализации рассчитанных дифракционных оптических элементов с помощью технологий микролитографии. Для моделирования работы рассчитанных дифракционных оптических элементов ПО включало в себя возможности выполнения быстрого преобразования Фурье (БПФ) и алгоритма трассировки лучей. ПО использовалось при выполнении ряда НИР и хозяйственных работ ИСОИ РАН, при расчёте оптических элементов и устройств, некоторые из которых описаны в монографиях [7–11].

Программа DOE предназначена для расчёта вихревых оптических элементов: для формирования простых вихревых пучков, пучков Бесселя, пучков Гаусса–Лагерра. Позволяет рассчитывать гибридные аксиконы для формирования суперпозиций вихревых пучков. Позволяет кодировать разными типами несущей частоты полутонные элементы и формировать бинарные фазовые распреде-

ления. Позволяет моделировать распространение пучков в свободном пространстве.

Программа DOE позволила рассчитать уникальные по свойствам световые ловушки для захвата микрочастиц [67, 68] и гибридные аксиконы, способные различными способами формировать пучки Бесселя [69].

Программа HyperSc предназначена для сборки, просмотра и анализа гиперспектральных изображений [70]. Позволяет проводить сравнение с эталонным спектром. Рассчитывает индексное изображение на основе произвольной разностной индексной формулы. Считает наиболее распространённые вегетационные индексы. Программа HyperSc использовалась при обработке результатов космического эксперимента по ДЗЗ со спутника ИСОИ [71] и при обработке результатов экспериментов по визуализации подкожных вен [72].

Программа Harmony позволяет моделировать и оптимизировать оптические изображающие осесимметричные системы, состоящие из рефракционных и гармонических линз. Определяет основные характеристики оптической системы: функцию рассеяния точки (ФРТ), частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), фокальный хроматический сдвиг. ФРТ представляется в виде полутонového изображения заданной размерности. Оптимизация осуществляется в том числе на отдельных дифракционных зонах гармонических линз. Программа Harmony позволила рассчитать оптическую систему гибридного рефракционно-дифракционного объектива, в котором дифракционная линза одновременно компенсирует хроматические аберрации и внеосевые аберрации [73].

В рамках электромагнитной теории света разработан и реализован в виде программных модулей ряд методов моделирования распространения света через оптические структуры с субволновыми размерами их элементов: метод конечных элементов [74, 75], комбинация метода конечных элементов и граничных элементов [76]

для конечно-размерных структур в свободном пространстве, комбинация метода конечных элементов и периодических граничных условий [77] для периодических структур. Для расчёта слоистых структур эффективно реализован метод передаточных матриц 2×2 [78, 79]. Для моделирования резонансных характеристик и описания возникновения асимметричных резонансов Фано в спектрах резонансных структур фотоники в рамках теории связанных мод разработаны и запрограммированы методы связанных мод для плазмоники [80, 81] и интерференционных резонаторов [82, 83].

В ходе научных исследований нашего коллектива широко применялся коммерческий программный пакет Comsol Multiphysics [<https://www.comsol.com>]. В данном пакете реализовано численное решение векторных уравнений Максвелла методом конечных элементов. Помимо этого, пакет предоставляет широкие возможности для создания и обработки геометрических моделей, наложения триангулярных и тетраэдрических сеток, задания граничных и начальных условий, обработки полученных решений.

С использованием этого пакета спроектированы кремниевые метаповерхности, основанные на субволновых решётках, которые позволяют создавать и фокусировать цилиндрические векторные пучки различных порядков как терагерцового [84], так и видимого [85] диапазонов. С помощью пакета Comsol проведено численное моделирование и показана эффективность работы предложенных элементов. Учёт векторного характера электромагнитных полей позволяет точно рассчитывать направления распространения энергии, в частности, в работе [86] показана возможность создания обратной плотности потока мощности с помощью субволновых решёток с кривыми гребнями.

Одним из наиболее широко изучаемых классов резонансных структур фотоники являются периодические структуры, в частности, дифракционные решётки или т.н. фотонно-кристаллические слои (ФКС) [87, 88]. ФКС представляют собой планарные структу-

ры с одномерной или двумерной периодичностью. Для таких структур было разработано несколько эффективных численных методов решения уравнений Максвелла [89–92]. Среди наиболее часто используемых и эффективных методов – строгий метод связанных волн (англ. *rigorous coupled-wave analysis, RCWA*), также называемый методом фурье-мод (МФМ; англ. *Fourier modal method, FMM*). В своей простейшей формулировке метод предназначен для моделирования дифракции плоских волн на бинарных дифракционных решётках с одномерной периодичностью [89]. За прошедшие годы были предложены многочисленные усовершенствования метода, касающиеся, с одной стороны, численной устойчивости, сходимости и вычислительной эффективности [93, 94], а с другой стороны, расширения применимости метода для моделирования многослойных структур [95, 96], структур с двумерной периодичностью [97, 98] и анизотропных структур [98].

МФМ также позволяет вычислять собственные моды структуры. В рамках подхода, основанного на МФМ, собственные моды могут быть вычислены как полюсы матрицы рассеяния [99, 100] с использованием различных численных методов [100–104]. Эти методы могут быть использованы для вычисления комплексных волновых чисел мод с действительной частотой, комплексных частот квазиволноводных мод (мод с действительным волновым числом) и распределений электромагнитных полей мод. Моды с комплексными волновыми числами затухают в пространстве и позволяют описывать резонансные особенности в угловом спектре [105], тогда как моды с комплексными частотами, затухающие во времени, широко используются для описания резонансов в частотном спектре [99, 102].

Важной вехой в развитии семейства МФМ-методов стала разработка непериодического МФМ (англ. *aperiodic FMM, AFMM*) [106, 107]. В непериодическом МФМ в вычислительную ячейку структуры добавляются так называемые идеально согласованные

поглощающие слои (англ. *perfectly matched layers, PML*) для оптической изоляции соседних периодов [106–108]. Это позволяет применять метод для решения задач интегральной оптики. Недавно предложенная формулировка контрастного поля для непериодического МФМ позволяет моделировать дифракцию плоских волн на изолированных непериодических оптических структурах [109, 110]. Также стоит упомянуть модификацию этого метода для расчёта локализованных собственных мод интегральных оптических резонаторов [111] и дифракционных решёток с большим периодом [112].

Существует ряд открытых [113–116] и коммерчески доступных [117–120] реализаций метода фурье-мод. Коллектив авторов использует собственную реализацию методов работ [89, 93, 95–98, 100, 111, 112] в математическом пакете MATLAB. С использованием данной реализации были исследованы различные резонансные структуры фотоники, включающие резонансные дифракционные решётки для аналоговых оптических вычислений [121–122, 28], структуры, в которых существуют высокочастотные резонансы и связанные состояния в континууме [123–127], а также резонансные структуры интегральной фотоники для волноводных мод и поверхностных электромагнитных волн [123, 126, 128–133].

Пакет Ansys Lumerical компании Ansys реализует решение уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области. Характеризуется широкими возможностями по гибкому заданию структур, на которых дифрагирует электромагнитное излучение, падающей волны, сеточной области, краевых условий, форматов ввода-вывода данных, допуская при этом работу с графическим либо программным интерфейсом. Последний и используется в наших исследованиях при решении обратной задачи дифракции на различных фотонно-кристаллических структурах.

В частности, в работе [134] предлагаются несколько интерференционных логических элементов на основе Y-образной структуры, реализующих операции «AND» и «NOT», составляющие полный ба-

зис. Демонстрируется возможность комбинации таких элементов для производства других логических операций.

В работе [135] с помощью генетического алгоритма значительно повышается эффективность логического элемента «NOT» из предыдущей статьи, что открывает возможность каскадирования элементов, производящих элементарные операции, без значимых энергетических потерь.

Разработка эффективных численных методов и алгоритмов решения интегральных и дифференциальных уравнений теории дифракции позволяет выполнять быстрый предварительный расчёт и возможность оптимизации характеристик рассчитываемых оптических структур. После этого возможно уточнение полученного результата на основе численного решения уравнений Максвелла, которое нецелесообразно применять на предварительных этапах расчёта, так как применение метода конечных разностей во временной области (FDTD) или метода конечных элементов (FEM) требует не только большого объёма привлечённых высокопроизводительных вычислительных ресурсов (в том числе графических ускорителей и облачные технологии), но и значительных временных затрат.

Программа для моделирования распространения векторного лазерного излучения в свободном пространстве с использованием ускоренного интегрального преобразования Рэлея–Зоммерфельда предназначена для численного расчёта распространения векторного монохроматического поля в ближней и средней зоне дифракции с использованием ускоренного интегрального преобразования Рэлея–Зоммерфельда. Ускорение достигается учётом различных вариантов симметрии, а также учётом соотношения размера дискретных ячеек в исходной и целевой области и позволяет быстро рассчитать интенсивность поля [136–141] в фокальной области вихревых лазерных пучков (рисунок 4.2).

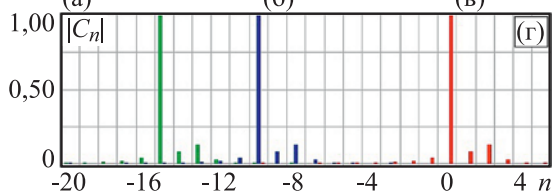
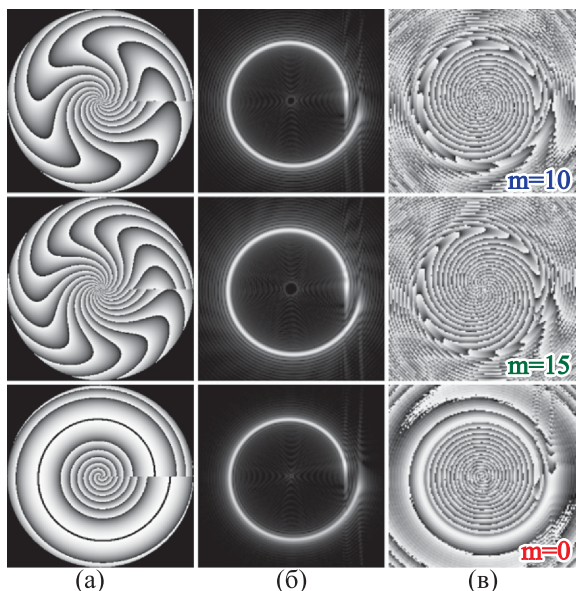


Рисунок 4.2 – Каустики спиральных пучков

Создана программа для моделирования распространения векторного лазерного излучения в анизотропных средах с использованием анизотропного аналога интегрального преобразования Рэлея–Зоммерфельда. Общие выражения получены для расчёта непараксиального распространения электромагнитных волн в анизотропных и гиротропных средах (рисунок 4.3). Интегральное выражение для сред с разделимостью продольных и поперечных компонент записано в завершённой аналитической форме. В частных случаях определённой симметрии тензоров диэлектрической и магнитной проницаемости анизотропной среды, а также в параксиальном приближе-

нии получены выражения в завершённой аналитической форме, что обеспечивает быстрый приближённый расчёт [142 – 146].

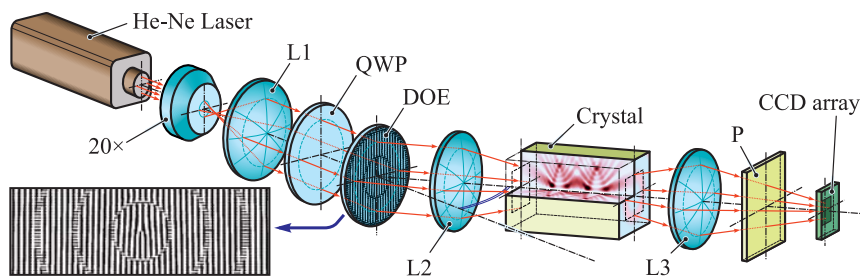


Рисунок 4.3 – Формирование цилиндрически поляризованных пучков с использованием анизотропных кристаллов

Программа для моделирования распространения векторного лазерного излучения на основе метода разложения по плоским волнам предназначена для численного расчёта распространения монохроматического поля как в ближней, так и дальней зоне дифракции на основе метода разложения по плоским волнам в векторном случае (рисунок 4.4).

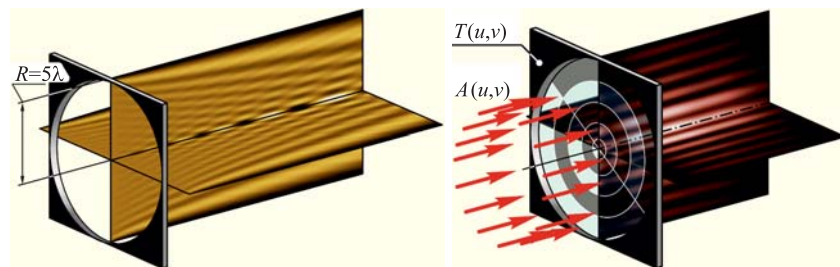


Рисунок 4.4 – Картины дифракции в ближней зоне дифракции при обычной апертуре (слева) и при аподизации бинарным асимметричным аксионом (справа)

Векторный вариант оператора распространения позволяет вычислять декартовы проекции комплексного поля. В реализации также предусмотрен учёт радиальной симметрии решаемых задач, а также использование алгоритма быстрого преобразования Фурье.

На основе разработанной программы выполнен расчёт электромагнитного поля при дифракции лазерного излучения на различных оптических элементах с высокой числовой апертурой [147–151]. Полученные результаты расчётов были полностью подтверждены при экспериментальной реализации.

Программное обеспечение для расчёта и оптимизации фокусирующих свойств оптических микроструктур на основе реализации дробного преобразования Фурье с переменным шагом предназначено для моделирования прохождения лазерных полей через линзовые оптические системы, а также распространения в градиентных параболических волноводах (рисунок 4.5). Моделирование распространения лазерных пучков с помощью дробного преобразования Фурье в градиентной среде обладает вычислительными сложностями на расстояниях, пропорциональных четверти периода, которое преодолевается за счёт варьируемого шага дискретизации [152–156].

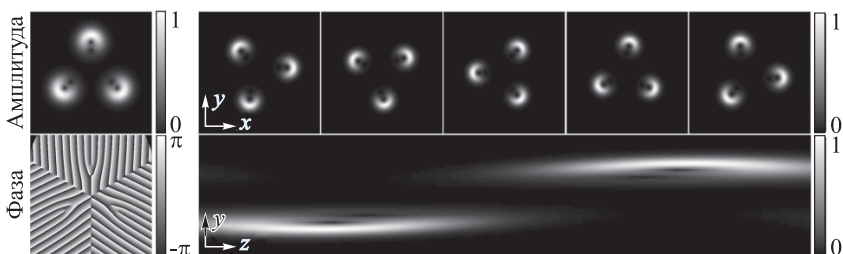


Рисунок 4.5 – Расчёт распространения кластеров вращающихся пучков в параболическом волокне

Программное обеспечение для расчёта и оптимизации фокусирующих свойств оптических микроструктур в приближении Дебая. В программной реализации учтена возможность сведения задачи к одномерному случаю для освещающих пучков, имеющих вихревую фазовую сингулярность (рисунок 4.6). Программа использована для расчёта острой фокусировки векторных пучков с различным состоянием поляризации, в том числе неоднородным, и расчёта оп-

тических полей, обеспечивающих преодоление дифракционного предела в фокальной области [157–161].

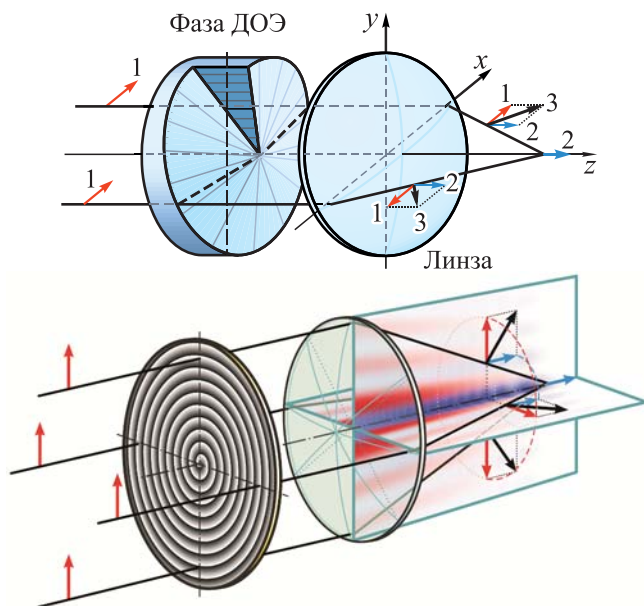


Рисунок 4.6 – Преодоление дифракционного предела за счёт внесения вихревой фазовой сингулярности в виде спиральной пластинки (сверху) или спирального аксикона (снизу), что усиливает продольную компоненту электрического поля

Программное обеспечение для расчёта и оптимизации субволновой локализации вихревого импульсного лазерного излучения на оптических нано- и микроструктурах. Программа предназначена для моделирования распространения вихревого импульсного лазерного излучения на оптических нано- и микроструктурах (рисунок 4.7). В программе реализовано моделирование различных типов импульсов, рассмотрены свойства их частотных спектров. Особенность данного программного обеспечения заключается в различиях, которые возникают при очень коротких длительностях (менее периода осцилляции) [162–167]. В этом случае спектр импульса Гаусса может вклю-

чать отрицательные частоты, поэтому рассматриваются другие типы (частотно-взвешенный Гауссов импульс, импульс Пуассона), свободные от данного недостатка.

