

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ФРАНЦИСКА СКОРИНЫ»**

Объект авторского права
УДК 537.874.6:621.372.8

**ШИЛОВ
Артур Владимирович**

**РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ВОЛОКНАХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.05 – Оптика

Гомель, 2026



Научная работа выполнена в учреждении образования «Могилёвский государственный университет имени А. А. Кулешова».

Научный руководитель – **Сотский Александр Борисович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики и компьютерных
технологий УО «Могилёвский государственный
университет имени А. А. Кулешова».

Официальные оппоненты: **Гончаренко Игорь Андреевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры естественных наук ГУО «Уни-
верситет гражданской защиты Министерства по
чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь»

Юревич Владимир Антонович,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры техносферной безопасности и
общей физики УО «Белорусский государственный
университет пищевых и химических технологий».

Оппонирующая организация – Кафедра квантовой радиофизики и оптоэлек-
троники Белорусского государственного уни-
верситета.

Защита состоится 24 апреля 2026 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите дис-
сертаций Д 02.12.02 при УО «Гомельский государственный университет имени
Франциска Скорины» по адресу: г. Гомель, ул. Советская, 102, аудитория 2-11.
Почтовый адрес: ул. Советская, 104, г. Гомель, 246028. Телефон ученого сек-
ретаря: 8 0232 50 38 41; e-mail: grishechkin@gsu.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УО «Гомельский гос-
ударственный университет имени Франциска Скорины».

Автореферат разослан «10» марта 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



Ю. А. Гришечкин

ВВЕДЕНИЕ

Микроструктурные волокна (МВ) представляют открытые волноводы со сложной внутренней конфигурацией. Интерес к таким объектам вызван их уникальными оптическими свойствами, перспективными для использования в современных телекоммуникационных и сенсорных системах.

Для МВ характерно наличие многих не плоских границ раздела между средами, что проявляется в форме их поперечного сечения. В такой ситуации для исследования модовых характеристик МВ и установления их оптимальных конфигураций требуется решение сложных дифракционных задач. В диссертации задачи такого рода решаются в целях определения передаточных характеристик МВ в спектральном и импульсном режимах и нахождения дифракционных полей, формирующихся при поперечном освещении данных волокон. Исследуются также вопросы оптимального проектирования сенсоров жидких и газовых сред на основе МВ.

В основу рассмотрения положен метод функции Грина¹, с применением которого дифракционные задачи по расчёту оптических полей в МВ сведены к системам алгебраических уравнений. В своей исходной формулировке¹ этот метод применим к диэлектрическим МВ, поперечное сечение которых содержит циркулярно симметричные элементы. В диссертации выполнено развитие метода функции Грина применительно к исследованию МВ с нециркулярной полой сердцевиной и МВ с циркулярными металлическими покрытиями.

В настоящее время актуальны исследования в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Транспортировка ТГц-излучения осложнена проблемой сильного поглощения ТГц-излучения всеми известными материалами, кроме сухого воздуха. В диссертации выполнены расчёты ТГц-полей и модовых характеристик для МВ с полыми сердцевинами сложной конфигурации. В результате определены возможности оптимизации параметров МВ в отношении минимизации затухания, передаваемых ТГц-сигналов, пространственной фильтрации излучения квантово-каскадных лазеров и повышения чувствительности ТГц-сенсоров водных растворов. Теоретически обоснованные рекомендации проверены экспериментально. Разработана техника суммирования модовых импульсов. Оценены эффективность импульсного возбуждения металлодиэлектрических капиллярных волокон и возможности использования таких волокон для терагерцовой спектроскопии воздуха во временной области.

В настоящее время интенсивно разрабатываются сенсоры параметров сред на основе МВ. В работе рассмотрен сенсор водорода в атмосфере, в кото-

¹ Сотский, А. Б. Теория оптических волноводных элементов : моногр. / А. Б. Сотский. – Могилев : УО «МГУ им. А.А. Кулешова», 2011. – 456 с.

ром используется изменение комплексного показателя преломления палладия в результате абсорбции им молекулярного водорода из окружающей среды. Чувствительным элементом сенсора является тейпер (локальное сужение) кварцевого МВ с палладиевым покрытием. Изменением комплексного показателя преломления палладия обуславливается изменение комплексных постоянных распространения локальных мод тейпера, и, как следствие, – спектра мощности излучения на выходе МВ. В работе предложена электродинамическая модель данного эффекта. Произведен расчёт оптических полей в сенсоре и дана интерпретация экспериментальных данных о его спектре пропускания. Определены дисперсионные характеристики палладиевого покрытия и локальных мод тейпера при различных концентрациях водорода в атмосфере. Оценены возможности максимизации чувствительности сенсора. Исследован также эффект резонансной связи основной вытекающей моды кварцевых МВ с модами поглощающего полимерного покрытия волокна. Оценена чувствительность соответствующих рефрактометров и сенсоров давления.

В настоящее время известно несколько способов создания структурной (дифракционной) окраски материалов – экономически и экологически выгодной альтернативы химической окраске. В диссертации исследуются возможности получения структурной окраски МВ. Для этого развиты алгоритмы расчёта дифракционных полей, формируемых при поперечном освещении МВ естественным светом, исследовано влияние на эти поля зонной структуры двумерного фотонного кристалла. Получены оценки спектрального контраста света, рассеянного МВ с гексагональной симметрией его поперечного сечения. Предложены конфигурации МВ с выраженной структурной окраской.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Исследования по теме диссертации выполнены в учреждении образования «Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова» в рамках следующих научных программ и тем:

– задание 2.2.17 «Оптическая диагностика наноразмерных слоев» ГПНИ «Электроника и фотоника» (сроки выполнения: 03.01.2014 – 31.12.2015; № гос. регистрации 20142380);

– проект БРФФИ Наука-М «Резонансное отражение света планарными тонкоплёночными структурами» (договор № Ф14М-146 от 23.05.2014; сроки выполнения: 23.05.2014 – 31.03.2016; № гос. регистрации 20143088);

– задание 1.3.03 «Разработка теории методов оптического контроля наноразмерных тонкоплёночных структур» ГПНИ «Фотоника, опто- и микро-

электроника» (сроки выполнения: 23.02.2016 – 31.12.2020; № гос. регистрации 20161336);

– международный контракт №18791 “Development of the software based on the rigorous full-vectorial method of integral equations for computing and design of the modal characteristics of the microstructured optical fibers”, between Educational institution Mogilev State A. Kuleshov University and Centro de Investigaciones en Optica (Mexico) (срок выполнения: 18.05.2016 – 17.08.2016, № гос. регистрации 20163476);

– проект БРФФИ «Исследование распространения терагерцовых импульсов в структурированных волокнах» (согласно договору с ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» № Ф16Р – 138/1 от «20» мая 2016 г.; руководитель – Сотский А.Б.; срок выполнения 20 мая 2016 г. по 30 марта 2018 г.; № гос. регистрации 20163872);

– проект БРФФИ «Терагерцовые волноводные сенсоры для диагностики и спектроскопии газовых и конденсированных сред» (согласно с договором с ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» № Ф18Р – 143/1 от 01.06.2018 г.; срок выполнения: 01.06.2018 – 01.06.2020; № гос. регистрации 20181633);

– аспирантский грант Министерства образования Республики Беларусь «Разработка методов расчёта и оптимальное проектирование фотонно-кристаллических волокон со структурной окраской» (период выполнения: 21.03.2019 – 31.12.2019; № гос. регистрации 20190693);

– задание 1.15 «Разработка метода бесконтактной волноводной спектроскопии тонкопленочных структур и сред» ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций» (сроки выполнения 16.03.2021 – 31.12.2025; № гос. регистрации 20211116).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке эффективных методов расчёта оптических полей в МВ с учетом открытого характера структур и решении на этой основе проблем оптимизации конфигураций МВ для транспортировки терагерцового излучения и сенсорных приложений.

Задачами исследования являются:

– разработка теории передачи широкополосных импульсов металлodieлектрическими волноводами, выяснение возможностей применения данных волноводов в ТГц-спектроскопии воздуха во временной области;

– разработка методов расчёта модовых характеристик капиллярных МВ с полый сердцевинной сложной конфигурации и структурированной оболочкой, определение возможностей использования МВ такого типа для транс-

портитровки ТГц-излучения на значительные расстояния и в качестве чувствительных элементов ТГц-сенсоров состава жидких сред;

– разработка теории преобразования оптических полей в МВ со сплошной сердцевиной и циркулярными тонкопленочными покрытиями, расчёт спектров пропускания таких структур, при их использовании в качестве чувствительных элементов сенсоров концентрации водорода в атмосфере, показателей преломления и давления жидких сред;

– разработка методов и алгоритмов расчёта дифракционных полей при поперечном освещении МВ, определение внутренней конфигурации МВ, обеспечивающей его выраженную структурную окраску.

Объектом исследования являются микроструктурные волокна.

Предметом исследования являются оптические поля, направляемые вдоль МВ и формируемые при поперечном освещении МВ.

Научная новизна

1. Впервые разработан метод суммирования модовых импульсов в металлодиэлектрических МВ, с применением которого описаны поля широкополосных ТГц-импульсов в МВ и оценены возможности оптимизации сенсоров газов, заполняющих полую сердцевину МВ.

2. Развита метод функции Грина, предназначенный для строгого расчёта модовых характеристик капиллярных МВ с поллой сердцевиной и циркулярным диэлектрическим покрытием конечной толщины. На его основе впервые найдены конфигурации поперечного сечения полимерных МВ, оптимальные в целях минимизации затухания передаваемого ТГц-сигнала, определения состава растворов, пространственной фильтрации излучения квантово-каскадного лазера. Результаты расчётов подтверждены экспериментально.

3. Впервые получены оценки спектров пропускания волоконно-оптических рефрактометров и сенсоров давления в жидкости, основанных на эффекте резонансной связи основных вытекающих мод кварцевых МВ с модами их циркулярного поглощающего полимерного покрытия.

4. Предложена новая конфигурация диэлектрического волокна с продольно-гофрированной поллой сердцевиной, отличающаяся от стандартного гладкостенного волокна тех же поперечных размеров более низким уровнем потерь оптического сигнала и характеризующаяся в полосе пропускания аномальной дисперсией дифракционной природы.

5. Впервые произведен анализ преобразования мод на нерегулярных участках тейпера в МВ в условиях коллапса внутренних воздушных каналов. Дана интерпретация экспериментальных данных о спектральном отклике оптического сенсора концентрации водорода в атмосфере, чувствительным эле-

ментом которого является тонкопленочное палладиевое покрытие тейпера, и оценены возможности максимизации чувствительности сенсора.

6. Разработан метод расчёта конфигураций запрещенных зон двумерного фотонного кристалла гексагональной симметрии. Впервые определены условия получения выраженной структурной окраски МВ при его поперечном освещении естественным светом.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод векторного суммирования полей собственных мод полых металлодиэлектрических волокон и установленные на его основе пространственно-временная форма оптических импульсов в таких волокнах и возможность подавления высших мод волокна, затрудняющих терагерцовую спектроскопию сред, в диэлектрическом слое оптимальной толщины, локализованном на поверхности металла.

2. Развитый строгий метод функции Грина и рассчитанные с его применением конфигурации микроструктурных волокон с мультикапиллярной оболочкой и полый сердцевинной, при которых обеспечивается минимальное затухание передаваемых терагерцовых импульсов, максимизация чувствительности волноводных сенсоров растворов и оптимизация параметров излучения квантово-каскадных лазеров.

3. Спектр пропускания тейпера в фотонно-кристаллическом волокне, рассчитанный методом связанных локальных мод в условиях коллапса образующих воздушных каналов, интерпретация экспериментальных данных о спектральном отклике волоконно-оптического сенсора концентрации водорода в атмосфере с чувствительным элементом в виде палладиевой пленки, локализованной на поверхности тейпера, и установленные условия максимизации чувствительности сенсора.

4. Установленная корреляция между зонной структурой двумерного фотонного кристалла в поперечном сечении микроструктурного волокна и контрастом структурной окраски волокна при его поперечном освещении естественным светом, и конфигурация волокна, при которой реализуется его выраженная структурная окраска.

Личный вклад соискателя ученой степени

Диссертационная работа отражает личный вклад соискателя в разработку методов исследования оптических полей в МВ. Представленный в диссертации физический анализ и материал, на основе которого сформулированы защищаемые положения, принадлежат соискателю. Научным руководителем, доктором физико-математических наук А. Б. Сотским определено направление исследований, сформулированы его задачи и предложены методы их решения.

Соавторами совместных работ были подготовлены их обзорные части и произведен анализ технологических проблем (Г. В. Сеницын, В. И. Соколов и А. М. Гончаренко), изготовлены экспериментальные образцы исследованных МВ (К. А. Бжеумихов и З. Ч. Маргушев), измерены спектры пропускания (М. М. Назаров, А. П. Шкуринов), экспериментально исследована дисперсия полипропилена (А. А. Ангелуц и И. А. Ожередов), изготовлены МВ в виде фотонных кристаллов и измерены их спектры пропускания в оптическом диапазоне частот (V. P. Minkovich, S. M. Sicacha). Л. И. Сотская принимала участие в разработке и отладке компьютерных программ по расчёту модовых характеристик МВ. С. С. Михеевым произведен анализ модовых характеристик волокон трубчатой конфигурации. Е. А. Чудакову принадлежат результаты по установлению корреляции между затуханием мод МВ с поглощающими покрытиями и конфигурацией их полей. Д. В. Понкратовым произведен оптимизационный расчёт сенсоров на основе прямоугольного металлического волновода с диэлектрическим гофром. Остальные соавторы принимали участие в решении частных вопросов, не включённых в настоящую диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты доложены на следующих научных собраниях: IV, V Международных научных конференциях «Оптика неоднородных структур – 2015, 2019» (Могилев, 29–30 октября 2015, 28–29 мая 2019); International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO-LAT, Minsk, 26–30 сентября 2016); Международных научно-технических конференциях молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 27–28 октября 2016, 25–26 октября 2018, 24–25 сентября 2019); IV Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения с веществом» (Гомель, 9–11 ноября 2016); Международных научно-технических конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 27–28 апреля 2017, 26–27 апреля 2018); VI и VII Международных научно-технических конференциях «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов (Могилев, БРУ, 19–20 сентября 2017, 24–25 сентября 2020); 4th International Conference on Information Technologies and Nanotechnologies – (ITNT, Самара, 24–27 апреля 2018); 18th International Conference on Laser Optics "ICLO 2018" (Санкт-Петербург, Россия, 4–8 июня 2018); III International conference «Terahertz And Microwave Radiation: Generation, Detection And Applications (TERA 2018)» (Nizhny Novgorod, 22–25 October 2018); 4th International Conference on Applications of Optics and Photonics «AOP-2019» (Portugal, Lisbon, 3 October 2019); International Scientific Conference «The European Optical

Society Annual meeting 2020» (EOSAM-2020, online 2020); VI Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 26 апреля 2017); II Международной научно-технической конференции «ERA – современная наука: электроника, робототехника, автоматизация» (Гомель, 30–31 октября 2025); двух региональных конференциях: «Итоги научных исследований ученых МГУ имени А. А. Кулешова» (Могилев, 25 января – 08 февраля 2018); научно-практической конференции студентов и аспирантов вузов Могилевской области «Молодая наука – 2019».

Методы расчёта регулярных МВ, МВ с поглощающими покрытиями и с тейперами, разработанные при выполнении международного контракта и совместных исследований, используются в Centro de Investigaciones en Optica (Leop, Mexico) при проектировании устройств на основе указанных МВ.