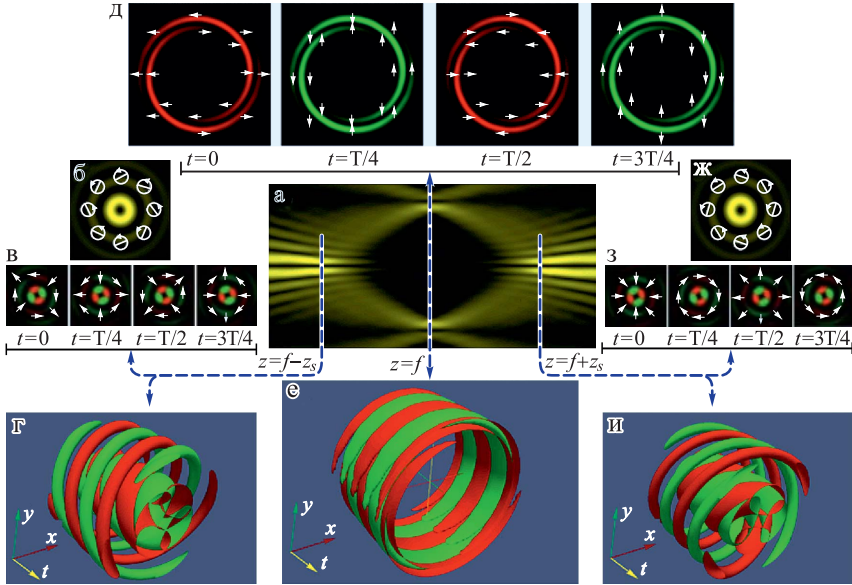


Рисунок 4.7 – Пространственно-временная динамика состояния поляризации при фокусировке лазерного пучка с круговой поляризацией с аподизацией бинарным спиральным аксиконом

4.2 Длинноволновая фотоника

В последние десятилетия шёл быстрый прогресс в области создания компактных и доступных источников излучения (в том числе когерентного) терагерцового (длина волны 30 мкм – 1 мм) и субтерагерцового (миллиметрового) диапазонов: первые гиротроны были созданы советскими учеными в середине 60-х [168], после чего гиротроны постоянно совершенствовались, становясь более компактными и мощными [169, 170]; в начале XXI века появились полупроводниковые терагерцовые источники [171, 172]. Это при-

вело к активному применению методов фотоники [173] и методов обработки изображений [174], ранее разработанных и исследованных в оптическом диапазоне, для создания терагерцовых и субтерагерцовых систем. Замечательные свойства излучения в этих диапазонах (прозрачность большинства диэлектриков, наличие спектральных линий важных химических соединений) стимулировали применение таких систем для решения задач биомедицины [174], дефектоскопии [174], интроскопии [175], спектроскопии [176], материаловедения [174], а также для построения систем безопасности [174], систем ДЗЗ и лидарных систем [177]. Безопасность терагерцового диапазона для здоровья человека позволяет рассматривать оптические системы этого диапазона в качестве альтернатив досмотровым системам рентгеновского диапазона [174]. Освоение связистами терагерцового диапазона [178, 179] (в частности, предполагается использование этого диапазона в сетях 6G) также стимулирует развитие терагерцовой и субтерагерцовой фотоники в дополнение к ставшим традиционными методам СВЧ-радиотехники, применяемым в связной аппаратуре. Методы расчёта элементов фотоники терагерцового и субтерагерцового диапазона в большой степени заимствованы из фотоники оптического диапазона. Конкретные прикладные задачи предъявляют свои требования к мощности и длине волны используемого излучения. Мощность и длина волны определяют выбор используемых оптических материалов, а выбор материала, в свою очередь, определяет выбор технологии изготовления оптических элементов. Для изображающих систем терагерцового и субтерагерцового диапазона, в которых используются источники относительно небольшой мощности, широко применяются пассивные оптические элементы из полимеров, изготовленные с помощью 3D-печати [180] и горячей штамповки [181].

Оптические методы успешно используются также в задачах управления мощным когерентным излучением современных гироскопов, применяемых для обработки металлов, стимулирования

роста кристаллических материалов и решения задач ядерной физики [182]. Наличие уникальных установок терагерцового диапазона [183, 184], например, Новосибирского лазера на свободных электронах (НЛСЭ) [183] (первая очередь была запущена в 2003 году), позволяющих получить мощное когерентное терагерцовое излучение на заданной длине волны, позволяет проводить широкий круг исследований фундаментального и прикладного характера.

Методы фотоники терагерцового диапазона (включающие методы терагерцовой голографии и дифракционной оптики) также хорошо зарекомендовали себя при работе на таких установках в решении задач формирования полей заданной структуры на заданной длине волны терагерцового спектра [180, 185]. Для создания оптических элементов, позволяющих управлять излучением мощного терагерцового лазера, необходимо использовать подложки из оптических материалов с высокой лучевой стойкостью и хорошим пропусканием в терагерцовом диапазоне. В [180, 185] для создания силовых терагерцовых элементов были использованы подложки из кристаллических материалов – высокоомного кремния (HRFZ-Si) и поликристаллических алмазных плёнок (АП), выращенных методом газофазного осаждения. Стоит отметить, что большая (по сравнению с оптическим диапазоном) длина волны излучения терагерцового источника позволяет использовать для изготовления элементов фотоники технологии, практически не применяемые в оптическом диапазоне, например, технологии «прямой записи» (*direct writing*) – технологию лазерной абляции поверхности кремния [180] и поверхности «чёрного алмаза» [186], технологию микрофрезерования металлической поверхности в создании отражающих элементов [187], 3D-печать полимерных матриц трёхмерных фотонно-кристаллических структур [180] и т.д. Это позволяет, в частности, создавать трёхмерные субволновые фотонные структуры терагерцового диапазона практически произвольной топологии. В некоторых случаях вызовы создания терагерцовой фотоники с за-

данными характеристиками выступают в качестве драйвера разработки технологий структурирования перспективных оптических материалов терагерцового и миллиметрового диапазонов. В частности, в работе [188] приведены результаты разработки и исследования в ИОФ РАН технологии формирования оптического микро рельефа терагерцового диапазона на поверхности алмазной плёнки. Сначала обращённый микро рельеф формировался на поверхности кремниевой пластины методом лазерной абляции, затем структурированная поверхность зарастивалась слоем поликристаллической алмазной плёнки методом газофазового осаждения, после чего слой кремния удалялся. Результаты исследования изготовленной алмазной дифракционной цилиндрической линзы [188] приведены на рисунке 4.8. Измеренное значение дифракционной эффективности цилиндрической линзы [188] составило 95 %.

В то же время для изготовления элементов силовой фотоники терагерцового диапазона (в том числе субволновых, когда характерный размер неоднородности микро рельефа меньше рабочей длины волны) успешно применяются технологии микро литографии, широко применяемые в фотонике оптического диапазона. Можно предположить, что с переходом в субтерагерцовый диапазон (т.е. с увеличением рабочей длины волны) технологии прямой записи будут приобретать большее значение.

В [180, 189] приведены результаты исследования дифракционных оптических элементов, позволяющих формировать мощные вращающиеся пучки (пучки с орбитальным угловым моментом) из освещающего гауссова пучка терагерцового лазера. Применение таких пучков позволяет повысить эффективность лидаров и систем дистанционного зондирования. В [180, 189] экспериментально показано (рисунок 4.9), что сформированные терагерцовые пучки с орбитальным угловым моментом обладают свойством «самовосстановления» после прохождения неоднородных сред, что важно при построении лидарных систем и систем ДЗЗ.

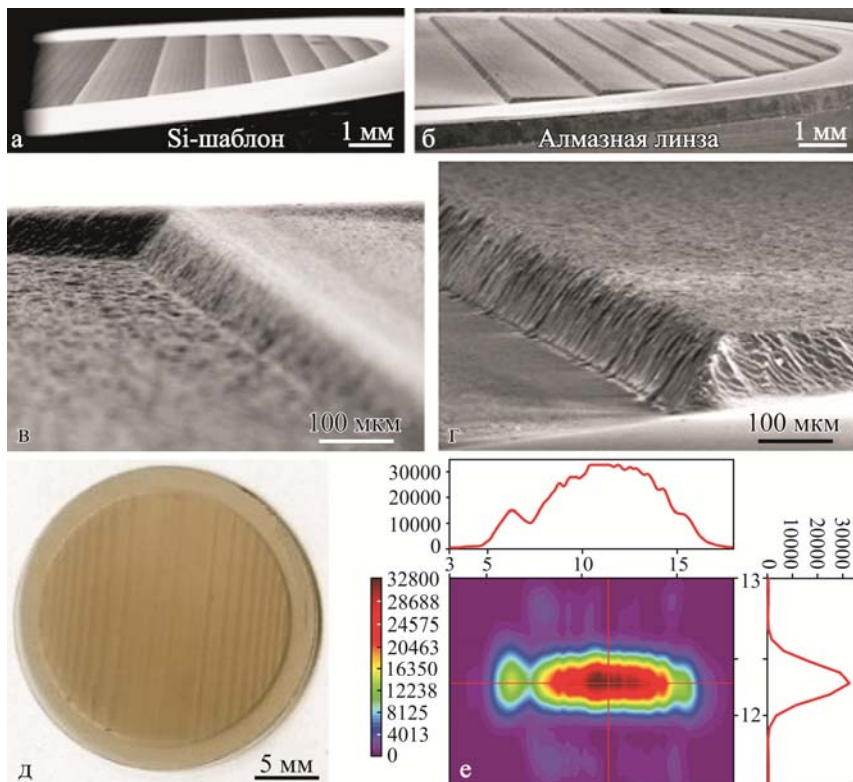


Рисунок 4.8 – Результаты электронной микроскопии поверхности кремниевого темплейта (а); поверхности изготовленной алмазной дифракционной цилиндрической линзы (б), (в), (г); фото изготовленной алмазной линзы (д), формируемое распределение интенсивности (е)

В процессе эксперимента сформированный терагерцовый лазерный пучок с орбитальным угловым моментом проходил через пенистую плёнку, игравшую роль неоднородной среды, после чего исследовалось поперечное распределение интенсивности зашумлённого пучка на различных расстояниях от плёнки (рисунок 4.9). Дифракционные оптические элементы [189] были изготовлены с помощью литографического травления поверхности кремния.

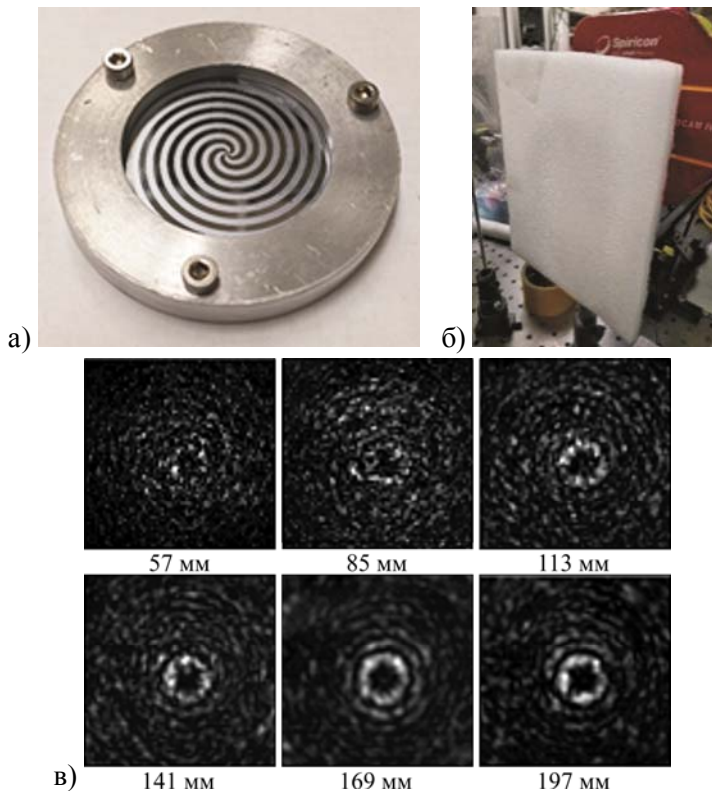


Рисунок 4.9 – Фото кремниевого дифракционного оптического элемента, формирующего терагерцовый лазерный пучок с орбитальным угловым моментом (а), пенная плёнка, использованная в эксперименте в качестве неоднородной среды (б), распределение интенсивности в сечении терагерцового пучка на разных расстояниях от плёнки (в)

В [180] приведены результаты исследования субволновых кремниевых элементов, предназначенных для одновременного управления поперечно-модовым составом когерентного терагерцового пучка и его поляризационным состоянием. На рисунке 4.10б приведён результат исследования микрорельефа такого изготовленного субволнового дифракционного элемента с помощью электронной микроскопии.

В [180, 190] приведены результаты исследования дифракционных оптических элементов, позволяющих формировать равномерное распределение интенсивности в заданной области фокусировки из когерентного терагерцового пучка; замена поточечного сканирования на фокусировку в равномерные области позволяет повысить эффективность сканирующих систем.

Важным аспектом развивающихся телекоммуникационных технологий терагерцового диапазона является их информационная безопасность. В [191] экспериментально показана возможность передачи нескольких независимых каналов связи в одном терагерцовом лазерном пучке, содержащем несколько разных мод (например, бесселевых мод с орбитальным угловым моментом), что открывает возможность некриптографической защиты информации (защита на физическом уровне).

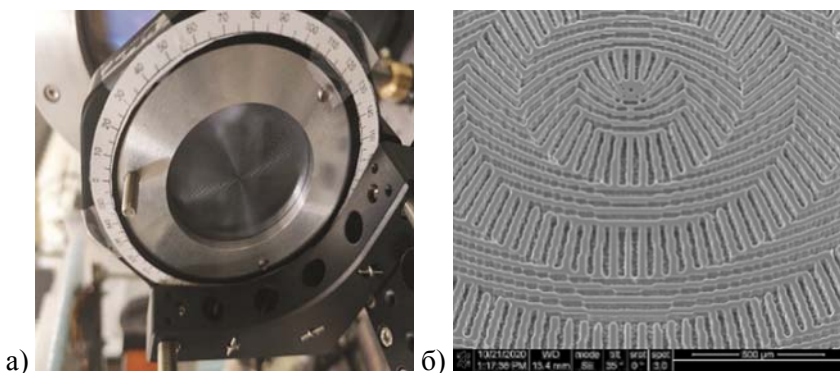


Рисунок 4.10 – Фото (а) и результат электронной микроскопии микрорельефа (б) изготовленного субволнового дифракционного элемента

Получить доступ к заданному каналу можно, лишь имея дифракционный оптический элемент, согласованный с одной модой (группой мод), связанной с этим каналом [173]. Такой подход к защите информации в системах связи представляется комплементарным по отношению к развиваемым ныне технологиям квантовых

коммуникаций [192]. Необходимо отметить, что возможность формирования субволнового микрорельефа терагерцового диапазона с высоким качеством, продемонстрированная в [180], позволяет в перспективе использовать для решения задач некриптографической защиты данных в лазерных системах терагерцового диапазона одновременно как управление поперечно-модовым составом пучка, так и управление его поляризационным состоянием одновременно.

Специфика терагерцового диапазона позволяет организовать мультиплексацию вращающихся поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) на поверхности металлического цилиндра, возбуждённых с помощью терагерцовых дифракционных оптических элементов, что было впервые экспериментально показано в [193]. Эти результаты дают основание полагать возможность построения многоканальных линий связи на основе терагерцовой плазмоники.

Другим важным применением таких установок, как Новосибирский лазер на свободных электронах [180], является натурное моделирование взаимодействия электромагнитной волны более коротковолнового диапазона с трёхмерной субволновой структурой сложной топологии [180], что важно, например, для разработки и исследования компонентов киберфотонных систем оптического диапазона. Возможности экспериментального исследования взаимодействия световой волны с субволновой двух- или трёхмерной структурой в оптическом диапазоне ограничены пространственным разрешением технологий микро- и наноструктурирования [9]. Терагерцовый лазер с перестраиваемой длиной волны позволяет исследовать дифракцию световой волны на объектах сложной топологии с существенно большим отношением длины волны к характерному размеру неоднородности, чем это возможно в оптическом диапазоне.