Результаты исследований полимерных МВ для ТГц-диапазона частот используются при проектировании и изготовлении оптимизированных МВ в НИЦ «Курчатовский Институт» (Москва) и ФНЦ КБНЦ РАН (Нальчик).

Результаты разработки алгоритмов и программного обеспечения для моделирования пространственно-временных распределений волноводных ТГц-импульсов и их спектров, а также созданный макет экспериментальной установки для измерения распределения дифракционных полей методом бесконтактной волноводной рефлектометрии внедрены в учебный процесс МГУ имени А. А. Кулешова (имеются два акта об использовании в учебном процессе).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 10 рецензируемых статьях, из которых 9 общим объемом 6,2 авт. л. в изданиях, соответствующих п. 19 Положения ВАК Беларуси о присуждении учёных степеней и присвоении ученых званий; 1 статья объемом 0,35 авт. л. – в другом рецензируемом издании; 19 статей в сборниках статей и материалов международных научных конференций; 1 и 2 статьи соответственно в сборниках материалов республиканской и региональной конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка. Общий объем диссертации составляет 192 страницы. Текст диссертации иллюстрирован 61 рисунком и 10 таблицами, занимающими соответственно 38 и 4 страницы. В диссертации цитированы 195 использованных источников (включая 32 публикации соискателя), библиографические описания которых занимают 17 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы и обозначена совокупность решаемых в ней проблем.

В главе 1 приведен аналитический обзор литературы, в котором рассмотрены ключевые этапы развития теории оптических волноводов, определены наиболее перспективные направления дальнейших исследований. Выделены задачи по расчёту электромагнитных полей при распространении оптического излучения вдоль МВ, а также при поперечном освещении МВ естественным светом. Описаны конфигурации МВ, перспективные для транспортировки излучения терагерцового диапазона, разработки сенсоров жидких и газовых сред, получения выраженной структурной окраски МВ. Обоснованы выбор направления, цель и задачи диссертационного исследования.

В главе 2 разработан метод расчёта ТГц-импульсов, направляемых полами металлодиэлектрическими капиллярами, установлены возможности применения таких капилляров для ТГц-спектроскопии воздуха во временной области, рассчитаны моды прямоугольных металлических волноводов с внутренним диэлектрическим гофром.

В разделе 2.1 метод функции Грина адаптирован для расчёта модовых характеристик металлодиэлектрических волноводов. Применительно к таким структурам в исходной формулировке названного метода существует проблема выхода рассчитываемых значений матричных элементов алгебраических систем за пределы разрядной сетки компьютера. Это ограничение преодолено посредством перенормировки амплитуд электромагнитного поля в его разложениях в ряд по цилиндрическим функциям.

В разделе 2.2 исследованы металлодиэлектрические волноводы с поллой сердцевинной. Их особенностью является многомодовый режим работы. Разработана техника суммирования модовых импульсов, в которой обеспечено описание распространения широкополосных ТГц-сигналов. При возбуждении волновода линейно поляризованным (вдоль оси Oy) гауссовым пучком радиуса w оптическое поле на расстоянии z от входного торца волновода имеет вид

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}(r, \varphi, z, t) \\ \mathbf{H}(r, \varphi, z, t) \end{pmatrix} = \sum_{v=1}^m \begin{pmatrix} \mathbf{E}_v(r, \varphi, z, t) \\ \mathbf{H}_v(r, \varphi, z, t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_v(r, \varphi, z, \tau) \\ \mathbf{H}_v(r, \varphi, z, \tau) \end{pmatrix} = 8\pi \operatorname{Re} \sum_j C_v(f_j) \begin{pmatrix} \mathbf{e}_v(r, \varphi, f_j) \\ \mathbf{h}_v(r, \varphi, f_j) \end{pmatrix} \frac{\sin(\pi \Delta f \alpha_{vj})}{\alpha_{vj}} \exp \left\{ i\omega_j \left[\tau - \frac{(\beta_v(f_j) - 1)z}{c} \right] \right\},$$

$$C_v(f) = -\hat{P}(f) \left(\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} dr r (\mathbf{e}_v \times \mathbf{h}_v^*)_z \right)^{-1} \int_0^{\infty} dr r \exp(-r^2 w^{-2}) \int_0^{2\pi} d\varphi h_{vx}^*,$$

где r, φ – полярные координаты, t – время, $\omega = 2\pi f$, f – частота, m – число учитываемых мод с безразмерными постоянными распространения β_v и поперечными распределениями электрического и магнитного полей $e_v(r, \varphi, f)$, $h_v(r, \varphi, f)$, $\hat{P}(f)$ – спектр возбуждающего импульса, $\alpha_{vj} = \tau + zc^{-1} - z\nu_{gv}^{-1}$, $\tau = t - zc^{-1}$, c – скорость света, вещественная часть параметра $\nu_{gv} = c(\beta_v + f d\beta_v / df)_{f=f_j}^{-1}$ – групповая скорость v -й моды. Выражение (1) является результатом разбиения эффективного промежутка интегрирования в фурье-представлении поля электромагнитного импульса моды на элементарные интервалы Δf с центрами на частотах $f = f_j$ и аналитического интегрирования на этих интервалах быстро осциллирующих экспонент.

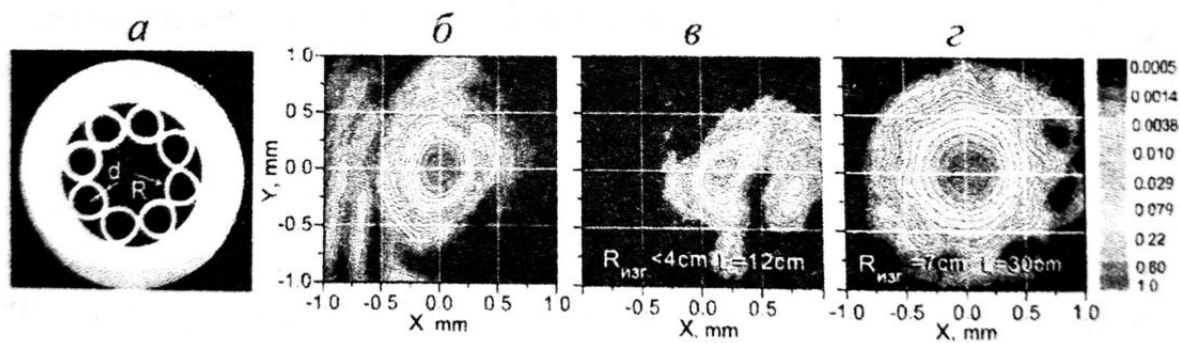
С использованием (1) в разделе 2.3 определены условия оптимального возбуждения волноводов, при которых энергия выходного импульса максимальна. Произведено моделирование волноводной ТГц-спектроскопии во временной области для волноводов, сердцевины которых заполнены сухим воздухом и воздухом с примесью водяного пара. Показано, что метод волноводной ТГц-спектроскопии во временной области пригоден для восстановления спектра поглощения примесного компонента, и что основным источником шумов при таком восстановлении является интерференция импульсов волноводных мод различного порядка. Установлено, что волноводы с тонкопленочным диэлектрическим покрытием оптимальной толщины, локализованным на поверхности металла, по сравнению с чисто металлическими волноводами характеризуются более низким уровнем шумов, достигаемым за счет подавления высших мод.

В разделе 2.4 сформулирован основанный на перемножении клеточных матриц алгоритм решения волноводной задачи для мод прямоугольного металлического волновода с внутренней микроструктурой в виде диэлектрического гофра на внутренней границе. Определены типы мод, возможные в таких волноводах. Подробно исследованы поля, представленные в виде суперпозиции мод ТЕ-поляризации. Исследована внутренняя сходимость разработанной вычислительной схемы применительно к мелкому и глубокому гофрам. Показано, что для применения волноводов в качестве газоанализатора предпочтительны глубокий гофр.

В главе 3 описаны разработанные в диссертации эффективные методы расчёта мод микроструктурных диэлектрических волокон для ТГц-диапазона частот. Исследованы микроструктурные капиллярные волокна с полый сердцевинной и оболочкой в виде кольца капилляров с воздушным заполнением, а также трубчатые волокна с продольным гофром на боковой стенке сердцевинны. Общей особенностью таких структур является квазиодномодовый режим их работы и то, что все направляемые ими моды являются вытекающими.

В разделах 3.1 и 3.2 метод функции Грина развит в целях расчёта модовых характеристик МВ с периодической и аperiodической системами капилляров в оболочке. Исследованы возможности минимизации уровня затухания передаваемого сигнала, а также использования МВ в качестве чувствительного элемента сенсора состава раствора, заполняющего отдельные капилляры. Показано, что существует число капилляров, оптимальное для минимизации затухания передаваемого сигнала при фиксированном внешнем диаметре волокна. Исследовано влияние разброса толщин в аperiodической оболочке МВ на пространственную и частотную фильтрацию излучения терагерцового квантово-каскадного лазера (ККЛ) (рисунок 1). Полученные результаты подтверждены в экспериментах, выполненных коллегами из ФНЦ КБНЦ РАН (Россия, КБР, Нальчик) и НИЦ «Курчатовский институт».

В разделе 3.3 с использованием формализма связанных локальных мод разработан метод расчёта вытекающих мод полого диэлектрического волокна с продольным гофром. Установлено, что особенностью такого волокна является аномальная модовая дисперсия дифракционной природы и то, что в одномодовом режиме работы оно отличается от своего классического гладкостенного аналога более низким уровнем затухания передаваемого ТГц-сигнала и уменьшенными поперечными размерами. Данные преимущества подтверждены при измерениях спектров пропускания волокон, выполненных в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва).



a – срез полипропиленового МВ ($d = 71$ мкм и $R = 435$ мкм) для $f = 3,1$ ТГц;
б – входное распределение терагерцового поля, измеренное с помощью терагерцовой камеры; ***в*** и ***г*** – распределение интенсивности поля моды МВ при радиусах изгиба $R_{изг}$, равных 2 см и 7 см соответственно (в логарифмическом масштабе)

Рисунок 1 – Пространственная фильтрация излучения ККЛ

В главе 4 рассмотрены МВ со сплошной сердцевинной, оболочка которых представляет двумерный фотонный кристалл.

В разделе 4.1 исследован сенсор концентрации водорода в атмосфере на основе МВ, имеющего тейпер с тонкопленочным палладиевым покрытием.

Представлена электродинамическая модель влияния изменения показателей преломления и поглощения палладия в атмосфере водорода на комплексные постоянные распространения локальных мод тейпера и на спектр мощности излучения на выходе волокна. Дана интерпретация экспериментальных спектров пропускания сенсора, определены дисперсионные характеристики палладиевого покрытия и локальных мод тейпера при различных концентрациях водорода в атмосфере. Установлено, что при нанесении палладиевого покрытия на прямолинейный участок (перетяжку) тейпера приращение концентрации водорода в атмосфере обуславливает рост интегрального пропускания сенсора и практически не влияет на положение интерференционных максимумов пропускания сенсора на шкале длин волн. Показано, что существует оптимальная длина перетяжки тейпера, при которой чувствительность сенсора максимальна. Согласно расчётам, при переходе от экспериментальной длины перетяжки ($L = 10000$ мкм) к оптимальной ($L = 6375$ мкм) мощность на выходе устройства увеличивается в 4, а чувствительность сенсора – в 3 раза.

В разделе 4.2 рассчитаны спектры пропускания одномодового МВ с поглощающим тонкопленочным полимерным покрытием. Установлены два механизма формирования таких спектров.

В соответствии с первым из них основная вытекающая мода МВ находится в фазовом синхронизме с вытекающей модой пленочного полимерного покрытия. Эта связь обуславливает резонансный захват и диссипацию энергии основной моды МВ поглощающим покрытием.

Второй механизм более сложен и может быть реализован в МВ с достаточно малыми диаметрами оболочки, которые могут иметь место на участке перетяжки тейпера. Он обусловлен резонансной связью вытекающей основной моды МВ с модами оболочки, локализованными между воздушными каналами и поглощающим покрытием. При первом механизме, в отличие от последнего, формируются более узкие спектральные полосы поглощения. Приведены результаты оценки параметров основанных на указанных эффектах сенсоров показателя преломления и давления в жидких средах, иллюстрирующие их преимущества перед волоконно-оптическими сенсорами на основе стандартных оптических волокон.

В главе 5 изложены алгоритмы, использованные для описания поперечной дифракции света на МВ, измерения дифракционных полей и определения конфигураций МВ с выраженной структурной окраской.

В разделе 5.1 разработан метод локальных мод для воздушных каналов МВ. В дифференциальных уравнениях второго порядка, описывающих световое поле в каждом канале при его поперечном освещении, выделены радиальные и угловые дифференциальные операторы. Для угловых операторов сформулированы и решены задачи Штурма – Лиувилля с периодическими краевыми

ми условиями, определяющие спектр локальных мод. В выражениях локальных мод учтена внутренняя структура конкретного воздушного канала, что существенно ускоряет внутреннюю сходимость численного алгоритма расчёта поля по сравнению со свойственной другим базисным функциям. Исследованы поля и дисперсионные характеристики локальных мод.

В разделе 5.2 методом Галёркина получены системы обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд локальных мод, в которых учтена структура гофрированной границы воздушных каналов. Описан алгоритм численного построения фундаментальных решений составленных систем.

В разделе 5.3 с использованием техники функции Грина и теоремы сложения цилиндрических функций Графа сформулированы строгие алгоритмы расчёта дифракционных полей при поперечном освещении МВ с образующими каналами сложного сечения. Рассчитаны погонные сечения рассеяния на МВ с внутренними каналами циркулярного и гофрированного сечения.

В разделе 5.4 произведен анализ зависимости дифференциальных и интегральных сечений рассеяния от нормированных параметров конфигурации МВ с циркулярными сечением образующих каналов. Центры каналов совмещены с узлами гексагональной решетки периода Λ . Показано, что при $0,01 \leq \Lambda / \lambda \leq 2,0$ и $0 < r / \Lambda < 0,5$, где r – радиус каналов, существует несколько локальных максимумов значений интегрального сечения рассеяния $\bar{\sigma}_i$ в диапазоне углов обратного рассеяния $0,5\pi \leq \alpha \leq 1,5\pi$ (рисунок 2, а). Фрагменту б на рисунке 2 соответствует диапазон $0,0 \leq \Lambda / \lambda \leq 1,0$, фрагменту в – диапазон $0,35 \leq \Lambda / \lambda \leq 0,65$. Сиреневый цвет точек на фрагментах б и в соответствует неполным запрещенным зонам при угле падения $\theta = \pi / 3$, розовый – $\theta = \pi / 6$, черный – $\theta = 0$.