Возможность формирования практически произвольных двух- и трёхмерных субволновых структур терагерцового диапазона определила, в частности, создание терагерцовых метаповерхностей,

трёхмерных фотонно-кристаллических волноводов и фотонных квазикристаллов [180]. Таким образом, разработка технологий структурирования материалов терагерцового диапазона позволяет (кроме создания компонентов собственно терагерцовых киберфотонных систем) создавать экспериментальные стенды для исследования взаимодействия электромагнитной волны с различными субволновыми фотонными структурами с последующим «переносом» результатов в оптический диапазон. Примером применения такого подхода может служить экспериментальное исследование «квазитальботова эффекта» [194] – самовоспроизведения массивов пучков с орбитальным угловым моментом в плоскостях Тальбота при освещении дифракционной решётки исходным пучком с орбитальным угловым моментом. Впервые этот эффект наблюдался [194] в терагерцовом диапазоне с использованием излучения НЛСЭ и элементов, описанных в [180]. Впоследствии этот эффект наблюдался и в оптическом диапазоне [195].

Благодарности

В данном разделе представлены результаты, полученные при поддержке грантов РФФ № 19-72-20202 и № 19-12-00103, использованы также результаты экспериментов, выполненных в ИЯФ СО РАН с использованием оборудования ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Новосибирский ЛСЭ».

4.3 Элементы и устройства цифровой интегральной фотоники

Постоянно возрастающие запросы в области обработки информации [196], перспективное приближение проектных норм современной электроники к физическому пределу структурирования полупроводниковых материалов [197], а также запрос на создание

элементной базы информационных систем, неуязвимой к внешним электромагнитным воздействиям, стимулируют исследования в области разработки фотонных цифровых устройств и систем. Создание цифровых фотонных устройств позволит осуществлять обработку информации в распределённых чисто оптических телекоммуникационных системах без промежуточного преобразования оптического сигнала в электрический, а разработка интегральных элементов в планарном исполнении позволит использовать для их изготовления хорошо отработанные технологии полупроводниковой микроэлектроники [198]. Стоит отметить, однако, что специфика задач преобразования оптического сигнала и появление новых перспективных материалов фотоники (например, синтетических поликристаллических алмазных плёнок (АП) [199]) привели к использованию в качестве материала подложек элементов интегральной фотоники, кроме распространённого в микроэлектронике кремния таких материалов, как АП [200], материалов группы АЗВ5 [201] и других. Для структурирования этих материалов используются такие технологии, как литографическое травление [197], запись фокусированными ионными пучками [200], наноимпринтинг [202] и другие.

В качестве физической основы для создания фотонных цифровых элементов рассматривались как нелинейные эффекты, возникающие в различных материалах и структурах [201, 203], так и интерференционные и дифракционные эффекты в планарных волноводных структурах [204, 205, 134, 135]. При этом понятна привлекательность последнего подхода, связанная с уменьшением быстродействия элемента из-за времени протекания нелинейных процессов. В работах [206, 207] рассмотрено построение фотонных логических элементов на основе кольцевых микрорезонаторов. Недостатками таких элементов являются использование нелинейных эффектов и высокие требования к шероховатости стенок кольца для уменьшения рассеивания света. Общей проблемой элементов

интегральной оптики на низкоразмерных материалах [208] являются высокие требования к чистоте и качеству используемых наноматериалов. Применение диэлектрических субволновых структур – фотонных кристаллов – сильно расширило возможности управления излучением в планарных устройствах. Концепция фотонных кристаллов [209, 210] была предложена в конце 80-х годов прошлого века. Структура фотонного кристалла имеет пространственно-модулированную диэлектрическую постоянную среды, период модуляции которой сопоставим с длиной волны взаимодействующего излучения. У одномерных кристаллов коэффициент преломления периодически изменяется в одном пространственном направлении. Такие фотонные кристаллы состоят из параллельных друг другу слоёв различных материалов с разными коэффициентами преломления и могут проявлять свои свойства в одном пространственном направлении – перпендикулярно слоям. Примером одномерных фотонных кристаллов являются брэгговские структуры – периодические структуры из диэлектрических слоёв толщиной $\lambda/4$ с двумя различными показателями преломления. Двумерные фотонные кристаллы имеют коэффициент преломления, периодически изменяющийся в двух пространственных направлениях, и могут проявлять свои свойства также в двух пространственных направлениях [209] (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Одно-, дву- и трёхмерные фотонные кристаллы

Двумерные фотонно-кристаллические структуры реализуют в виде периодических массивов стержней из оптически плотного материала в воздухе или же в виде массива отверстий (каверн) в подложке из оптически плотного материала [204]. Формирование двумерных фотонно-кристаллических периодических структур со специально вносимыми дефектами позволяет создавать планарные волноводные структуры с заданными свойствами [209]. Фотонно-кристаллические двумерные волноводные структуры предлагают большую по сравнению со ступенчатыми волноводами [211] гибкость в управлении волноводным излучением и реализации преобразований светового поля, допускающих интерпретацию в качестве результата заданных вычислительных операций. При этом высокая оптическая плотность таких материалов, как кремний (показатель преломления $n=3,42$) и синтетический алмаз (показатель преломления $n=2,4$), позволяет формировать двумерные фотонно-кристаллические структуры «материал-воздух» с запрещённой зоной. На рисунке 4.12 приведён результат электронной микроскопии фотонно-кристаллического резонатора, реализованного в алмазной мембране толщиной 300 нм с помощью технологии фокусированных ионных пучков в Самарском университете [200]. Расчётный диаметр сквозных отверстий в мембране составлял 120 нм. Дефект в центре резонатора – неструктурированная область – играет роль рабочего тела резонатора, фотонно-кристаллические структуры по периметру резонатора играют роль зеркал. В [200] приведены результаты исследования созданного фотонно-кристаллического резонатора, подтверждающие его работоспособность.

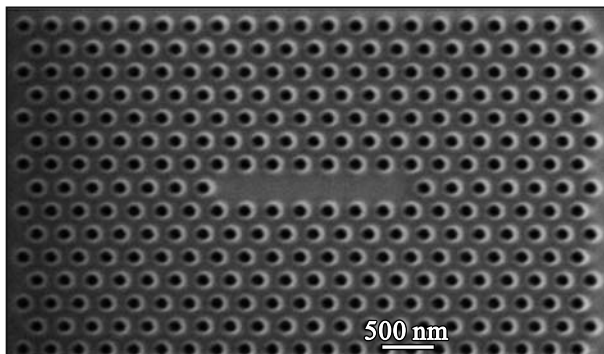


Рисунок 4.12 – Результат электронной микроскопии фотонно-кристаллического резонатора, реализованного в алмазной мембране

В работе [205] показана возможность достижения быстродействия порядка 1 Тб/с выполнения операции «И» с помощью интерференционного фотонно-кристаллического логического элемента на основе Y-образного дефекта (рисунок 4.13). В работе [134] показано, что фотонно-кристаллические элементы, основанные на многократном использовании Y-образного дефекта, позволяют реализовывать любую булеву операцию, в частности, в [134] приведены результаты расчёта и моделирования логического элемента, реализующего булеву операцию «ИЛИ-НЕ» (рисунок 4.14).

В работе [135] показано, что применение стохастических методов для оптимизации области интерференции фотонно-кристаллического интерференционного логического элемента позволяет резко снизить дифракционные потери, что открывает возможность построения устройства с каскадированием нескольких интерференционных логических элементов без промежуточного усиления.

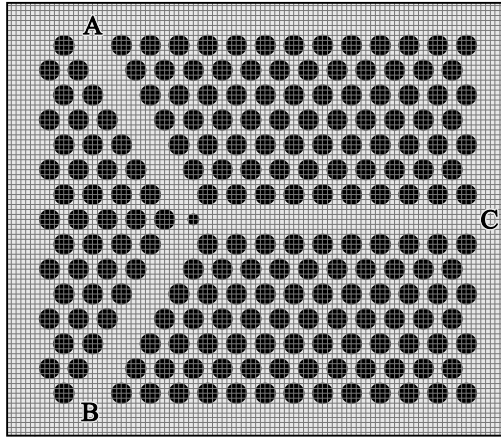


Рисунок 4.13 – Интерференционный фотонно-кристаллический логический элемент на основе Y-образного дефекта [205]

Стоит отметить, что применение фотонно-кристаллических элементов с различной топологией дефектов фотонно-кристаллической (или фотонно-квазикристаллической [10]) структуры позволяет эффективно конструировать различные элементы интегральных оптических устройств – делители пучка [212], логические элементы [204, 205, 134, 135], волноводы с изгибами [213, 214], планарные согласующие линзы [215], оптические диоды [216], кодировщики [217], мультиплексоры, сумматоры и т.д.

Расчёт оптимальных топологий конкретных элементов в [135, 212] основан на многократном решении прямой задачи дифракции излучения на структуре элемента в цикле генетического алгоритма подобно оптимизации бинарного микрорельефа дифракционного оптического элемента в [218]. Такой подход позволяет разрабатывать системы автоматизированного проектирования устройств интегральной фотоники, при этом использование решения только прямой задачи дифракции позволяет осуществлять расчёт фотонно-кристаллических структур с учётом технологических возможностей, так как в качестве кандидатов на оптимальное решение

на каждой итерации выбираются только структуры, реализуемые с помощью используемой технологии.

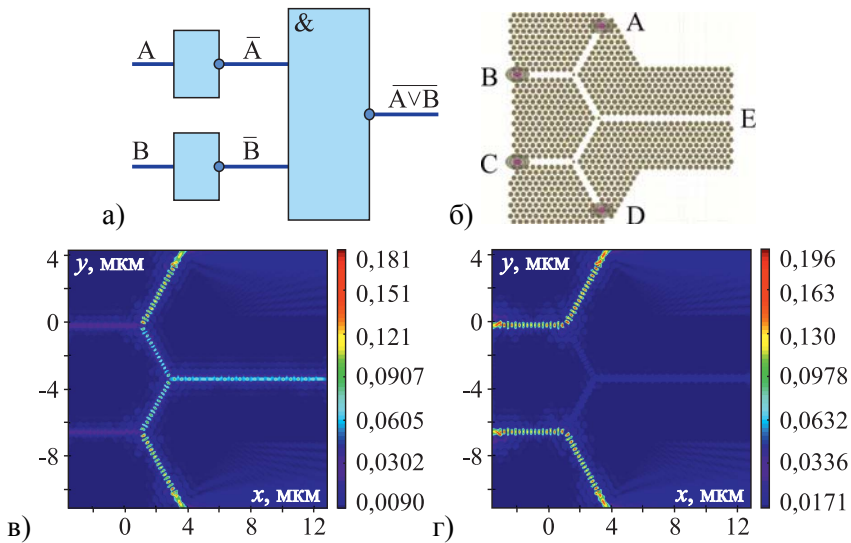


Рисунок 4.14 – Логический элемент «ИЛИ-НЕ» (а); фотонный кристалл с тремя Y-образными дефектами, реализующий логическую операцию «ИЛИ-НЕ». В и С – входы для сигналов-операндов, А и D – входы для опорных сигналов, Е – выход для сигнала-результата операции (б); результат работы элемента в случае подачи сигналов, соответствующих логическому нулю, на оба входа логического элемента (в); результат работы элемента в случае подачи сигналов, соответствующих логической единице, на оба входа логического элемента (г)

Возможность реализации двумерных волноводных фотонно-кристаллических структур в материале подложки с помощью технологий нанoeлектроники (например, путём однократного литографического травления поверхности подложки) и гибкость в решении задач управления волноводным излучением с помощью фотонно-кристаллических структур позволяют рассматривать их в качестве одного из типов элементов интегрального фотонного устройства – наряду со ступенчатыми планарными волноводами, кольцевыми ре-

зонаторами и т.д. В работе [219] рассмотрен расчёт, оптимизация и моделирование узла пересечения трёх независимых планарных волноводов в фотонно-кристаллическом исполнении, обеспечивающего пренебрежимо малый уровень перекрёстных помех при работе независимых волноводов, что, естественно, невозможно в случае реализации такого узла пересечения ступенчатых планарных волноводов (рисунок 4.15).

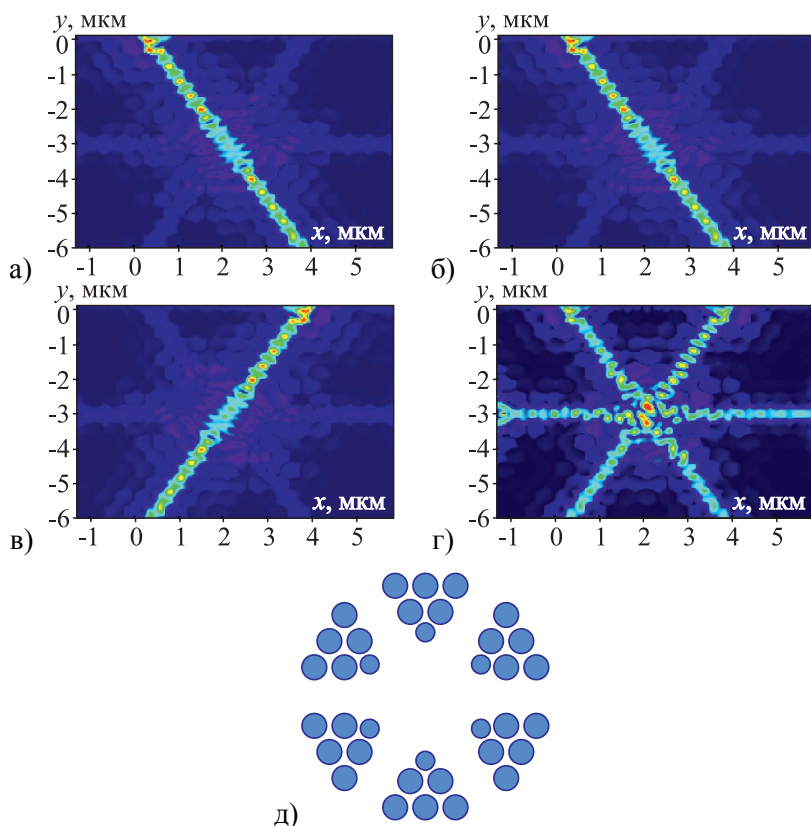


Рисунок 4.15 – Результаты оптимизации узла пересечения фотонно-кристаллических планарных волноводов: работа волноводов по отдельности (а-в), работа трёх волноводов одновременно (г), расчётная топология узла пересечения (д)

В работах [220] рассмотрены варианты стыковки ступенчатых и фотонно-кристаллических планарных волноводов с потерями не более 5%. Различные варианты ввода/выводы излучения в двумерные фотонно-кристаллические элементы рассмотрены в [221, 222]. В [221] рассмотрены источники и приёмники излучения, реализованные непосредственно в объёме подложки интегрального фотонного устройства.

Благодарности

В данном разделе представлены результаты, полученные в рамках научной программы Национального центра физики и математики (НЦФМ), а также в рамках реализации Программы развития передовой инженерной школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва».

4.4 Фотодетекторы на низкоразмерных материалах

Появление первых низкоразмерных материалов (то есть материалов, имеющих хотя бы в одном измерении толщину, соизмеримую с толщиной одного атомного слоя) – углеродных нанотрубок [223], графена [224] и т.д., произвело настоящую революцию в области создания элементов фотоники с принципиально новыми свойствами. Список низкоразмерных материалов за последние годы существенно расширился [225], что дало возможность создавать высокочувствительные фотодетекторы различных диапазонов длин волн [226], в том числе в гибком исполнении [227], что позволило использовать их в различных распределённых сенсорных системах, например, при создании «умной одежды» [228]. Фотодетекторы являются ключевым компонентом многих используемых устройств

[228, 229, 208]. В частности, фотодетекторы играют ключевую роль в медицинской диагностике и физиологическом мониторинге, а также используются для ранней диагностики путём непрерывного мониторинга состояния здоровья пациентов. ИК-детекторы способны измерять состав газа путём отслеживания способности проверяемого газа поглощать/снижать интенсивность ИК-излучения [230].

Действие значительной части фотодетекторов основано на эффекте изменения электрического сопротивления чувствительного элемента под воздействием излучения.

Большие, непрерывные области гибких сенсоров на поверхностях космических и летательных аппаратов позволят осуществлять простые измерения давления, температуры, влажности, уровня рН и состава атмосферы, что является критически важным для исследования новых сред [230].

Стоит отметить, что гибкие фотодетекторы могут принимать необходимые изгибы без изменения технологических процессов их производства, как происходит в случае с фотодетекторами на повсеместно используемых жёстких и хрупких подложках, что существенно упрощает их изготовление для расположения на поверхностях с различной геометрией. При этом фотодетекторы, созданные на основе низкоразмерных материалов, способны работать в широком диапазоне рабочих температур, от криогенных до сотен градусов Цельсия [229]. Важно отметить, что для создания сенсоров на низкоразмерных материалах часто могут быть использованы сравнительно недорогие «групповые» технологии, основанные на хорошо известных физико-химических методах [225, 227].