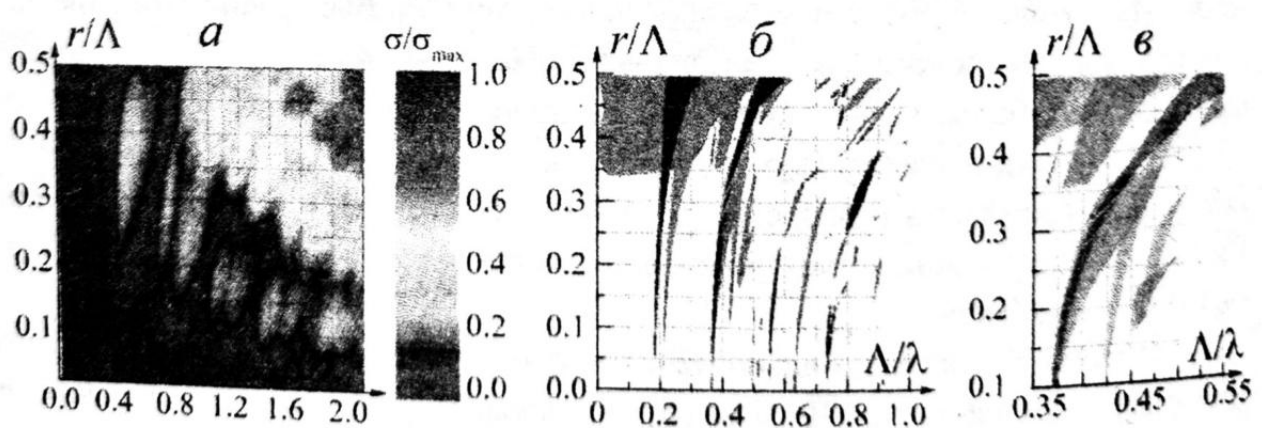


Рисунок 2 – Двумерный график зависимости интегрального сечения рассеяния $\bar{\sigma}_i$ для кластера воздушных каналов (а) и зонные диаграммы (б, в) для фотонного кристалла с гексагональной симметрией

Среди найденных комбинаций Λ/λ и r/Λ существует глобальный оптимум, при котором значительно улучшается монохроматичность и контрастность наблюдаемого структурного окрашивания МВ. Его положение соответствует рассчитанным зонным диаграммам двумерного фотонного кристалла с гексагональной симметрией (рисунок 2, в). Сформулированы два условия получения выраженной структурной окраски МВ. Первым из них является наличие максимумов дифференциального и интегрального сечений рассеяния в диапазоне углов $0,5\pi \leq \alpha \leq 1,5\pi$. Второе условие – соответствие относительных размеров МВ неполной запрещенной зоне фотонного кристалла при отражении падающего излучения на длине волны $\lambda \approx \lambda_0$, а при удалении от значения λ_0 – разрешенной зоне. Значение центральной длины волны λ_0 нужно выбирать исходя из необходимого цвета структурной окраски.

В разделе 5.5 описана установка и методика измерения на ней дифракционного распределения полей, формируемых при возбуждении микроструктурных волноводов. Представлены результаты измерения интенсивности отраженных когерентных световых пучков в виде m -линий при возбуждении мод Ценнека слоистой среды, а также угловых распределений дальнего поля, формируемого при поперечной дифракции гауссова пучка на микроструктурном волокне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана техника расчёта частотно-временного преобразования широкополосных ТГц-импульсов при распространении их по полой сердцевине металло-полимерных МВ. Ее ключевым элементом является представление поля ТГц-импульса, распространяющегося вдоль волновода, суперпозицией импульсов отдельных мод [1, с. 803–804; 13, с. 133–134; 15, с. 337–338]. С применением указанной техники исследованы импульсы на выходе металлических и металло-полимерных волноводов с полой сердцевиной [1, с. 811]. Определены условия оптимального возбуждения волноводов обоих названных типов, при соблюдении которых обеспечивается максимальное значение энергии выходного импульса при различных диаметрах и длинах волноводов [1, с. 813].

2. Выполнено моделирование ТГц-спектроскопии во временной области импульсов на выходе волноводов, сердцевины которых заполнены воздухом с примесью водяного пара. Показано, что метод волноводной ТГц-спектроскопии пригоден для восстановления спектра поглощения примесного компонента [1, с. 805], и что основным источником шумов при таком восстановлении является интерференция импульсов волноводных мод различного

порядка. Установлено, что по сравнению с чисто металлическими волноводами металлодиэлектрическим волноводам с тонкопленочным диэлектрическим покрытием оптимальной толщины свойственен более низкий уровень шумов, обусловленный подавлением высших мод металлодиэлектрического волновода [1; 13; 15].

3. Сформулированы и реализованы программно алгоритмы решения волноводных задач для вытекающих мод прямоугольных волноводов с металлизированными границами, полый сердцевинной и внутренним диэлектрическим гофром на одной из границ, основанные на перемножении клеточных матриц [9, с. 24–25]. Продемонстрирована внутренняя сходимость разработанной вычислительной схемы применительно к мелкому и глубокому гофру при числе периодов $NP = 5$ [9, с. 26–27].

4. В предположении о цилиндрической симметрии капилляров и наружного покрытия сформулирован и реализован программно алгоритм построения матриц рассеяния для капиллярного МВ с диэлектрическим покрытием конечной толщины. Алгоритм сводится к вычислению произведений 4×4 матриц, содержащих цилиндрические функции. Исследованы МВ с многокапиллярной структурой. Установлено влияние числа капилляров в оболочке и внешнего радиуса полипропиленовых ТГц-волокон на оптимальные значения толщин стенок, при которых минимизируется уровень потерь передаваемых сигналов. Оценены границы применимости аналитического приближения для расчёта оптимальных значений указанных толщин [2, с. 2–4; 14; 27; 28].

5. С использованием алгоритмов и компьютерных программ, основанных на методе интегральных уравнений, исследован модовый состав излучения и модовое двулучепреломление терагерцовых МВ с аперидической структурой воздушных каналов [2; 3]. Установлено, что в восьмиккапиллярных МВ, периодичность структуры которых нарушена изменением толщины стенок двух диаметрально-противоположных капилляров [2; 20; 25], достижимо гигантское модовое двулучепреломление (модуль разности вещественных частей безразмерных постоянных распространения основных ортогонально поляризованных мод может превосходить 0,001). Предложена конфигурация одномодового однополяризационного ТГц-волокна [3].

6. Исследованы возможности оптимизации ТГц-волокон с аперидической структурой воздушных каналов в целях минимизации коэффициента ошибки определения концентрации примесного компонента в водном растворе. В результате модификации метода интегральных уравнений удалось учесть влияние среды, заполняющей сердцевину образующих МВ капилляров, на затухание его мод [20; 25]. Построены номограммы для определения оптимальных размеров полипропиленовых капилляров в восьмиккапиллярной структуре МВ [16]. На примере ТГц-сенсора концентрации кокаина в воде теоретически

определены возможности оптимизации размеров сенсорных капилляров, нарушающих периодичность структуры волокна при их заполнении исследуемым раствором [2; 3; 20; 25].

7. Посредством метода интегральных уравнений, адаптированного к расчёту МВ с периодической и аperiodической системами воздушных каналов, исследована частотная и пространственная фильтрация излучения ККЛ. Показано, что при оптимальной толщине стенок капилляров МВ посредством подстройки частотного окна прозрачности МВ можно выделить одну из частот ККЛ и сформировать на выходе МВ излучение ККЛ с пространственным распределением, близким к гауссову [2, с. 4]. Оценено влияние технологического разброса толщин стенок капилляров на спектр излучения ККЛ, передаваемого по МВ [3; 26; 27].

8. В целях минимизации потерь передаваемого по МВ сигнала предложена конфигурация МВ с продольно-гофрированной полый сердцевинной. Уровень потерь оптического сигнала в МВ такой конфигурации ниже, чем в стандартном трубчатом волокне тех же поперечных размеров; ему свойственна также аномальная дисперсия дифракционной природы в полосе пропускания [2; 17, с. 115–118]. Показано, что уровень затухания основной моды МВ, имеющего 16 периодов гофра, рассчитанный при частоте 1,1 ТГц, составляет 1,3 дБ/м, что в 6 раз меньше уровня затухания моды полипропиленового капилляра аналогичного диаметра (около 8 дБ/м). Показано, что МВ предложенной структуры имеет лучшие характеристики для передачи широкополосных ТГц-импульсов, чем монокапилляры или монотрубки. Данный факт подтвержден экспериментально в НИЦ «Курчатовский институт» (Москва, Россия) [2; 17; 18, с. 3–5].

9. Разработана дифракционная теория преобразования мод в тейпере МВ с наноразмерным палладиевым покрытием, использованная для интерпретации экспериментальных данных о спектрах пропускания фотоннокристаллического сенсора водорода [4, с. 116–117]. В целях анализа экспериментальных спектров была разработана электродинамическая модель сенсора, содержащая $3m + 1$ вещественных параметров, ответственных за дифракционное преобразование локальных мод в областях коллапса воздушных каналов в тейпере и за дисперсионные характеристики палладиевой пленки. При таких параметрах допустима обработка экспериментальных данных о спектре пропускания сенсора методом наименьших квадратов. Показано, что получение устойчивого результата для спектров пропускания тейпера наблюдается при числе учитываемых мод $m \geq 9$ [4; 19; 28; 30].

10. Установлено, что при использовании наноразмерного палладиевого покрытия на перетяжке тейпера МВ увеличение концентрации водорода в атмосфере приводит к росту интегрального пропускания сенсора и практически

не влияет на положение интерференционных максимумов пропускания сенсора на шкале длин волн [4, с. 117]. Показано, что при фиксированной толщине палладиевой пленки существует оптимальная длина вейста, при которой чувствительность сенсора максимальна; при уменьшении длины вейста экспериментального образца от $L = 10000$ мкм до $L = 6375$ мкм мощность на выходе устройства увеличивается в четыре раза, а чувствительность, определяемая производной мощности по концентрации $dP/d\rho$ возрастает в 3 раза [19, с. 5–6].

11. Проиллюстрированы квазипериодические спектры пропускания одномодового МВ с фотонно-кристаллической оболочкой и поглощающим тонкопленочным полимерным покрытием. Установлены два механизма реализации таких спектров [5]. Первый обусловлен фазовым синхронизмом основной моды МВ и вытекающей моды пленочного покрытия [5, с. 2–3], вследствие которого происходит резонансный захват энергии основной моды МВ покрытием и выделение в нём тепла. Второй механизм возможен в МВ с достаточно малыми диаметрами оболочки, которые могут быть реализованы на участке перетяжки тейпера. Сущность этого механизма заключается в резонансной связи вытекающей основной моды МВ с модами оболочки, локализованными между воздушными каналами и поглощающим покрытием [5; 10, с. 126–128]. При первом механизме формируются более узкие спектральные полосы пропускания. В результате оценки параметров сенсоров показателя преломления и давления в жидких средах, действие которых основано на связи мод МВ и поглощающего полимерного покрытия, показано их преимущество перед стандартными волоконно-оптическими сенсорами [5; 10].

12. На основе метода интегральных уравнений и теоремы сложения цилиндрических функций сформулированы строгие алгоритмы расчёта дифракционных полей при поперечном освещении МВ с каналами сложного сечения. Произведен расчёт погонных сечений рассеяния для МВ с каналами циркулярного и гофрированного сечений. С применением зонной теории фотонных кристаллов сформулированы критерии получения выраженной структурной окраски МВ и найдена оптимальная структура воздушных каналов в МВ, при которой обеспечивается контрастная окраска МВ в узком спектральном диапазоне [6, с. 55–56; 7, с. 64–65, 68; 19, с. 252–254]. При этом показано, что нужный цвет МВ достигается при условии расположения рабочей длины волны на границе неполной запрещенной и разрешенной зон [6; 7; 16; 31].

13. Создан макет экспериментальной установки для измерения распределения интенсивности дифракционных полей, формируемых при возбуждении микроструктурных волноводов. Выполнены исследования m -линий, наблюдающихся при возбуждении мод Ценнека слоистой среды, а также угло-

вого распределения дальнего поля, формирующегося при поперечной дифракции гауссова пучка на микроструктурном волокне [8, с. 269; 32].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Рассмотренные строгие методы расчёта микроструктурных волокон целесообразно использовать для совершенствования учебного процесса по изучению современной оптики в вузах Республики Беларусь. Кроме того, эти методы могут составить основу для последующего развития оптики фотонно-кристаллических волокон с плотной упаковкой образующих каналов и МВ с нециркулярными покрытиями, выполняющими сенсорные функции. Такие волокна будут ключевыми элементами сверхчувствительных рефрактометров и биосенсоров нового поколения. Результаты, относящиеся к МВ терагерцового диапазона частот, целесообразно использовать при оптимизации схем транспортировки и преобразования терагерцового излучения в устройствах бесконтактной, дистанционной и неинвазивной диагностики различных технических объектов, материалов и культурных артефактов. Разработанные методы оценки структурной окраски МВ и максимизации ее контраста могут представлять интерес для отечественных производителей синтетических волокон.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Сотский, А. Б. Распространение терагерцовых импульсов в капиллярных волноводах с металлизированной границей / А. Б. Сотский, А. В. Шилов, Л. И. Сотская // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 803–811.

2. Eight-capillary cladding THz waveguide with low propagation losses and dispersion / M. M. Nazarov, A. V. Shilov, K. A. Bzheumikhov, Z. Ch. Margushev, V. I. Sokolov, A. B. Sotsky, A. P. Shkurinov // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2018. – Vol. 8, iss. 2. – P. 183–191.

3. A flexible terahertz waveguide for delivery and filtering of quantum-cascade laser radiation / M. Nazarov, A. Shilov, Z. Margushev, K. Bzheumikhov, I. Ozheredov, A. Angeluts, A. Sotsky, A. Shkurinov // Appl. Phys. Lett. – 2018. – Vol. 113, № 13. – P. 131107–1–131107–3.

4. Тейпер с палладиевым покрытием в фотонно-кристаллическом волокне как чувствительный элемент сенсора водорода / В. П. Минкович, А. Б. Сотский, А. В. Шилов, Л. И. Сотская // Журнал прикладной спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 1. – С. 128–135. (Taper with Palladium Coating in Photonic Crystal Fiber as a Sensitive Element of Hydrogen Sensor / V. P. Minkovich, A. B. Sotsky, A. V. Shilov, L. I. Sotskaya // Journal of Applied Spectroscopy. – 2019. – Vol. 86, № 5. – P. 112–119.).

5. Lossy mode resonances in photonic crystal fibers / M. S. Sicacha, V. P. Minkovich, A. B. Sotsky, A. V. Shilov, L. I. Sotskaya, E. A. Chudakov // Journal of the European Optical Society. – 2021. – Vol. 17, № 24. – P. 1–12.

6. Шилов, А. В. К достижению выраженной структурной окраски фотонно-кристаллического волокна / А. В. Шилов, А. Б. Сотский // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – Т. 4, № 49. – С. 51–57.

7. Сотский, А. Б. Структурная окраска синтетических волокон с кластерным поперечным сечением / А. Б. Сотский, А. В. Шилов // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. Серыя В, Прыродазнаўчыя навукі. – 2023. – Т. 2, № 62. – С. 57–70.

8. Метод m-линий при рефлектометрии ультратонких слоев / А. Б. Сотский, Е. А. Чудаков, А. В. Шилов, Л. И. Сотская // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94, № 2. – С. 267–277.

9. Шилов, А. В. Терагерцовые сенсоры на основе прямоугольных металлических волноводов с диэлектрическим гофром / А. В. Шилов,

А. Б. Сотский, Д. В. Понкратов // Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя А.А. Куляшова. Серыя В, Прыродазнаўчыя навукі. – 2023. – 2025. – Т. 1, № 65. – С. 20–32.

Статьи в других научных изданиях

10. Transmittance of Tapered Photonic Crystal Fibers with Absorbing Coatings / M. S. Sicacha, V. P. Minkovich, A. B. Sotsky, A. V. Shilov, L. I. Sotskaya // Journal of Nanotechnology Research. – 2022. – Vol. 4, № 4. – P. 125–129.