Были проведены многочисленные исследования по разработке неплоских ИК-матриц с использованием чувствительных элементов из кремния и MoS_2 [231]. Преимущественно используемые чувствительные элементы фотодетекторов основаны на кристаллических эпитаксиальных материалах. Для выращивания таких структур и создания соответствующих устройств требуются жёсткие и

хрупкие подложки с согласованной решёткой. По этой причине данные материалы нельзя сгибать или сжимать. Известны гибкие ИК-детекторы, основанные на композите из перовскита и сопряжённого полимера [232], PbS и углеродных квантовых точках/графене [233], плёнке из микросфер из листов SnS₂ [234], нанопроволоках SbSe₃ [235], восстановленном оксиде графена [236], графеновых нанолентах [237] и коллоидных квантовых точках HgTe [238].

Тем не менее большая часть исследованных материалов демонстрирует ограниченные спектральные диапазоны чувствительности (<1 мкм) [233–238], низкий отклик [134–237] и низкую скорость отклика [232–237], что препятствует их практическому применению. Сегодня ведутся активные исследования дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) для разработки ИК-детекторов с улучшенными характеристиками фотодетектирования [239, 240]. Причиной такого интереса к ДПМ стал ряд их преимуществ по сравнению с другими материалами для фотодетектирования. Например, атомарная толщина делает такие материалы почти прозрачными, что может быть использовано при создании «умной ткани». Кроме того, такая малая толщина также отвечает за эффекты размерного квантования вне плоскости и вызывает сильносвязанные экситоны, которые приводят к увеличению эффективности поглощения излучения [241]. Более того, ширина запрещённой зоны (ШЗЗ) ДПМ может быть отрегулирована путём изменения количества слоёв материала для модуляции края оптического поглощения [241]. Сегодня широко изучаются такие халькогениды переходных металлов, как MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂, GaTe, GaSe, GaS, In₂Se₃, InSe, SnS₂, TiS₃, ZrS₃, HfS₃ и чёрный фосфор (BP) [240]. Фотодетекторы на основе однослойного MoS₂ могут обнаруживать только излучение видимого спектра. В случае с малослойным MoS₂ спектральный диапазон расширяется до ближнего ИК [242]. Фотодетекторы на основе MoSe₂ демонстрируют чувствительность от 0,26 мА/Вт до 13 мА/Вт [243]. Главный недостаток этого материала заключается в

том, что время отклика фотодетектора на его основе составляет несколько десятков мс. Часть широко исследуемых ДПМ может быть использована для создания фотодетекторов УФ-видимого диапазона [244]. Некоторые из исследованных ДПМ демонстрируют отклик преимущественно в видимом диапазоне спектра [245]. Многие ДПМ могут работать как чувствительные элементы в диапазоне от видимого до ближнего ИК-излучения [246]. Некоторые ДПМ могут перекрывать более широкий спектральный диапазон излучения, такой как УФ-ближний ИК [247] и видимый ИК [246]. Наноленты TiS_3 , соединения A^3B^6 и A^4B^6 , такие как GaTe или SnS_2 , демонстрируют как большую чувствительность, так и малое время отклика [245, 246]. Основные проблемы упомянутых материалов: узкий рабочий диапазон длин волн, в частности, малое поглощение в ИК-диапазоне спектра, большое время отклика. Кроме того, кремниевая технология, использованная в [246, 247], обладает рядом недостатков, одним из которых является жёсткость и хрупкость устройств.

Для преодоления упомянутых проблем с существующими материалами необходимо исследовать новые материалы для фотодетектирования. Одним из перспективных материалов для разработки гибких ИК-детекторов является дисульфид титана (TiS_2). Главным образом, интерес к данному материалу возник из-за величины его прямой ШЗЗ и из-за эффектов размерного квантования вне плоскости, приводящих к увеличению эффективности оптического поглощения [241]. Меньшая ШЗЗ материала говорит о том, что такой материал сможет детектировать излучение с меньшей энергией фотона, то есть с большей длиной волны. Прямая ШЗЗ TiS_2 меньше, чем у упомянутых выше материалов и находится в диапазоне от 0,2 до 0,9 эВ, что свидетельствует о её зависимости от структуры и о возможности поглощать излучение в ИК-диапазоне спектра [248]. TiS_2 в однослойной и малослойной формах представляет собой прозрачный материал, который может найти применение при изго-

товлении ткани с встроенными электронными компонентами [248]. Кроме того, процесс изготовления устройств на основе ДПМ преимущественно осуществляется методом механического отшелушивания. На данный момент существует ряд способов получения низкоразмерных материалов: жидкостное или механическое отшелушивание от объёмного материала, селенизация, химическое осаждение из газовой фазы и др. Самым распространённым методом получения низкоразмерных материалов является синтез их объёмной формы и дальнейшее жидкостное отшелушивание до получения необходимых размеров материала ввиду простоты и доступности процесса.

В настоящее время гибкие фотодетекторы изготавливают либо с помощью синтеза сложных гибких фоточувствительных структур, либо путём фиксации чувствительного элемента фотодетектора на отдельно стоящей гибкой подложке [230, 231]. Отдельное внимание заслуживают гетероструктуры из низкоразмерных материалов – фотодетекторы на их основе могут обладать значительно более высокой эффективностью по сравнению с фотодетекторами на основе чистых низкоразмерных материалов.

В совместной работе сотрудников Самарского университета и их индийских коллег [240] был проведён сравнительный анализ гибких фотодетекторов на основе листов TiS_2 и функционализированных нитратом серебра листов TiS_2 . Листы TiS_2 были синтезированы методом химического транспорта, обработаны ультразвуком в течение 1 ч и осаждены между хромовыми встречно-штыревыми электродами на поверхности гибкой подложки из полиэтилентерефталата (ПЭФТ) (рисунки 4.16, 4.18).

Характеристики изготовленных фотодетекторов были определены путём их равномерного освещения 1064 нм лазерным излучением с перестраиваемой мощностью. Отмечалось значительное влияние наночастиц нитрата серебра, рассеянных в объёме чувствительного материала фотодетектора (рисунок 4.17), на его эффективность.

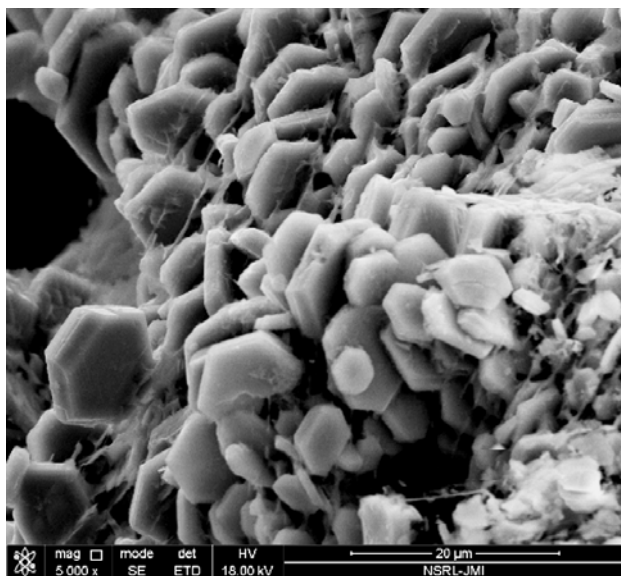


Рисунок 4.16 – Синтезированные листы TiS₂.
Изображение получено с помощью СЭМ с полевым эмиттером

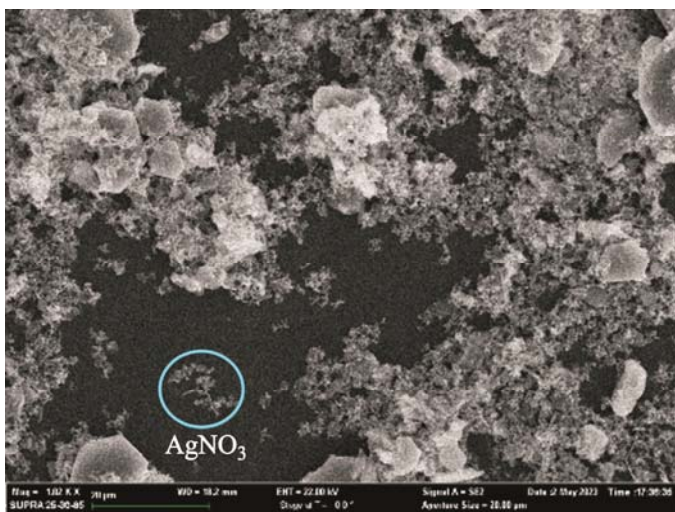


Рисунок 4.17 – СЭМ-изображение листов TiS₂
после функционализации нитратом серебра

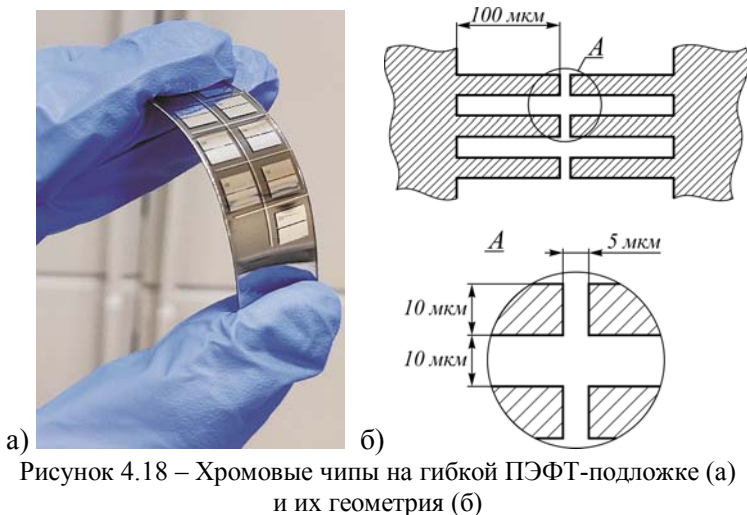


Рисунок 4.18 – Хромовые чипы на гибкой ПЭФТ-подложке (а) и их геометрия (б)

Продемонстрировано превосходство фотодетектора на основе функционализированных листов TiS_2 . Результаты исследования фотодетекторов [240] приведены на рисунках 4.19, 4.20.

Фотодетектор [240] продемонстрировал значительный отклик для всех использованных мощностей излучения (11,6, 19,6, 51, 100 и 150 мВт/см²), показал достаточно малое время отклика ($0,23 \pm 0,01$ с) и восстановления ($0,49 \pm 0,02$ с) вкпе с высокой чувствительностью ($(260 \pm 7) \cdot 10^3$ А/Вт), квантовой эффективностью ($(303 \pm 8) \cdot 10^3$ А/Вт·нм) и обнаружительной способностью ($(3,10 \pm 0,09) \cdot 10^{13}$ Джонс) при мощности падающего излучения 11,6 мВт/см². Полученные результаты могут быть использованы для разработки и оптимизации современных оптоэлектронных устройств.

Мировой рынок фотодетекторов стремительно растёт благодаря распространению «умных» устройств в быту и в самых разных сферах науки и техники [228]. Замечательные оптические свойства (в том числе проявление различных нелинейных эффектов) низко-размерных материалов позволяют эффективно использовать их также для создания интегральных элементов фотоники [208] и

плазмоники [249] в системах обработки информации, а также в устройствах фотовольтаики [250, 251].

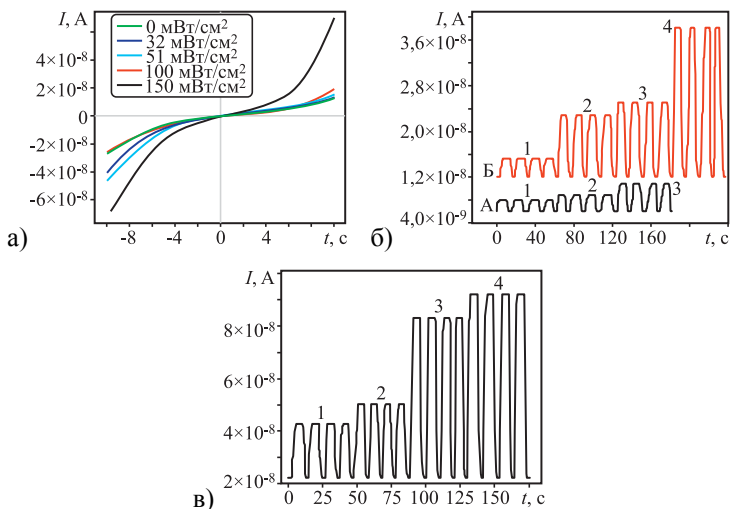


Рисунок 4.19 – ВАХ фотодетектора на основе листов TiS_2 (а) и изменение фототока в зависимости от плотности мощности падающего излучения по времени (б, в) при напряжении смещения 5 В, 7,5 В и 10 В

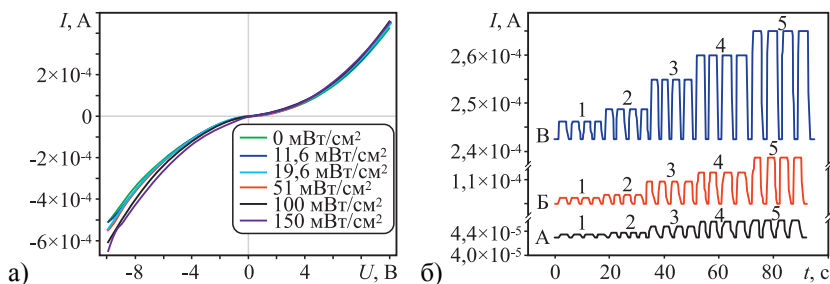


Рисунок 4.20 – ВАХ фотодетектора на основе функционализированных AgNO_3 листов TiS_2 (а) и изменение фототока в зависимости от мощности падающего излучения по времени при напряжении смещения 5 В (линия А), 7,5 В (линия Б) и 10 В (линия В) (б)

Благодарности

Представленные результаты получены при поддержке гранта РФФИ № 21-79-00272.

Список использованных источников к Главе 4

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / пер. с англ., под ред. Г. П. Мотулевич. Изд. 2, испр. М.: Наука, 1973. 720 с.
2. Soifer V. A., Golub M. A. Laser beam mode selection by computer generated holograms. Boca Raton: CRC Press, 1994. 256 p.
3. Soifer V. A., Kotlyar V. V., Doskolovich L. L. Iterative methods for diffractive optical elements computation. London: Taylor and Francis, 1997. 250 p. ISBN: 0-7484-0634-4.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). 6-е изд., испр. («Теоретическая физика», том III). М.: Физматлит, 2004. 800 с. ISBN: 5-9221-0530-2.
5. Давыдов А. С. Квантовая механика. 2-е изд. М.: Наука, 1973. 704 с.
6. Расчет квантовых характеристик на основе классического решения задачи дифракции в резонаторе с диэлектрической пластиной / С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский, С.Г. Волоотовский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 5. С. 741–751. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1174.
7. Methods for computer design of diffractive optical elements / ed. by V. A. Soifer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 765 p. ISBN: 978-0-471-09533-0.
8. Методы компьютерной оптики / под ред. В. А. Сойфера. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2003. 688 с. ISBN: 5-9221-0434-9.
9. Дифракционная компьютерная оптика / Д. Л. Головашкин, Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский, В. В. Котляр, В. С. Павельев, Р. В. Скиданов, В. А. Сойфер, С. Н. Хонина; под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с. ISBN: 5-9221-0845-4.
10. Дифракционная нанопотоника / А. В. Гаврилов, Д. Л. Головашкин, Л. Л. Досколович, П. Н. Дьяченко, А. А. Ковалев, В. В. Котляр, А. Г. Налимов, Д. В. Нестеренко, В. С. Павельев, Р. В. Скиданов, В. А. Сойфер, С. Н. Хонина, Я. О.Шуюпова; под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2011. 680 с. ISBN: 978-5-9221-1237-6.
11. Computer design of diffractive optics / ed. by V. A. Soifer. Cambridge International Science Publishing Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., UK, 2012. 896 p. ISBN: 978-1-84569-635-1.

12. *Diffractional nanophotonics* / A. V. Gavrilov, D. L. Golovashkin, L. L. Doskolovich, P. N. Dyachenko, S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, A. G. Nalimov, D. V. Nesterenko, V. S. Pavelyev, Y. O. Shuyupova, R. V. Skidanov, V. A. Soifer; ed. by V. A. Soifer. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CISP, 2014. 679 p. ISBN: 9781466590694.
13. *Дифракционная оптика и нанофотоника* / Е. А. Безус, Д. А. Быков, Л. Л. Досколович, А. А. Ковалев, В. В. Котляр, А. Г. Налимов, А. П. Порфирьев, Р. В. Скиданов, В. А. Сойфер, С. С. Стафеев, С. Н. Хонина; под ред. В. А. Сойлера. М.: Физматлит, 2014. 608 с. ISBN: 9785922115711.
14. *Нанофотоника и её применение в системах ДЗЗ* / под ред. В. А. Сойлера. Самара: Новая техника, 2016. 384 с. ISBN 978-5-88940-140-7.
15. *Diffractional optics and nanophotonics* / E. A. Bezus, D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, S. N. Khonina, V. V. Kotlyar, A. A. Kovalev, A. G. Nalimov, A. P. Porfir'ev, R. V. Skidanov, V. A. Soifer, S. S. Stafeev; ed. by V. A. Soifer. CRC Press, 2017. 718 p. ISBN: 978-1-4987-5447-7.
16. Kotlyar V. V., Kovalev A. A. Accelerating and vortex laser beams. Boca Raton: CRC Press, 2019. 298 p. ISBN: 978-0-367-32236-6.
17. Kotlyar V. V., Stafeev S. S., Nalimov A. G. Sharp focusing of laser light. Boca Raton: CRC Press, 2019. 322 p. ISBN: 978-0-367-36444-1.
18. Kotlyar V. V., Kovalev A. A., Nalimov A. G. Topological charge of optical vortices. Boca Raton: CRC Press, 2022. 320 p. ISBN: 9781003326304.
19. *Photonics elements for sensing and optical conversions* / N. L. Kazanskiy, M. A. Butt, S. N. Khonina, P. G. Serafimovich, V. D. Ta, H. H. Mai, S. V. Karpeev, P. A. Khorin, A. P. Porfirev; ed. by N. L. Kazanskiy. 1st ed. CRC Press, 2023. 318 p. ISBN: 9781003439165.
20. Котляр В. В., Ковалев А. А., Абрамочкин Е. Г. Суперпозиции вихревых лазерных пучков. М.: Физматлит, 2023. 200 с. ISBN: 978-5-9221-1976-4.
21. Котляр В. В., Стафеев С. С., Ковалев А. А. Оптический эффект Холла в остром фокусе. М.: Физматлит, 2023. 240 с. ISBN: 978-5-9221-1975-7.
22. Kotlyar V. V., Kovalev A. A., Nalimov A. G. Optical Hall effect in the sharp focus of laser light. Cham: Springer, 2024. 280 p. ISBN: 978-3-031-64682-9.
23. Golovashkin D. L., Kasanskiy N. L. Solving diffractional optics problem using graphics processing units // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2011. Vol. 20(2). P. 85–89. DOI: 10.3103/S1060992X11020019.

24. Параллельные алгоритмы решения сеточных уравнений / Д. Г. Воротникова, Д. Л. Головашкин, Н. Л. Казанский, А. В. Кочуров, Л. В. Логанова, С. А. Малышева; под ред. Н. Л. Казанского. Самара: ИСОИ РАН, 2013. 146 с.
25. Kazanskiy N. L., Serafimovich P. G. Cloud computing for nanophotonic simulations. In: Optical Supercomputing. 4th International Workshop, OSC 2012, in Memory of H. John Caulfield, Bertinoro, Italy, July 19–21, 2012. Revised Selected Papers / ed. by S. Dolev, M. Oltean. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, 2013. P. 54–67. DOI: 10.1007/978-3-642-38250-5_7.
26. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, V. A. Soifer // Optics Express. 2014. Vol. 22(21). P. 25084–25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
27. Kazanskiy N. L., Serafimovich P. G. Coupled-resonator optical waveguides for temporal integration of optical signals // Optics Express. 2014. Vol. 22(11). P. 14004–14013. DOI: 10.1364/OE.22.014004.
28. First-order optical spatial differentiator based on a guided-mode resonant grating / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, A. A. Morozov, V. V. Podlipnov, E. A. Bezus, P. Verma, V. A. Soifer // Optics Express. 2018. Vol. 26(8). P. 10997–11006. DOI: 10.1364/OE.26.010997.
29. Kazanskiy N. L., Skidanov R. V. Technological line for creation and research of diffractive optical elements // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 11146. 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
30. Технология изготовления непрерывного микрорельефа дифракционных оптических элементов / А. В. Волков, Н. Л. Казанский, В. А. Сойфер, В. С. Соловьев // Компьютерная оптика. 1997. № 17. С. 91–93.
31. A method for the diffractive microrelief formation using the layered photoresist growth / A. V. Volkov, N. L. Kazanskiy, O. Yu. Moiseev, V. A. Soifer // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol. 29(4–5). P. 281–288. DOI: 10.1016/S0143-8166(97)00116-4.
32. Алмазная дифракционная оптика для мощных CO₂-лазеров / В. В. Кононенко, В. И. Конов, С. М. Пименов, А. М. Прохоров, В. С. Павельев, В. А. Сойфер // Квантовая электроника. 1999. Т. 26, № 1. С. 9–10.
33. Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ / С. Р. Абульханов, Н. Л. Казанский, Л. Л. Досколович, О. Ю. Казакова // СТИН. 2011. № 9. С. 22–27.
34. Bezus E. A., Doskolovich L. L., Kazanskiy N. L. Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant

- gratings // *Microelectronic Engineering*. 2011. Vol. 88(2). P. 170–174. DOI: 10.1016/j.mee.2010.10.006.
35. 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. DOI: 10.3103/S875669901302012X.
 36. Казанский Н. Л., Моисеев О. Ю., Полетаев С. Д. Формирование микрорельефа методом термического окисления плёнок молибдена // *Письма в ЖТФ*. 2016. Т. 42(3). С. 106–110.
 37. Skidanov R. V., Moiseev O. Yu., Ganchevskaya S. V. Additive process for fabrication of phased optical diffraction elements // *Journal of Optical Technology*. 2016. Vol. 83(1). P. 23–25. DOI: 10.1364/JOT.83.000023.
 38. Изготовление методом лазерной абляции и исследование кремниевое фокусатора излучения терагерцового диапазона с непрерывным дифракционным микрорельефом / К. Н. Тукмаков, М. С. Комленок, В. С. Павельев, Т. В. Кононенко, В. И. Конов // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42, № 6. С. 941–946. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-941-946.
 39. Two-step maskless fabrication of compound fork-shaped gratings in nanomultilayer structures based on chalcogenide glasses / A. Porfirev, S. Khonina, N. Ivliev, V. Podlipnov, A. Meshalkin, E. Achimova, V. Abashkin, A. Prisacar // *Optics Letters*. 2021. Vol. 46(13). P. 3037–3040. DOI: 10.1364/OL.427335.
 40. Laser processing of chalcogenide glasses using laser fields with a spatially varying polarization distribution / A. P. Porfirev, S. N. Khonina, N. A. Ivliev, D. P. Porfirev // *Optics & Laser Technology*. 2023. Vol. 167. Article ID 109716. DOI: 10.1016/j.optlastec.2023.109716.
 41. Оптимизация, изготовление и исследование кремниевой бинарной субволновой цилиндрической линзы терагерцового диапазона / С. И. Харитонов, В. С. Павельев, Н. Л. Казанский, Ю. С. Стрелков, К. Н. Тукмаков, А. С. Решетников, С. В. Ганчевская, В. В. Герасимов, Б. А. Князев // *Компьютерная оптика*. 2023. Т. 47, № 1. С. 62–67. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1194.
 42. Kazanskiy N. L. Research & education center of diffractive optics // *Proceedings of SPIE*. 2012. Vol. 8410. Article ID 84100R. DOI: 10.1117/12.923233.
 43. Kazanskiy N. L. Efficiency of deep integration between a research university and an academic institute // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 201. P. 817–831. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.604.
 44. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н. Л. Казанский, И. С. Степаненко,

- А. И. Хаймович, С. В. Кравченко, Е. В. Бызов, М. А. Моисеев // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40, № 2. С. 203–214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.
45. Analytical source-target mapping method for the design of freeform mirrors generating prescribed 2D intensity distributions / L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, M. A. Moiseev, D. A. Bykov, N. L. Kazanskiy // Optics Express. 2016. Vol. 24(10). P. 10962–10971. DOI: 10.1364/OE.24.010962.
 46. Designing double freeform surfaces for collimated beam shaping with optimal mass transportation and linear assignment problems / L. L. Doskolovich, D. A. Bykov, E. S. Andreev, E. A. Bezus, V. Oliker // Optics Express. 2018. Vol. 26(19). P. 24602–24613. DOI: 10.1364/OE.26.024602.
 47. Linear assignment problem in the design of freeform refractive optical elements generating prescribed irradiance distributions / D. A. Bykov, L. L. Doskolovich, A. A. Mingazov, E. A. Bezus, N. L. Kazanskiy // Optics Express. 2018. Vol. 26(21). P. 27812–27825. DOI: 10.1364/OE.26.027812.
 48. Расчет оптических элементов при протяженном источнике излучения / Е. В. Бызов, Л. Л. Досколович, С. В. Кравченко, М. А. Моисеев, Н. Л. Казанский // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47, № 1. С. 40–47. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1178.
 49. Казанский Н. Л., Полетаев С. Д. Численное моделирование процесса абляции тонких пленок молибдена под действием лазерного излучения // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 9. С. 1–6.
 50. Полетаев С. Д. Численное и экспериментальное исследования фототермохимического эффекта в тонких пленках оксида молибдена при лазерной абляции // Автометрия. 2023. Т. 59, № 3. С. 43–51. DOI: 10.15372/AUT20230306.
 51. Головашкин Д. Л., Казанский Н. Л. Методика формирования падающей волны при разностном решении уравнений Максвелла // Автометрия. 2007. Т. 43, № 6. С. 78–88.
 52. Golovashkin D. L., Kazanskiy N. L. Mesh domain decomposition in the finite-difference solution of Maxwell's equations // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). 2009. Vol. 18(3). P. 203–211. DOI: 10.3103/S1060992X09030102.
 53. Soifer V. A., Kazanskiy N. L., Kharitonov S. I. Synthesis of a binary DOE focusing into an arbitrary curve, using the electromagnetic approximation // Optics and Lasers in Engineering. 1998. Vol. 29(4–5). P. 237–247. DOI: 10.1016/S0143-8166(97)00112-7.
 54. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 247 с.

55. Kazanskiy N. L. Modeling diffractive optics elements and devices // Proceedings of SPIE. 2018. Vol. 10774. Article ID 107740O. DOI: 10.1117/12.2319264.
56. Расторгуев А. А., Харитонов С. И., Казанский Н. Л. Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в приближении волновой оптики // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 1. С. 56–64. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1034.
57. Training deep neural networks for the inverse design of nanophotonic structures / D. Liu, Y. Tan, E. Khoram, Z. Yu // ACS Photonics. 2018. Vol. 5(4). P. 1365–1369. DOI: 10.1021/acsphotonics.7b01377.
58. Hegde R. S. Deep learning: a new tool for photonic nanostructure design // Nanoscale Advances. 2020. Vol. 2(3). P. 1007–1023. DOI: 10.1039/c9na00656g.
59. Deep learning in nano-photonics: inverse design and beyond / P. R. Wiecha, A. Arbouet, C. Girard, O. L. Muskens // Photonics Research. 2021. Vol. 9(5). P. B182–B200. DOI: 10.1364/PRJ.415960.
60. Deep learning for the design of 3D chiral plasmonic metasurfaces / X. Liao, L. Gui, Z. Yu, T. Zhang, K. Xu // Optical Materials Express. 2022. Vol. 12(2). P. 758–771. DOI: 10.1364/OME.449152.
61. Hong Y., Nicholls D. P. Data-driven design of thin-film optical systems using deep active learning // Optics Express. 2022. Vol. 30(13). P. 22901–22910. DOI: 10.1364/OE.459295.
62. Revolutionary integration of artificial intelligence with meta-optics-focus on metalenses for imaging / N. L. Kazanskiy, S. N. Khonina, I. V. Oseledets, A. V. Nikonorov, M. A. Butt // Technologies. 2024. Vol. 12(9). Article ID 143. DOI: 10.3390/technologies12090143.
63. Deep neural networks with adaptive solution space for inverse design of multilayer deep-etched grating / P. Liu, Y. Zhao, N. Li, K. Feng, S. G. Kong, C. Tang // Optics and Lasers in Engineering. 2024. Vol. 174. Article ID 107933. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2023.107933.
64. A perspective on the artificial intelligence’s transformative role in advancing diffractive optics / S. N. Khonina, N. L. Kazanskiy, A. R. Efimov, A. V. Nikonorov, I. V. Oseledets, R. V. Skidanov, M. A. Butt // iScience. 2024. Vol. 27(7). Article ID 110270. DOI: 10.1016/j.isci.2024.110270.
65. Программное обеспечение по компьютерной оптике / С. Г. Волотовский, М. А. Голуб, Л. Л. Досколович, Н. Л. Казанский, В. С. Павельев, П. Г. Серафимович, В. А. Сойфер, С. И. Харитонов, А. Е. Царегородцев // Компьютерная оптика. 1995. Вып. 14–15, Ч. 2. С. 94–106.
66. Software on diffractive optics and computer-generated holograms / L. L. Doskolovich, M. A. Golub, N. L. Kazanskiy, A. G. Khramov, V. S. Pave-

- Iyev, P. G. Seraphimovich, V. A. Soifer, S. G. Volotovskiy // Proceedings of SPIE. 1995. Vol. 2363. P. 278–284. DOI: 10.1117/12.199645.
67. 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. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-1-65-71.
 68. Манипуляция микрообъектами с помощью линейных ловушек, формируемых вихревыми аксиконами / Р. В. Скиданов, А. П. Порфирьев, С. В. Ганчевская // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 4. С. 717–721. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-4-717-721.
 69. Скиданов Р. В., Ганчевская С. В. Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 3. С. 463–468. DOI: 10.18287/0134-2452-2014-38-3-463-468.
 70. Бланк В. А., Ганчевская С. В., Скиданов Р. В. Программа формирования гиперкуба для гиперспектральной камеры на основе дифракционной линзы // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018663250, 24.10.2018. Заявка № 2018660420 от 27.09.2018.
 71. 3U CubeSat-based hyperspectral remote sensing by Offner imaging hyperspectrometer with radially-fastened primary elements / N. Ivliev, V. Podlipnov, M. Petrov, I. Tkachenko, M. Ivanushkin, S. Fomchenkov, M. Markushin, R. Skidanov, Y. Khanenko, A. Nikonorov, N. Kazanskiy, V. Soifer // Sensors. 2024. Vol. 24(9). Article ID 2885. DOI: 10.3390/s24092885.
 72. Hamza M, Skidanov R, Podlipnov V. Visualization of subcutaneous blood vessels based on hyperspectral imaging and three-wavelength index images // Sensors. 2023. Vol. 23(21). Article ID 8895. DOI: 10.3390/s23218895.
 73. Hybrid refractive-diffractive lens with reduced chromatic and geometric aberrations and learned image reconstruction / V. V. Evdokimova, V. V. Podlipnov, N. A. Ivliev, M. V. Petrov, S. V. Ganchevskaya, V. A. Fursov, Y. V. Yuzifovich, S. O. Stepanenko, N. L. Kazanskiy, A. V. Nikonorov, R. V. Skidanov // Sensors. 2023. Vol. 23(1), Article ID 415. DOI: 10.3390/s23010415.
 74. Nesterenko D. V., Kotlyar V. V., Wang Y. Modeling the light diffraction by micro-optics elements using the finite element method // Computer Optics. 1999. Vol. 19. P. 40–43.
 75. Kotlyar V. V., Nesterenko D. V. A finite element method in the problem of light diffraction by micro-optics // Optical Memory and Neural Networks. 2000. Vol. 9(3). P. 209–220.
 76. Kotlyar V., Nesterenko D. Analysis of light diffraction by binary micro-optics using a combination of boundary element method and finite ele-

- ment method // Proceedings of SPIE. 2001. Vol. 4242. P. 125–132. DOI: 10.1117/12.427732.
77. Нестеренко Д. В. Моделирование дифракции электромагнитных волн на периодических неоднородностях объединенным методом конечных элементов и разложения Рэлея // Автотметрия. 2011. Т. 47, № 1. С. 85–95.
78. Нестеренко Д. В. Резонансные характеристики пропускающих оптических фильтров на основе структур металл/диэлектрик/металл // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 2. С. 219–228. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-681.
79. Fano approximation as a fast and effective way for estimating resonance characteristics of surface plasmon structures / D. V. Nesterenko, R. Pavlekin, S. Hayashi, Z. Sekkat, V. Soifer // Plasmonics. 2021. Vol. 16. P. 1001–1011. DOI: 10.1007/s11468-020-01364-8.
80. Nesterenko D. V., Hayashi S., Sekkat Z. Asymmetric surface plasmon resonances revisited as Fano resonances // Physical Review B. 2018. Vol. 97(23). Article ID 235437. DOI: 10.1103/PhysRevB.97.235437.
81. Nesterenko D. V., Hayashi S., Sekkat Z. Coupled-mode theory of field transfer processes in surface plasmon resonance structures // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1092. Article ID 012097. DOI: 10.1088/1742-6596/1092/1/012097.
82. Nesterenko D. V., Hayashi S., Soifer V. A. *Ab initio* spatial coupled-mode theory of Fano resonances in optical responses of multilayer interference resonators // Physical Review A. 2022. Vol. 106(2). Article ID 023507. DOI: 10.1103/PhysRevA.106.023507.
83. Nesterenko D. V., Hayashi S., Soifer V. A. Fabry–Pérot resonances in planar metal–insulator–metal structures for optical data processing: A review // Physics of Wave Phenomena. 2023. Vol. 31(5). P. 293–311. DOI: 10.3103/S1541308X23050096.
84. Subwavelength diffractive optical elements for generation of terahertz coherent beams with pre-given polarization state / V. Pavelyev, S. Khonina, S. Degtyarev, K. Tukmakov, A. Reshetnikov, V. Gerasimov, N. Osintseva, B. Knyazev // Sensors. 2023. Vol. 23(3). Article ID 1579. DOI: 10.3390/s23031579.
85. Metalenses for the generation of vector Lissajous beams with a complex Poynting vector density / S. N. Khonina, S. A. Degtyarev, A. V. Ustinov, A. P. Porfirev // Optics Express. 2021. Vol. 29(12). P. 18634–18645. DOI: 10.1364/OE.428453.
86. Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation / S. Degtyarev, D. Saveljev, S. Khonina, N. Kazanskiy // Optics Express. 2019. Vol. 27(11). P. 15129–15135. DOI: 10.1364/OE.27.015129.