Статьи в сборниках материалов конференций

11. Структурированные полимерные волноводы для ТГц диапазона частот / М. М. Назаров, И. С. Макаров, А. Г. Савельев, В. И. Соколов, А. Б. Сотский, А. В. Шилов // Оптика неоднородных структур – 2015 : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 29–30 окт. 2015 г. / МГУ им. А. А. Кулешова ; редкол.: А. Б. Сотский (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 48–50.

12. Investigations of Capillary Polymer Terahertz Fibers / M. M. Nazarov, M. S. Kitai, V. I. Sokolov, K. A. Bzheumihov, Z. Ch. Margushev, A. B. Sotsky, A. V. Shilov, L. I. Sotskaya, A. M. Goncharenko, G. V. Sinitsyn // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, Спецвып. 6–16, ч. 4. – С. 565–566.

13. Пропускание метало-диэлектрического капилляра в терагерцовом диапазоне / А. Б. Сотский, А. В. Шилов, Л. И. Сотская, Г. В. Синицын // Проблемы взаимодействия излучения с веществом : материалы IV Междунар. науч. конф., посвящённой 90-летию со дня рождения Б. В. Бокутя, Гомель, 9–11 нояб. 2016 г. : в 2 ч. / ГГУ имени Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2016. – Ч. 2. – С. 133–138.

14. Шилов, А. В. Модовые характеристики мультикапиллярных волокон для ТГц диапазона частот / А. В. Шилов // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VI Респ. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 26 апр. 2017 г. : в 3 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины ; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2017. – Ч. 1. – С. 171–173.

15. Шилов, А. В. Терагерцовая спектроскопия воздуха при использовании волноводов с поллой сердцевиной / А. В. Шилов, А. Б. Сотский, Л. И. Сотская // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 сент. 2017 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 335–341.

16. Шилов А.В. Оптимизация мультикапиллярных полимерных волокон в терагерцовом диапазоне частот / А. В. Шилов // Итоги научных исследований ученых МГУ имени А.А. Кулешова : сб. науч. ст., Могилев,

25 янв. – 08 февр. 2018 г. / МГУ им. А. А. Кулешова ; под ред. Е. К. Сычовой. – Могилев, 2018. – С. 124–126.

17. Фотонно-кристаллические волокна, образованные воздушными каналами с гофрированной границей / А. В. Шилов, С. С. Михеев, А. Б. Сотский, М. М. Назаров, Л. И. Сотская, К. А. Бжеумихов, З. Ч. Маргушев // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ–2018) : сб. тр. IV Междунар. конф. и молодежной школы, Самара, 24–27 апр. 2018 г. / Самарск. нац. исслед. ун-т имени академика С.П. Королева. – Самара : Новая техника, 2018. – С. 114–120.

18. Photonic crystal fibers formed by air cannels with a corrugated boundary / A. V. Shilov, S. S. Miheev, A. B. Sotsky, M. M. Nazarov, L. I. Sotskaya, Kazbek A. Bzheumikhov, Zaur Ch. Margushev // Journal of Physics: IOP Conf. Series. – 2018. – Vol. 1096, iss. 1. – P. 012004-1–012004-7.

19. Electrodynamics model of a hydrogen sensor based on a special photonic crystal fiber taper coated with a nano-scale palladium film / V. P. Minkovich, A. B. Sotsky, A. V. Shilov and L. I. Sotskaya // Fourth International Conference on Applications of Optics and Photonics (AOP-2019) : Proceeding of IV Internat. Conf., Lisbon, Portugal, 3 Oct. 2019 / Proc. SPIE. – 2019. – Vol. 11207. – P. 112072E1–112072E5.

20. Капиллярные волноводы для доставки тгц излучения и диагностики растворов / М. М. Назаров, А. Г. Савельев, А. А. Ангелуц, И. А. Ожередов, З. Ч. Маргушев, А. В. Шилов // Оптика неоднородных структур – 2019 : материалы V Междунар. науч. конф., Могилев, 28–29 мая 2019 г. / МГУ им. А. А. Кулешова ; редкол.: А. Б. Сотский [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 77–82.

21. Шилов, А. В. Структурная окраска синтетических фотонно-кристаллических волокон с кластерной компоновкой воздушных каналов / А. В. Шилов, А. Б. Сотский // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : сб. ст. 7-й Межд. научн.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2020 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2020. – С. 249–254.

22. Transmittance of tapered photonic crystal fibers with absorbing coatings / S. M. Sicacha, V. P. Minkovich; A. B. Sotsky, A. V. Shilov; L. I. Sotskaya // EOS Annual Meeting (EOSAM 2020), Online meeting, 7–11 Sept. 2020 / EPJ Web of Conferences, ed.: H. Michinel [et al.]. – Vol. 238, id. 08005.–P. 08005-1–08005-2.

Тезисы

23. Шилов, А. В. Свойства капиллярных волокон / А. В. Шилов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. научн.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 27–28 окт. 2016 г. /

Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2016. – С. 164.

24. Шилов, А. В. Структура терагерцового импульса на выходе металло-диэлектрического капилляра / А. В. Шилов, А. Б. Сотский, М. М. Назаров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 27–28 апр. 2017 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2017. – С. 376–377.

25. Шилов, А. В. Капиллярный волновод с полый сердцевиной как чувствительный элемент терагерцового сенсора водного раствора / А. В. Шилов, А. Б. Сотский, М. М. Назаров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2018. – С. 381–382.

26. A flexible terahertz waveguide for transmitting radiation of quantum-cascade laser / M. M. Nazarov, Z. Ch. Margushev, K. A. Bzheumikhov, A. V. Shilov, A. B. Sotsky, I. A. Ozheredov, A. P. Shkurinov // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE Conferences : proceedings - international conference laser optics 2018, St. Petersburg, 04–08 June 2018 / Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2018. – P. 180.

27. Polymer waveguides for THz QCL radiation delivery and filtering // M. Nazarov, A. Shilov, Z. Margushev, K. Bzheumikhov, I. Ozheredov, A. Angeluts, A. Sotsky and A. Shkurinov // Terahertz And Microwave Radiation: Generation, Detection And Applications, (TERA 2018) : 3rd international conference, Nizhny Novgorod, 22–25 окт. 2018 / EPJ Web of Conferences, EDP Sciences. – 2018. – Vol. 195. – P. 04005–04006.

28. Шилов, А. В. Тейпер с палладиевым покрытием в фотонно-кристаллическом волокне как сенсор водорода / А. В. Шилов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 25–26 окт. 2018 г. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2018. – С. 169.

29. Шилов, А. В. Поля локальных мод в воздушных каналах гофрированного сечения / А. В. Шилов // Молодая наука – 2019 : материалы Регионал. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. вузов Могилевской области, Могилёв, 25 апр. 2019 г. / МГУ им. А. А. Кулешова ; под ред. О. А. Лавшук. – Могилев, 2019. – С. 114–115.

30. Electrodynamics model of a hydrogen sensor based on a special photonic crystal fiber taper coated with a nano-scale palladium film / V. P. Minkovich, A. B. Sotsky, A. V. Shilov, L. I. Sotskaya // AOP-2019: papers from 4th International Conference on Applications of Optics and Photonics, Lisbon, Portugal, 31 May –

4 June, 2019 / SPOF, ed.: Manuel F. M. Costa [et al.]. – Braga, Portugal 2019. – P. 98.

31. Шилов, А. В. Проектирование фотонно-кристаллических волокон с выраженной структурной окраской / А. В. Шилов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Межд. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2019 г. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2019. – С. 168.

32. Шилов, А. В. Измерение дифракционных полей в оптических волноводах / А. В. Шилов, А. Б. Сотский // Е.Р.А. – Современная наука: электроника, робототехника, автоматизация : материалы II Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 30–31 окт. 2025 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – С. 255–257.

Рэзюмэ

Шылаў Артур Уладзіміравіч

Разлік аптычных палёў у мікраструктурных валокнах

Ключавыя словы: мікраструктурнае валакно (МВ), метады функцый Грына, хваляводная ТГц спектраскапія газавых і вадкасных асяроддзяў, МВ сэнсары.