87. Collin S. Nanostructure arrays in free-space: optical properties and applications // *Reports on Progress in Physics*. 2014. Vol. 77(12). Article ID 126402. DOI: 10.1088/0034-4885/77/12/126402.
88. Chang-Hasnain C. J., Yang W. High-contrast gratings for integrated optoelectronics // *Advances in Optics and Photonics*. 2012. Vol. 4(3). P. 379–440. DOI: 10.1364/AOP.4.000379.
89. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings / M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet, T. K. Gaylord // *Journal of the Optical Society of America A*. 1995. Vol. 12(5). P. 1068–1076. DOI: 10.1364/JOSAA.12.001068.
90. Rigorous and efficient grating-analysis method made easy for optical engineers / L. Li, J. Chandezon, G. Granet, J.-P. Plumey // *Applied Optics*. 1999. Vol. 38(2). P. 304–313. DOI: 10.1364/AO.38.000304.
91. The dielectric lamellar diffraction grating / L. C. Botten, M. S. Craig, R. C. McPhedran, J. L. Adams, J. R. Andrewartha // *Optica Acta: International Journal of Optics*. 1981. Vol. 28(3). P. 413–428. DOI: 10.1080/713820571.
92. Li L. A modal analysis of lamellar diffraction gratings in conical mountings // *Journal of Modern Optics*. 1993. Vol. 40(4). P. 553–573. DOI: 10.1080/09500349314550631.
93. 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. DOI: 10.1364/JOSAA.13.001870.
94. Granet G. Reformulation of the lamellar grating problem through the concept of adaptive spatial resolution // *Journal of the Optical Society of America A*. 1999. Vol. 16(10). P. 2510–2516. DOI: 10.1364/JOSAA.16.002510.
95. Li L. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings // *Journal of the Optical Society of America A*. 1996. Vol. 13(5). P. 1024–1035. DOI: 10.1364/JOSAA.13.001024.
96. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach / M. G. Moharam, D. A. Pommet, E. B. Grann, T. K. Gaylord // *Journal of the Optical Society of America A*. 1995. Vol. 12(5). P. 1077–1086. DOI: 10.1364/JOSAA.12.001077.
97. Li L. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings // *Journal of the Optical Society of America A*. 1997. Vol. 14(10). P. 2758–2767. DOI: 10.1364/JOSAA.14.002758.
98. Li L. Fourier modal method for crossed anisotropic gratings with arbitrary permittivity and permeability tensors // *Journal of Optics A: Pure*

- and Applied Optics. 2003. Vol. 5(4). P. 345–355. DOI: 10.1088/1464-4258/5/4/307.
99. Quasiguided modes and optical properties of photonic crystal slabs / S. G. Tikhodeev, A. L. Yablonskii, E. A. Muljarov, N. A. Gippius, T. Ishihara // Physical Review B. 2002. Vol. 66(4). Article ID 045102. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.045102.
 100. Bykov D. A., Doskolovich L. L. Numerical methods for calculating poles of the scattering matrix with applications in grating theory // Journal of Lightwave Technology. 2013. Vol. 31(5). P. 793–801.
 101. Efficient and intuitive method for the analysis of light scattering by a resonant nanostructure / Q. Bai, M. Perrin, C. Sauvan, J.-P. Hugonin, P. Lalanne // Optics Express. 2013. Vol. 21(22). P. 27371–27382. DOI: 10.1364/OE.21.027371.
 102. Gippius N. A., Tikhodeev S. G. The scattering matrix and optical properties of metamaterials // Physics–Uspekhi. 2009. Vol. 52(9). P. 967–971. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200909i.1027.
 103. Resonances determination in microstructured films embedded in multilayered stacks / B. Vial, M. Commandré, F. Zolla, A. Nicolet, S. Tisserand // Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 8168. Article ID 816822. DOI: 10.1117/12.897347.
 104. Felbacq D. Numerical computation of resonance poles in scattering theory // Physics Review E. 2001. Vol. 64(4). Article ID 047702. DOI: 10.1103/PhysRevE.64.047702.
 105. Nevière M., Popov E., Reinisch R. Electromagnetic resonances in linear and nonlinear optics: Phenomenological study of grating behavior through the poles and zeros of the scattering operator // Journal of the Optical Society of America A. 1995. Vol. 12(3). P. 513–523. DOI: 10.1364/JOSAA.12.000513.
 106. Lalanne P., Silberstein E. Fourier-modal methods applied to waveguide computational problems // Optics Letters. 2000. Vol. 25(15). P. 1092–1094. DOI: 10.1364/OL.25.001092.
 107. Silberstein E., Lalanne P., Hugonin J.-P. [et al.]. Use of grating theories in integrated optics // Journal of the Optical Society of America A. 2001. Vol. 18(11). P. 2865–2875. DOI: 10.1364/JOSAA.18.002865.
 108. Hugonin J. P., Lalanne P. Perfectly matched layers as nonlinear coordinate transforms: a generalized formalization // Journal of the Optical Society of America A. 2005. Vol. 22(9). P. 1844–1849. DOI: 10.1364/JOSAA.22.001844.
 109. Aperiodic Fourier modal method in contrast-field formulation for simulation of scattering from finite structures / M. Pisarenco, J. Maubach, I. Setija, R. Mattheij // Journal of the Optical Society of America A. 2010. Vol. 27(11). P. 2423–2431. DOI: 10.1364/JOSAA.27.002423.

110. Modified S-matrix algorithm for the aperiodic Fourier modal method in contrast-field formulation / M. Pisarenco, J. Maubach, I. Setija, R. Mattheij // *Journal of the Optical Society of America A*. 2011. Vol. 28(7). P. 1364–1371. DOI: 10.1364/JOSAA.28.001364.
111. Быков Д. А., Досколович Л. Л. О применении метода фурье-мод к расчёту локализованных мод интегральных оптических резонаторов // *Компьютерная оптика*. 2015. Т. 39, № 5. С. 663–673. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-663-673.
112. Bykov D. A., Bezus E. A., Doskolovich, L. L. Use of aperiodic Fourier modal method for calculating complex-frequency eigenmodes of long-period photonic crystal slabs // *Optics Express*. 2017. Vol. 25(22). P. 27298–27309. DOI: 10.1364/OE.25.027298.
113. Liu V., Fan S. S⁴: A free electromagnetic solver for layered periodic structures // *Computer Physics Communications*. 2012. Vol. 183(10). P. 2233–2244. DOI: 10.1016/j.cpc.2012.04.026.
114. mpasson/A_FMM. URL: https://github.com/mpasson/A_FMM (дата обращения 01.11.2014).
115. Kim H., Park J., Lee B. Fourier modal method and its applications in computational nanophotonics. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN: 9781138074309.
116. alexey.shcherbakov/FMM. URL: <https://git.physics.itmo.ru/alexey.shcherbakov/FMM/src/master> (дата обращения 01.11.2014).
117. Grating Solver Development Company. URL: <https://www.gsolver.com/> (дата обращения 01.11.2014).
118. MC Grating. Modal and C methods grating design and analysis software. URL: <https://mcgrating.com/> (дата обращения 01.11.2014).
119. Photon Design. OmniSim RCWA. URL: https://www.photond.com/products/omnisim/omnisim_features_rcwa_01.htm (дата обращения 01.11.2014).
120. Synopsys. URL: <https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/passive-device-diffractmod.html> (дата обращения 01.10.2014).
121. Bykov D. A., Doskolovich L. L., Soifer V. A. Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings // *Optics Letters*. 2011. Vol. 36(17). P. 3509–3511. DOI: 10.1364/OL.36.003509.
122. Golovastikov N. V., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Spatiotemporal pulse shaping using resonant diffraction gratings // *Optics Letters*. 2015. Vol. 40(15). P. 3492–3495. DOI: 10.1364/OL.40.003492.
123. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Bound states in the continuum and high-Q resonances supported by a dielectric ridge on a slab

- waveguide // *Photonics Research*. 2018. Vol. 6(11). P. 1084–1093. DOI: 10.1364/PRJ.6.001084.
124. Resonant properties of composite structures consisting of several resonant diffraction gratings / L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, N. V. Golovastikov, V. A. Soifer // *Optics Express*. 2019. Vol. 27(18). P. 25814–25828. DOI: 10.1364/OE.27.025814.
 125. Bykov D. A., Bezus E. A., Doskolovich L. L. Coupled-wave formalism for bound states in the continuum in guided-mode resonant gratings // *Physical Review A*. 2019. Vol. 99(6). Article ID 063805. DOI: 10.1103/PhysRevA.99.063805.
 126. Bykov D. A., Bezus E. A., Doskolovich L. L. Bound states in the continuum and strong phase resonances in integrated Gires–Tournois interferometer // *Nanophotonics*. 2020. Vol. 9(1). P. 83–92. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0316.
 127. Algebraic approach to finding the number of parameters required to obtain a bound state in the continuum / D. A. Bykov, E. A. Bezus, A. A. Mingazov, L. L. Doskolovich // *Physical Review A*. 2024. Vol. 109(5). Article ID 053525. DOI: 10.1103/PhysRevA.109.053525.
 128. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Phase-shifted Bragg gratings for Bloch surface waves // *Optics Express*. 2015. Vol. 23(21). P. 27034–27045. DOI: 10.1364/OE.23.027034.
 129. Bezus E. A., Doskolovich L. L., Soifer V. A. Near-wavelength diffraction gratings for surface plasmon polaritons // *Optics Letters*. 2015. Vol. 40(21). P. 4935–4938. DOI: 10.1364/OL.40.004935.
 130. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Two-groove narrowband transmission filter integrated into a slab waveguide // *Photonics Research*. 2018. Vol. 6(1). P. 61–65. DOI: 10.1364/PRJ.6.000061.
 131. Doskolovich L. L., Bezus E. A., Bykov D. A. Integrated flat-top reflection filters operating near bound states in the continuum // *Photonics Research*. 2019. Vol. 7(11). P. 1314–1322. DOI: 10.1364/PRJ.7.001314.
 132. Bezus E. A., Bykov D. A., Doskolovich L. L. Integrated diffraction gratings on the Bloch surface wave platform supporting bound states in the continuum // *Nanophotonics*. 2021. Vol. 10(17). Article ID 20210352. DOI: 10.1515/nanoph-2021-0352.
 133. On-chip spatiotemporal optical vortex generation using an integrated metal–dielectric resonator / A. I. Kashapov, L. L. Doskolovich, E. A. Bezus, D. A. Bykov, V. A. Soifer // *Optics & Laser Technology*. 2024. Vol. 174. Article ID 110584. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.110584.
 134. Интерференционные логические элементы на основе фотонного кристалла с Y-образным дефектом / П. В. Мокшин, Д. Л. Головашкин, В. С. Павельев // *Компьютерная оптика*. 2023. Т. 47, № 6. С. 895–900. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1293.

135. Pavelyev V., Krivosheeva Y., Golovashkin D. Genetic optimization of the Y-shaped photonic crystal NOT logic gate // *Photonics*. 2023. Vol. 10(10). Article ID 1173. DOI: 10.3390/photonics10101173.
136. Балалаев С. А., Хонина С. Н. Реализация быстрого алгоритма преобразования Кирхгофа на примере бесселевых пучков // *Компьютерная оптика*. 2006. Вып. 30. С. 69–73.
137. Алгоритмы быстрого расчета дифракции радиально-вихревых лазерных полей на микроапертуре / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, С. Г. Волотовский, М. А. Ананьин // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2010. Т. 12, № 4. С. 15–25.
138. Распространение радиально-ограниченных вихревых пучков в ближней зоне. Часть 1. Алгоритмы расчёта / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, А. А. Ковалев, С. Г. Волотовский // *Компьютерная оптика*. 2010. Т. 34, № 3. С. 315–329.
139. Линзакон: непараксиальные эффекты / С. Н. Хонина, Н. Л. Казанский, А. В. Устинов, С. Г. Волотовский // *Оптический журнал*. 2011. Т. 78, № 11. С. 44–51.
140. Caustics of non-paraxial perfect optical vortices generated by toroidal vortex lenses / S. N. Khonina, S. I. Kharitonov, S. G. Volotovskiy, V. A. Soifer // *Photonics*. 2021. Vol. 8(7). Article ID 259. DOI: 10.3390/photonics8070259.
141. Программа для моделирования распространения лазерного излучения с использованием ускоренного интегрального преобразования Рэлея-Зоммерфельда / С. Г. Волотовский, С. И. Харитонов, С. Н. Хонина, Д. А. Савельев : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015618901 от 19.08.2015, заявка № 2015613196 от 21.04.2015.
142. Хонина С. Н., Харитонов С. И., Аналог интеграла Рэлея-Зоммерфельда для анизотропной и гиротропной сред // *Компьютерная оптика*. 2012. Т. 36, № 2. С. 172–182.
143. Khonina S. N., Kharitonov S. I. An analog of the Rayleigh-Sommerfeld integral for anisotropic and gyrotropic media // *Journal of Modern Optics*. 2013. Vol. 60(10). P. 814–822. DOI: 10.1080/09500340.2013.814816.
144. Хонина С. Н., Подлипов В. В., Волотовский С. Г. Исследование электрооптического преобразования линейно-поляризованных пучков Бесселя при распространении вдоль оптической оси анизотропного кристалла DKDP // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85, № 7. С. 17–26. DOI: 10.17586/1023-5086-2018-85-07-17-26.
145. Khonina S. N., Porfirev A. P., Kazanskiy N. L. Variable transformation of singular cylindrical vector beams using anisotropic crystals // *Scien-*

- tific Reports. 2020. Vol. 10. Article ID 5590. DOI: 10.1038/s41598-020-62546-2.
146. Структурное и поляризационное преобразования лазерных пучков в анизотропных кристаллах / С. Н. Хонина, С. В. Карпеев, В. В. Подлипнов, В. Д. Паранин, А. П. Порфирьев, Н. Л. Казанский // Автоматерия. 2020. Т. 56, № 2. С. 77–83. DOI: 10.15372/AUT20200208.
 147. Дифракция на бинарных микроаксиконах в ближней зоне / С. Н. Хонина, Д. А. Савельев, П. Г. Серафимович, И. А. Пустовой // Оптический журнал. 2012. Т. 79, № 10. С. 22–29.
 148. Near-field propagation of vortex beams: models and computation algorithms / S. N. Khonina, A. V. Ustinov, A. A. Kovalyov, S. G. Volotovskiy // Optical Memory and Neural Networks (Allerton Press). 2014. Vol. 23(2). P. 50–73. DOI: 10.3103/S1060992X14020027.
 149. Experimental demonstration of the generation of the longitudinal E-field component on the optical axis with high-numerical-aperture binary axicons illuminated by linearly and circularly polarized beams / S. N. Khonina, S. V. Karpeev, S. V. Alferov, D. A. Savelyev, J. Laukkanen, J. Turunen // Journal of Optics. 2013. Vol. 15(8). Article ID 085704. DOI: 10.1088/2040-8978/15/8/085704.
 150. Theoretical and experimental study of aperture size effects on the polarization sensitivity of near-field microscopy fiber-optic probes / S. A. Degtyarev, S. N. Khonina, S. V. Alferov, S. V. Karpeev // Proceedings of SPIE. 2014. Vol. 9156. Article ID 915608. DOI: 10.1117/12.2054204.
 151. Программа для моделирования распространения векторного лазерного излучения на основе метода разложения по плоским волнам / С. Г. Вологовский, С. Н. Хонина, С. И. Харитонов, Д. А. Савельев : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015618983 от 20.08.2015, заявка № 2015613197 от 21.04.2015.
 152. Mossoulina O. A., Kirilenko M. S., Khonina S. N. Simulation of vortex laser beams propagation in parabolic index media based on fractional Fourier transform // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 741. Article ID 012142. DOI: 10.1088/1742-6596/741/1/012142.
 153. Kirilenko M. S., Khonina S. N. Formation of signals matched with vortex eigenfunctions of bounded double lens system // Optics Communications. 2018. Vol. 410. P. 153–159. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.09.060.
 154. Khonina S. N., Karpeev S. V., Parani V. D. Birefringence detection of a gradient-index lens based on astigmatic transformation of a Bessel beam // Optik. 2018. Vol. 164. P. 679–685. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.03.086.
 155. Изменение траектории наборов пучков Эйри с помощью несущих пространственных частот / А. О. Фролов, А. В. Устинов, С. Н. Хо-

- нина // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 5. С. 724-732. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-1139.
156. Программное обеспечение для расчета и оптимизации фокусирующих свойств оптических микроструктур на основе реализации дробного преобразования Фурье с переменным шагом / С. Г. Волоотовский, Д. А. Савельев, С. Н. Хонина : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018612434 от 16.02.2018, заявка № 2017664027 от 29.12.2017.
 157. Khonina S. N., Kazanskiy N. L., Volotovskiy S. G. Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2011. Vol. 20(1). P. 23–42. DOI: 10.3103/S1060992X11010024.
 158. Khonina S. N., Golub I. Optimization of focusing of linearly polarized light // *Optics Letters*. 2011. Vol. 36(3). P. 352–354. DOI: 10.1364/OL.36.000352.
 159. Khonina S. N., Ustinov A. V., Pelevina E. A. Analysis of wave aberration influence on reducing focal spot size in a high-aperture focusing system // *Journal of Optics*. 2011. Vol. 13(9). Article ID 095702. DOI: 10.1088/2040-8978/13/9/095702.
 160. Khonina S. N., Volotovskiy S. G., Minimizing the bright/shadow focal spot size with controlled side-lobe increase in high-numerical-aperture focusing systems // *Advances in Optical Technologies*. 2013. Vol. 2013(23). Article ID 267684, DOI: 10.1155/2013/267684.
 161. Khonina S. N., Volotovskiy S. G., Fidirko N. S. Iterative approach to solve the inverse diffraction problem under sharp focusing conditions, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2017. Vol. 26(1). P. 18–25. DOI: 10.3103/S1060992X17010040.
 162. Khonina S. N., Golub I. Ultrafast rotating dipole or propeller-shaped patterns: subwavelength shaping of a beam of light on a femtosecond time scale // *Optics Letters*. 2016. Vol. 41(7). P. 1605–1607. DOI: 10.1364/OL.41.001605.
 163. Khonina S. N., Golub I. Tighter focus for ultrashort pulse vector light beams: change of the relative contribution of different field components to the focal spot upon pulse shortening // *Journal of the Optical Society of America A*. 2018. Vol. 35(6). P. 985–991. DOI: 10.1364/JOSAA.35.000985.
 164. Сравнение фокусировки коротких импульсов в приближении Дебая / С. Н. Хонина, А. В. Устинов, С. Г. Волоотовский // *Компьютерная оптика*. 2018. Т. 42, № 3. С. 432–446. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-432-446.

165. Распространение импульсов поля и расчёт динамических инвариантов в волноводе с выпуклой оболочкой / С. И. Харитонов, С. Г. Волоотовский, С. Н. Хонина, Н. Л. Казанский // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42, № 6. С. 947–958. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-947-958.
166. Spatiotemporal dynamics of the polarisation state of laser radiation performed by lens-axicon combinations / S. N. Khonina, S. G. Volotovskiy, A. V. Ustinov, A. P. Porfirev // Physics Letters A. 2019. Vol. 383(21). P. 2535–2541. DOI: 10.1016/j.physleta.2019.05.006.
167. Программное обеспечение для расчета и оптимизации субволновой локализации вихревого импульсного лазерного излучения на оптических нано- и микроструктурах / С. Г. Волоотовский, Д. А. Савельев, С. Н. Хонина : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020665507 от 27.11.2020, заявка № 2020664286 от 17.11.2020.
168. А.С. № 223931 СССР. МПК H01J 25/00. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн : заявл. 24.03.1967 : опубл. 25.03.1976 / Гапонов А. В., Гольденберг А. Л., Петелин М. И., Юлпатов В. К.
169. Denisov G. G. [et al.]. The concept of a gyrotron with megawatt output at both first and second cyclotron harmonics for plasma heating in spherical tokamaks // Radiophysics and Quantum Electronics. 2020. Vol. 63. P. 345–353. DOI: 10.1007/s11141-021-10059-x.
170. Glyavin M. Y. Development and applications of THz gyrotrons // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. Article ID 01008. DOI: 10.1051/epjconf/201714901008.
171. Williams B. S. Terahertz quantum-cascade lasers // Nature Photonics. 2007. Vol. 1(9). P. 517–525. DOI: 10.1038/nphoton.2007.166.
172. Köhler R. [et al.]. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // Nature. 2002. Vol. 417(6885). P. 156–159. DOI: 10.1038/417156a.
173. Soifer V. A. Computer image processing, Part I: Basic concepts and theory. VDM Verlag Dr. Müller, 2010. ISBN: 978-3639168372.
174. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // Nature Photonics. 2007. Vol. 1(2). P. 97–105. DOI: 10.1038/nphoton.2007.3.
175. Cherkassky V. S. [et al.]. Introspectivity of solids at novosibirsk terahertz free electron laser // 2006 Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics. 2006. P. 320–320. DOI: 10.1109/ICIMW.2006.368528.
176. Hübers H.-W., Richter H., Wienold M. High-resolution terahertz spectroscopy with quantum-cascade lasers // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 125(15). Article ID 151401. DOI: 10.1063/1.5084105.

177. Kulipanov G. N. [et al.]. Experimental study of the interaction between terahertz radiation from the Novosibirsk free-electron laser and water aerosol // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol. 28. P. 165–168. DOI: 10.1134/S1024856015020062.
178. Chen Z., Ma X., Zhang B. [et al.]. A survey on terahertz communications // *China Communications*. 2019. Vol. 16(2). P. 1–35. DOI: 10.12676/j.cc.2019.02.001.
179. Grant P. D. [et al.]. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector // *Electronics Letters*. 2009. Vol. 45(18). P. 952–954. DOI: 10.1049/el.2009.1586.
180. Голография и дифракционная оптика терагерцового диапазона / В. С. Павельев, В. В. Герасимов, К. Н. Тукмаков, М. С. Комленок, С. Н. Хонина, С. А. Дегтярев, А. Н. Агафонов, В. А. Соيفер, В. И. Конов, Н. Д. Осинцева, Ю. Ю. Чопорова. В кн.: *Терагерцовая фотоника*. М.: Российская академия наук, 2023. С. 394–485. ISBN: 978-5-907645-40-0.
181. Knyazev B. A. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: Comparative description of imaging techniques with examples of application // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2011. Vol. 32. P. 1207–1222. DOI: 10.1007/s10762-011-9773-x.
182. Glyavin M. Yu., Denisov G. G. The progress in high frequency, high power gyrotron development in Russia // *Proceedings of SPIE*. 2020. Vol. 11582. Article ID 1158213. DOI: 10.1117/12.2580566.
183. Kulipanov G. N. [et al.]. Novosibirsk free electron laser – Facility description and recent experiments // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2015. Vol. 5(5). P. 798–809. DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2453121.
184. Tan P., Huang J., Liu K. [et al.]. Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications // *Science China Information Sciences*. 2012. Vol. 55(1). P. 1–15. DOI: 10.1007/s11432-011-4515-1.
185. Choporova Y., Knyazev B., Pavelyev V. Holography with high-power CW coherent terahertz source: optical components, imaging, and applications // *Light: Advanced Manufacturing*. 2022. Vol. 3(3). P. 525–541. DOI: 10.37188/lam.2022.031.
186. Terahertz Bessel beams formed by binary and holographic axicons / B. Knyazev, N. Osintseva, M. Komlenok, V. Pavelyev, V. Gerasimov, O. Kameshkov, Y. Choporova, K. Tukmakov // *Photonics*. 2023. Vol. 10(6). Article ID 700. DOI: 10.3390/photonics10060700.
187. Генерация Бесселевых закрученных пучков в субтерагерцовом диапазоне с использованием отражающих дифракционных оптических элементов / В. В. Герасимов, Н. Д. Осинцева, В. С. Павельев, А. Н.

- Агафонов // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 3. С. 334–341. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1410.
188. Diamond diffractive lens with a continuous profile for powerful terahertz radiation / M. Komlenok, T. Kononenko, D. Sovyk, V. Pavelyev, B. Knyazev, E. Ashkinazi, A. Reshetnikov, G. Komandin, V. Pashinin, V. Ralchenko, V. Konov // Optics Letters. 2021. Vol. 46(2). P. 340–343. DOI: 10.1364/OL.414097.
189. Экспериментальное исследование самовосстановления терагерцовых Бесселевых пучков с орбитальным угловым моментом / В. С. Павельев, К. Н. Тукмаков, А. С. Решетников, В. В. Герасимов, Н. Д. Осинцева, Б. А. Князев // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 5. С. 673–677. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-845.
190. Focusing of Novosibirsk Free Electron Laser (NovoFEL) radiation into paraxial segment / A. N. Agafonov, B. O. Volodkin, D. G. Kachalov, B. A. Knyazev, G. I. Kropotov, K. N. Tukmakov, V. S. Pavelyev, D. I. Tsyppishka, Yu. Yu. Choporova, A. K. Kaveev // Journal of Modern Optics. 2016. Vol. 63(11). P. 1051–1054. DOI: 10.1080/09500340.2015.1118163.
191. Идентификация эрмит-гауссовых и бесселевых мод терагерцового пучка с помощью дифракционных оптических элементов / Н. Д. Осинцева, В. В. Герасимов, Ю. Ю. Чопорова, В. Д. Кукотенко, В. С. Павельев, Б. А. Князев // Оптический журнал. 2024. Т. 91, № 4. С. 3–15. DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-04-3-15.
192. Experimental studies in quantum cryptography / V. L. Kurochkin, A. V. Zverev, Yu. V. Kurochkin [et al.] // Russian Microelectronics. 2011. Vol. 40(4). P. 245–253. DOI: 10.1134/S1063739711040068.
193. Vortex surface plasmon polaritons on a cylindrical waveguide: Generation, propagation, and diffraction / V. V. Gerasimov, O. E. Kameshkov, B. A. Knyazev, N. D. Osintseva, V. S. Pavelyev // Journal of Optics. 2021. Vol. 23(10). Article ID 10LT01. DOI: 10.1088/2040-8986/ac1fc4.
194. Knyazev B. [et al.]. Quasi-Talbot effect with vortex beams and formation of vortex beamlet arrays // Optics Express. 2018. Vol. 26(11). P. 14174–14185. DOI: 10.1364/OE.26.014174.
195. Ikonnikov D. A. [et al.]. Two-dimensional Talbot effect of the optical vortices and their spatial evolution // Scientific Reports. 2020. Vol. 10(1). Article ID 20315. DOI: 10.1038/s41598-020-77418-y.
196. Puttnam B. J., Luis R. S., Phillips I. [et al.]. 402 Tb/s GMI data-rate OESCLU-band transmission // 2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2024. P. 1–3.
197. Meindl J. D., Chen Q., Davis J. A. Limits on silicon nanoelectronics for terascale integration // Science. 2001. Vol. 293(5537). P. 2044–2049. DOI: 10.1126/science.293.5537.2044.

198. Vivien L, Pavesi L. Handbook of silicon photonics. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group LLC, 2016. ISBN: 978-1-4398-3611-8.
199. Углеродная фотоника / В. Г. Ральченко [и др.]; отв. ред. В. И. Конов. М.: Наука, 2017. 327 с. ISBN: 978-5-02-039997-6.
200. Фотонно-кристаллический резонатор на алмазной пленке / К. Н. Тукмаков, Б. О. Володкин, В. С. Павельев, М. С. Комленок, А. А. Хомич // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. Т. 7, вып. 38. С. 112–116.
201. Wilson D. J., Schneider K., Hönl S. [et al.]. Integrated gallium phosphide nonlinear photonics // Nature Photonics. 2020. Vol. 14. P. 57–62. DOI: 10.1038/s41566-019-0537-9.
202. Bruinink C. M. [et al.]. Nanoimprint lithography for nanophotonics in silicon // Nano Letters. 2008. Vol. 8(9). P. 2872–2877. DOI: 10.1021/nl801615c.
203. Sirleto L., Righini G. C. An introduction to nonlinear integrated photonics devices: Nonlinear effects and materials // Micromachines. 2023. Vol. 14(3). Article ID 604. DOI: 10.3390/mi14030604.
204. Hussein H. M. E., Ali T. A., Rafat N. H. New designs of a complete set of photonic crystals logic gates // Optics Communications. 2018. Vol. 411. P. 175–181. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.11.043.
205. Rani P., Kalra Y., Sinha R. K. Realization of AND gate in Y-shaped photonic crystal waveguide // Optics Communications. 2013. Vol. 298–299. P. 227–231. DOI: 10.1016/j.optcom.2013.02.014.
206. Xu Q., Lipson M. All-optical logic based on silicon micro-ring resonators // Optics Express 2007. Vol. 15(3). P. 924–929. DOI: 10.1364/oe.15.000924.
207. Pashamehr A., Zavvari M., Alipour-Banaei H. All-optical AND/OR/NOT logic gates based on photonic crystal ring resonators // Frontiers of Optoelectronics. 2016. Vol. 9. P. 578–584. DOI: 10.1007/s12200-016-0513-7.
208. Wu J., Ma H., Yin P. [et al.]. Two-dimensional materials for integrated photonics: Recent advances and future challenges // Small Science. 2021. Vol. 1(4). Article ID 2000053. DOI: 10.1002/smssc.202000053.
209. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58(20). Article ID 2059. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.2059.
210. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58(23). Article ID 2486. DOI: 10.1103/PhysRevLett.58.2486.

211. Kotb A., Zoiros K. E., Hatziefremidis A. [et al.]. Optical logic gates based on Z-shaped silicon waveguides at 1.55 μm // *Micromachines*. 2023. Vol. 14(6). Article ID 1266. DOI: 10.3390/mi14061266.
212. Ke H., Shi P., Li P. [et al.]. Photonic crystal broadband y-shaped 1×2 beam splitter inversely designed by genetic algorithm // *Optical Engineering*. 2023. Vol. 62(6). Article ID 065106. DOI: 10.1117/1.OE.62.6.065106.
213. Jiang L. [et al.] Optimization of low-loss and wide-band sharp photonic crystal waveguide bends using the genetic algorithm // *Optik*. 2013. Vol. 124(14). P. 1721–1725. DOI: 10.1016/j.ijleo.2012.06.005.
214. Кривошеева Ю. Ю., Головашкин Д. Л. Расчет волноводных фотонно-кристаллических структур с изгибами с помощью генетического алгоритма // *Материалы XVII всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Математическое и компьютерное моделирование естественно-научных и социальных проблем»*. 2023. Article ID 151.
215. Dyachenko P. N., Pavelyev V. S., Soifer V. A. Graded photonic quasicrystals // *Optics Letters*. 2012. Vol. 37(12). P. 2178–2180. DOI: 10.1364/OL.37.002178.
216. Патент RU 2819193 C1 Российская Федерация, МПК G02F 1/00 (2006.01), G02B 6/00 (2006.01). Оптический диод на двумерных фотонных кристаллах : № 2023124652 : заявл. 25.09.2023 : опубл. 15.05.2024 / Мокшин П. В., Павельев В. С., Головашкин Д. Л. ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет). 9 с. : ил.
217. Parandin F., Chimawi G. I. K., Olyae S. Realization of ultra-compact and high contrast ratio all-optical 4-to-2 encoder based on 2D photonic crystals // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14(1). Article ID 21091. DOI: 10.1038/s41598-024-72266-6.
218. Application of the direct search in solving a problem of forming longitudinal distribution of intensity / D. G. Kachalov, V. S. Pavelyev, S. N. Khonina, R. V. Skidanov, O. Yu. Moiseev // *Journal of Modern Optics*. 2011. Vol. 58(1). P. 69–76. DOI: 10.1080/09500340.2010.536592.
219. Krivosheeva Y. Y., Golovashkin D. L., Pavelyev V. S. Design of the intersection node of photonic crystal waveguides using a genetic algorithm // *2024 X International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*. 2024. P. 1–5. DOI: 10.1109/ITNT60778.2024.10582340.
220. Moxsin P., Golovashkin D., Pavelyev V. Modeling of photonic crystal couplings: diagnostic waveguide, self-collimated waveguide and planar