Мэта дысертацыйнай работы заключаецца ў распрацоўцы эфектыўных метадаў разліку аптычных палёў у МВ з улікам адкрытага характару структур і вырашэнні на гэтай аснове праблем аптымізацыі канфігурацый МВ для транспарцыроўкі тэрагерцовага выпраменьвання і сэнсарных прыкладанняў.

Выкарыстоўваныя метады: аналітычныя, лікавыя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана тэхніка падсумоўвання модавых імпульсаў у полых металічных і металлодieleктрыческих валокнах, адаптаваная для апісання распаўсюджвання шырокапалосных ТГц-сігналаў, якая забяспечвае аналіз магчымасці стварэння частотна-селектыўных фільтраў і газавых сэнсараў. Развіты метады функцый Грына для строгага разліку модавых характарыстык капілярных МВ са слаістай пакрыццём; выяўлены магчымасці аптымізацыі канфігурацыі палімерных валокнаў з полым асяродкам у мэтах мінімізацыі ўзроўню згасання ТГц-сігналаў, павышэння эфектыўнасці сэнсараў раствораў і фільтрацыі выпраменьвання квантава-каскаднага лазера. Даследаваны эфект рэзанансу загасальных мод у кварцавых фатонна-крышталічных МВ з тонкаплёнкавымі пакрыццямі, ацэнена магчымасць яго выкарыстання для сэнсарных прыкладанняў. Прапанавана новая канфігурацыя дыэлектрычнага валакна з падоўжна-гафрыраванай полай асяродкам, якая мае меншыя страты ў параўнанні са стандартным валакном тых жа памераў і якая валодае аномальнай дысперсіяй дыфракцыйнай прыроды. Выраблены аналіз пераўтварэння мод на нерэгулярных участках МВ, які мае тэйпер з паладыевым пакрыццём, пры калапсе паветраных каналаў; інтэрпрэтаваны эксперыментальныя дадзеныя аб спектральным адкліку сэнсара вадароду з паладыевым пакрыццём і вызначаны шляхі павышэння яго адчувальнасці. З прыцягненнем зоннай тэорыі двухмерных фатонных крышталяў распрацаваны алгарытмы апісання і максімізацыі структурнай афарбоўкі сінтэтычных фатонна-крышталічных МВ пры папярочным апрамяненні натуральным святлом.

Ступень выкарыстання. Алгарытмы разліку дыфракцыйных палёў у МВ укаранены ў навучальны працэс МДУ імя А. А. Куляшова. Метады разліку рэгулярных МВ з паглынальнымі пакрыццямі і з тэйперамі, сфармуляваныя ў ходзе сумесных даследаванняў, выкарыстоўваюцца ў Centro de Invesigaciones en Optica (Leon, Mexico), НДЦ "Курчатаўскі Інстытут" (Масква) і ФНЦ КБНЦ РАН (Нальчык).

Резюме

Шилов Артур Владимирович

Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах

Ключевые слова: микроструктурное волокно (МВ), метод функций Грина, волноводная ТГц спектроскопия газовых и жидкостных сред, МВ сенсоры.

Цель диссертационной работы состоит в разработке эффективных методов расчёта оптических полей в МВ с учетом открытого характера структур и решении на этой основе проблем оптимизации конфигураций МВ для транспортировки терагерцового излучения и сенсорных приложений.

Используемые методы: аналитические, численные.

Полученные результаты и их новизна. Разработана техника суммирования модовых импульсов в полых металлических и металлодиэлектрических волокнах, адаптированная для описания распространения широкополосных ТГц-сигналов и обеспечивающая анализ возможности создания частотно-селективных фильтров и газовых сенсоров. Развита метод функций Грина для строгого расчёта модовых характеристик капиллярных МВ со слоистым покрытием; показаны возможности оптимизации конфигурации полимерных волокон с полый сердцевиной в целях минимизации уровня затухания ТГц-сигналов, повышения эффективности сенсоров растворов и фильтрации излучения квантово-каскадного лазера. Исследован эффект резонанса затухающих мод в кварцевых фотонно-кристаллических МВ с тонкопленочными покрытиями, оценена возможность его использования для сенсорных приложений. Предложена новая конфигурация диэлектрического волокна с продольно-гофрированной полый сердцевиной, имеющая меньшие потери по сравнению со стандартным волокном тех же размеров и обладающая аномальной дисперсией дифракционной природы. Произведен анализ преобразования мод на нерегулярных участках МВ, имеющего тейпер с палладиевым покрытием, при коллапсе воздушных каналов; интерпретированы экспериментальные данные о спектральном отклике сенсора водорода с палладиевым покрытием и определены пути повышения его чувствительности. С привлечением зонной теории двумерных фотонных кристаллов разработаны алгоритмы описания и максимизации структурной окраски синтетических фотонно-кристаллических МВ при поперечном облучении естественным светом.

Степень использования. Алгоритмы расчёта дифракционных полей в МВ внедрены в учебный процесс МГУ имени А.А. Кулешова. Методы расчёта регулярных МВ, МВ с поглощающими покрытиями и с тейперами, сформулированные в ходе совместных исследований, используются в Centro de Investigaciones en Optica (Leon, Mexico), НИЦ «Курчатовский Институт» (Москва) и ФНЦ КБНЦ РАН (Нальчик).

Summary

Artur V. Shilov

Calculation of optical fields in microstructured fibers

Keywords: microstructured fiber (MF), Green's function method, waveguide THz spectroscopy of gas and liquid media, MF sensors.

The aim of this dissertation is to develop efficient methods for calculating optical fields in microwaves, taking into account the open nature of the structures, and to solve on this basis the problems of optimizing microwave configurations for transporting terahertz radiation and sensor applications.

Methods used: analytical, numerical.

Results and their novelty. A technique for summing mode pulses in hollow circularly symmetric metallic and metal-dielectric fibers has been developed. This technique is adapted to describe the propagation of broadband THz signals and enables an analysis of the feasibility of creating frequency-selective filters and gas sensors. A Green's function method has been developed for rigorously calculating the mode characteristics of capillary MFs with a layered coating. The possibilities of optimizing the configuration of polymer fibers with a hollow core are demonstrated in order to minimize the attenuation of THz signals, increase the efficiency of solution sensors, and filter the radiation of a quantum cascade laser. The effect of evanescent mode resonance in quartz photonic crystal microfibers with thin-film coatings is studied, and the possibility of using the transmission spectra for various sensor applications is assessed. A new configuration of dielectric fiber with a longitudinally corrugated hollow core is proposed, which has lower losses compared to a standard fiber of the same dimensions and exhibits anomalous dispersion of diffraction origin. An analysis of mode conversion in irregular sections of a microfiber with a taper with a palladium coating during the collapse of air channels is performed; experimental data on the spectral response of a hydrogen sensor with a palladium coating are interpreted, and ways to increase its sensitivity are identified. Using the band theory of two-dimensional photonic crystals, algorithms for describing and maximizing the structural coloration of synthetic photonic crystal microwaves under transverse irradiation with natural light have been developed.

Degree of use. Algorithms for calculating diffraction fields in microwaves have been implemented in the educational process at A.A. Kuleshov Moscow State University. Methods for calculating regular microwaves, microwaves with absorbing coatings, and microwaves with tapers, developed during joint research, are used at the Centro de Investigaciones en Optica (Leon, Mexico), the National Research Center "Kurchatov Institute" (Moscow), and the Federal Scientific Center "Kazakhstan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (Nalchik).

Научное издание

ШИЛОВ Артур Владимирович

**РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В МИКРОСТРУКТУРНЫХ ВОЛОКНАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.05 – Оптика

Подписано в печать 18.03.2026. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,78. Тираж 60 экз. Заказ 137.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:
издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.