- waveguide // 2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/ITNT57377.2023.10139164.
221. Dutta H. S., Goyal A. K., Srivastava V. [et al.]. Coupling light in photonic crystal waveguides: A review // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2016. Vol. 20. P. 41–58. DOI: 10.1016/j.photonics.2016.04.001.
222. Sanchis P., Bienstman P., Luyssaert B. [et al.]. Analysis of butt coupling in photonic crystals // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2004. Vol. 40(5). P. 541–550. DOI: 10.1109/JQE.2004.82642.
223. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. 1991. Vol. 354. P. 56–58. DOI: 10.1038/354056a0.
224. Novoselov K. S. [et al.]. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*. 2004. Vol. 306(5696). P. 666–669. DOI: 10.1126/science.1102896.
225. Recent trends in the fabrication of photodetectors: A detailed analysis on the photodetection properties of new 2D-TMCs / A. Rymzhina, P. Sharma, V. Pavelyev, P. Mishra, N. Tripathi // *Materials Today Communications*. 2023. Vol. 35. Article ID 106247. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106247.
226. Choi W., Cho M. Y., Konar A. [et al.]. High-detectivity multilayer MoS₂ phototransistors with spectral response from ultraviolet to infrared // *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24(43). P. 5832–5836. DOI: 10.1002/adma.201201909.
227. Advances in transition metal dichalcogenides-based flexible photodetectors / V. Pavelyev, P. Sharma, A. Rymzhina, P. Mishra, N. Tripathi // *Journal of Material Science: Materials in Electronics*. 2022. Vol. 33. P. 24397–24433. DOI: 10.1007/s10854-022-09204-7.
228. Xie M., Hisano K., Zhu M. [et al.]. Flexible multi-functional sensors for wearable and robotic applications // *Advanced Materials Technologies*. 2019. Vol. 4(3). Article ID 1800626. DOI: 10.1002/admt.201800626.
229. Development of high-performance broadband optical detector for cryogenic to elevated operating temperature / M. Talib, S. Manzoor, P. Sharma, N. Tripathi, V. Platonov, V. Pavelyev, V. S. Volkov, A. V. Arsenin, A. V. Syuy, P. M. Z. Hasan, A. A. Melaibari, P. Mishra // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2023. Vol. 158. Article ID 107364. DOI: 10.1016/j.mssp.2023.107364.
230. Segev-Bar M, Haick H. Flexible sensors based on nanoparticles // *ACS Nano*. 2013. Vol. 7(10). P. 8366–8378. DOI: 10.1021/nn402728g.
231. Choi C., Choi M. K., Liu S. [et al.]. Human eye-inspired soft optoelectronic device using high-density MoS₂-graphene curved image sensor

- array // Nature Communications. 2017. Vol. 8. Article ID 1664. DOI: 10.1038/s41467-017-01824-6.
232. Chen S., Teng C., Zhang M. [et al.]. A flexible UV–Vis–NIR photodetector based on a perovskite/conjugated-polymer composite // Advanced Materials. 2016. Vol. 28(28). P. 5969–5974. DOI: 10.1002/adma.201600468.
233. Sun Z., Liu Z., Li J. [et al.]. Infrared photodetectors based on CVD-grown graphene and PbS quantum dots with ultrahigh responsivity // Advanced Materials. 2012. Vol. 24(43). P. 5878–5883. DOI: 10.1002/adma.201202220.
234. Tao Y., Wu X., Wang W. [et al.]. Flexible photodetector from ultraviolet to near infrared based on a SnS₂ nanosheet microsphere film // Journal of Materials Chemistry C. 2015. Vol. 3(6). P. 1347–1353. DOI: 10.1039/C4TC02325K.
235. Chen G., Wang W., Wang C. [et al.]. Controlled synthesis of ultrathin Sb₂Se₃ nanowires and application for flexible photodetectors // Advanced Science. 2015. Vol. 2(10). Article ID 1500109. DOI: 10.1002/advs.201500109.
236. Chitara B., Panchakarla L. S., Krupanidhi S. B. [et al.]. Infrared photodetectors based on reduced graphene oxide and graphene nanoribbons // Advanced Materials. 2011. Vol. 23(45). P. 5419–5424. DOI: 10.1002/adma.201101414.
237. Zheng Z., Zhang T., Yao J. [et al.]. Flexible, transparent and ultra-broadband photodetector based on large-area WSe₂ film for wearable devices // Nanotechnology. 2016. Vol. 27(22). Article ID 255501. DOI: 10.1088/0957-4484/27/22/225501.
238. Hao Q., Tang X., Cheng Y. [et al.]. Development of flexible and curved infrared detectors with HgTe colloidal quantum dots // Infrared Physics and Technology. 2020. Vol. 108. Article ID 103344. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103344.
239. Review of titanium trisulfide (TiS₃): A novel material for next generation electronic and optical devices / N. Tripathi, V. Pavelyev, P. Sharma, S. Kumar, A. Rymzhina, P. Mishra // Materials Science in Semiconductor Processing. 2021. Vol. 127. Article ID 105699. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105699.
240. Сверхбыстрый высокочувствительный гибкий детектор инфракрасного излучения / А. Р. Рымжина, П. Шарма, В. В. Подлипнов, К. Н. Тукмаков, В. С. Павельев, В. И. Платонов, П. Мишра, Н. Трипати // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48, № 3. С. 363-370. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1325.

241. Mak K. F., Lee C., Hone J. [et al.]. Atomically thin MoS₂: A new direct-gap semiconductor // *Physical Review Letters*. 2010. Vol. 105(13). Article ID 136805. DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.136805.
242. Buscema M., Barkelid M., Zwiller V. [et al.]. Large and tunable photothermoelectric effect in single-layer MoS₂ // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13(2). P. 358–363. DOI: 10.1021/nl303321g.
243. Chang Y. H., Zhang W., Zhu Y. [et al.]. Monolayer MoSe₂ grown by chemical vapor deposition for fast photodetection // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8(8). P. 8582–8590. DOI: 10.1021/nn503287m.
244. Hu P., Wang L., Yoon M. [et al.]. Highly responsive ultrathin GaS nanosheet photodetectors on rigid and flexible substrates // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13(4). P. 1649–1654. DOI: 10.1021/nl400107k.
245. Wan C., Kodama Y., Kondo M. [et al.]. Dielectric Mismatch mediates carrier mobility in organic-intercalated layered TiS₂ // *Nano Letters*. 2015. Vol. 15(10). P. 6302–6308. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01013.
246. Buscema M., Island J. O., Groenendijk D. J. [et al.]. Photocurrent generation with two-dimensional van der Waals semiconductors // *Chemical Society Reviews*. 2015. Vol. 44. Article ID 3691. DOI: 10.1039/C5CS00106D.
247. Jacobs-Gedrim R. B., Shanmugam M., Jain N. [et al.]. Extraordinary photoresponse in two-dimensional In₂Se₃ nanosheets // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8(1). P. 514–521. DOI: 10.1021/nn405037s.
248. Sherrell P. C., Sharda K., Grotta C. [et al.]. Thickness-dependent characterization of chemically exfoliated TiS₂ nanosheets // *ACS Omega*. 2018. Vol. 3(8). P. 8655–8662. DOI: 10.1021/acsomega.8b00766.
249. Ghorashi A., Rivera N., Shi B. [et al.]. Highly confined, low-loss plasmonics based on two-dimensional solid-state defect lattices // *Physical Review Materials*. 2024. Vol. 8(1). Article ID L011001. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.L011001.
250. Bagade S. S., Patel S., Malik M. M. [et al.]. Recent advancements in applications of graphene to attain next-level solar cells // *C*. 2023. Vol. 9(3). Article ID 70. DOI: 10.3390/c9030070.
251. Rashid M. [et al.]. Silicon quantum dot/black silicon hybrid nanostructure for broadband reflection reduction // *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2020. Vol. 115. Article ID 105113. DOI: 10.1016/j.mssp.2020.105113.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Киберфотоника – это направление фотоники, стимулированное развитием киберфизических систем.

Составляющими киберфотоники являются: фотонная сенсорика, фотонные вычисления, фотонные телекоммуникации, фотонные нейронные сети и фотонные актуаторы.

1. Гиперспектральная сенсорика зародилась в задачах дистанционного зондирования Земли. В настоящее время гиперспектральная тематика активно развивается в наземных приложениях. Появляются конструкции полнокадровых гиперспектрометров, основанных на мультиапертурных изображающих системах и спектральных фильтрах. Предложенная авторами конструкция гиперспектрометра на основе гармонических линз и стандартных баеровских фильтров цветной матрицы открывает возможность создания полнокадровых гиперспектрометров.

2. Задачи оптических вычислений, такие как интегрирование, дифференцирование и выделение контуров, которые ранее решались с использованием фурье-коррелятора, сегодня могут быть решены существенно более компактными резонансными структурами фотоники. Такие структуры (интегральные резонаторы, метаповерхности, слоистые структуры и резонансные дифракционные решётки) позволяют осуществлять временные преобразования оптических импульсов, пространственные преобразования оптических пучков и более общие пространственно-временные преобразования пространственно-временных оптических сигналов. С прогрессом технологий аналоговые оптические вычисления будут реализованы на фотонных интегральных микросхемах.

3. В последние годы появилось значительное число работ по тематике дифракционных нейронных сетей, предназначенных для оптического решения задач машинного обучения. Решён ряд акту-

альных задач, включающих разработку методов дизайна ДНС, «устойчивых» к ошибкам позиционирования образующих их дифракционных оптических элементов; разработку методов дизайна спектральных ДНС, позволяющих осуществлять параллельное решение различных задач машинного обучения на нескольких различных длинах волн и разработку методов, обеспечивающих возможности реализации нелинейных функций активации в ДНС.

4. Фундаментальные свойства вихревых лазерных пучков активно исследуются учёными, что привело к существованию огромного количества методов их генерации. Свойства вихревых пучков позволяют осуществить мультиплексирование, существенно повысить помехозащищённость и информационную безопасность каналов атмосферной и космической связи.

5. Анализ разработок в области беспроводной оптической связи, основанных на формировании структурированных лазерных пучков, обладающих орбитальным угловым моментом, показывает преимущество практического использования ДОЭ как для формирования пучков, так и для анализа их поляризационного и фазового состояний.

6. Достижения в области разработки фотонных актуаторов, основанные на использовании новых материалов и передовых технологий, демонстрируют перспективы, которые позволяют по-новому взглянуть на развитие различных областей – от микроробототехники до биомедицинских устройств. Используя фототермические, фотохимические, фотоэлектрические механизмы, удаётся создать исполнительные элементы, которые могут адаптироваться и работать с очень высокой точностью.

7. Интеллектуальный мониторинг природной и техногенной среды на множестве длин волн электромагнитного излучения обеспечивает получение результатов анализа уникальных данных, недоступных при исследовании цветных или панхроматических изображений. Использование получаемой из гиперспектральных дан-

ных информации позволяет эффективно решить широкий ряд актуальных прикладных проблем. Одним из ключевых направлений развития мониторинга природной и техногенной среды является разработка гиперспектральной аппаратуры и методов искусственного интеллекта.

8. В современных и перспективных системах технического зрения интегрируются наиболее передовые технологии, демонстрирующие в настоящее время взрывной рост: дифракционно-оптические изображающие системы, нейросетевые технологии реконструкции, обработки и анализа видеоданных, беспроводные высокоскоростные технологии передачи данных нового поколения, платформы облачных и пограничных вычислений, реализующие адаптивную потоковую обработку видеоданных на основе проактивной модели обеспечения эластичности. Объединение этих решений в рамках единой платформы киберфотоники является основой создания широкого спектра СТЗ нового поколения, превращая их в инструмент цифровой трансформации производительных и сервисных компаний.

9. Основными трендами развития киберфотонных медицинских технологий являются: использование новых спектральных диапазонов и эффектов взаимодействия с живыми системами; акцент на визуализацию патологических изменений в реальном масштабе времени; совместная визуализация как структурных и морфологических особенностей патологий, так и химических изменений за счёт применения спектральных методов анализа; широкое использование методов искусственного интеллекта; миниатюризация сенсоров и интеграция их с технологическими процессами; визуализация в наномасштабах; создание мультимодальных систем и устройств; разработка персонализированных и прогностических методов диагностики.

10. Фотоника в офтальмологии стала ключевым аспектом современной медицинской практики. Наблюдается стремительное

развитие диагностических технологий, основанных на инновационных физических методах, которые позволяют проводить раннюю диагностику патологий с высокой эффективностью. Киберфотоника в офтальмологии стала инновационной сферой, объединяющей самые передовые наработки в области оптических методов исследования информационных технологий и искусственного интеллекта и призванной революционизировать диагностику и лечение глазных заболеваний. Одним из перспективных направлений является создание технологий, способных с высокой точностью определять патологические и анатомические структуры глазного дна, что открывает путь к персонализированным лечебным подходам.

11. Коренные изменения в военном деле определяют актуальность применения методов фотоники как в решении задач борьбы с БПЛА и ПРО, так и в решении задач снятия маскировки, создания средств радиофотоники, обеспечения защищённой связи, обработки информации и т.п.

12. Применение фотоники открывает новые возможности для построения систем обработки изображений и управления динамическими объектами. Подход, основанный на теории идентификации в пространстве состояний, можно эффективно использовать для решения задач обнаружения, удалённого управления движением и определения ориентации динамических объектов.

13. Развитие мобильных киберфизических систем не ограничивается исключительно технической составляющей. Использование больших языковых моделей предполагает использование технологий искусственного интеллекта для получения, обработки информации и формирования управляющих команд.

Перспективные направления интеллектуализации киберфизических систем идут в направлении повышения автономности и работы в недетерминированной среде, а также принятия оперативных решений в сложной обстановке.

Большие перспективы повышения эффективности мобильных киберфизических систем открывает фотоника.

14. Современные вычислительные методы и технологии обеспечивают широкие и гибкие возможности проектирования и оптимизации компонентов фотоники и оптических наноструктур. Наличие мощных высокопроизводительных вычислительных средств и программных продуктов обеспечивает возможности не только моделирования их работы на основе разностных методов решения уравнений Максвелла, но и эффективной оптимизации на основе градиентных и стохастических методов. В то же время эффективное использование полученных теоретических результатов и численных методов ограничивается существующим технологическим оборудованием и освоенными методами прецизионного формирования оптических наноструктур.

15. Разработка технологий структурирования материалов терагерцового диапазона позволяет, кроме создания компонентов собственно терагерцовых киберфотонных систем, создавать экспериментальные стенды для исследования взаимодействия электромагнитной волны с различными субволновыми фотонными структурами с последующим «переносом» результатов в оптический диапазон.

16. Развитие методов и технологий компьютерного проектирования и изготовления функциональных фотонных наноструктур с заданными свойствами обеспечивает формирование элементной базы для создания цифровых устройств обработки данных в интегральном исполнении. К перспективным возможностям таких устройств относятся: а) высокое быстродействие; б) устойчивость к внешним электромагнитным помехам; в) возможность интеграции в распределённые оптикоэлектронные системы передачи и обработки информации.

17. Появление низкоразмерных фотонных материалов привело к созданию высокочувствительных фотодетекторов (в том числе в гибком исполнении), способных работать в широком диапазоне

длин волн и рабочих температур. Широкое применение фотодетекторов на низкоразмерных материалах обусловлено развитием мониторинговых систем, распределённых сенсорных систем, технологий биомедицины и «умной одежды».

По мере развития фотоники её роль в киберфизических системах будет всё более возрастать.

Наибольший прогресс киберфизических систем на основе применения фотоники в ближайшие годы ожидается в медицине, беспилотных авиационных системах широкого назначения, в системах мониторинга природной и техногенной среды, в мобильных приложениях и в военном деле.

Технический редактор Н.Ю. Ильясова
Оформление и вёрстка С.В. Смагин
Лит. редактор и корректор Ю.Н. Литвинова

Подписано к печати 9.12.2024. Усл. печ. листов 18,2.
Отпечатано в типографии «Предприятие ООО» Новая техника».
Формат 70×90/16. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Тираж 200 экз.



Киберфотоника – это раздел фотоники, ориентированной на фундаментальные исследования, дизайн и создание устройств очувствления, передачи информации, вычислений, принятия решений и управления, составляющих реализационную основу решения задачи кибернетики.

Сойфер В.А., академик РАН

Фотоника – это область знаний, в которой за последние 25 лет произошли невероятно быстрые изменения. Сегодня фотоника является движущей силой технологических инноваций и одной из важнейших ключевых промышленных технологий. В связи с вышесказанным, тема коллективной монографии «Киберфотоника», является чрезвычайно актуальной, поскольку сконцентрировала на создании киберфизических систем, решающих важные народнохозяйственные задачи, основанных на достижениях фотоники и информационных технологий.

Кульчин Ю.Н., академик РАН



Монография написана коллективом высококвалифицированных учёных, работающих в области компьютерной оптики, оптических вычислений, дифракционных нейронных сетей и лазерной связи.

Материал книги ориентирован на применение фотоники в киберфизических системах различного назначения – от медицины до военных.

Оправданным, на мой взгляд, является введение нового термина «киберфотоника», как направления фотоники, ориентированного на решение задач кибернетики.

Соколов И.А., академик РАН

