

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента о диссертационной работе  
**ШИЛОВА Артура Владимировича**  
«Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.05 – оптика

### ***Соответствие диссертации специальности и отрасли науки, по которой она представлена к защите***

Диссертационная работа А.В. Шилова представляет разработку новых методов оценки характеристик оптических полей в микроструктурных волокнах (МВ) с учетом открытого характера структур. Предложенная методика позволяет осуществить относительно простое решение проблем оптимизации конфигураций МВ для транспорта терагерцового излучения в оптических устройствах с сенсорными приложениями. Результаты применения принципиально и в достаточной мере согласуются с экспериментом и расчетными приложениями. Тематика исследования соответствует направлениям: «Фотоника. Методы управления оптическим излучением, в том числе лазерным. Оптические волноводы. Волоконная оптика. Адаптивная оптика», входящим в перечень специальности 01.04.05 – оптика (физико-математические науки).

### ***Актуальность темы диссертации***

Исследования МВ, методов расчета их дисперсионных и полевых характеристик широко представлены в современной научной литературе. Они востребованы с позиций развития волоконно-оптических сенсорных систем и разработки аппаратуры для быстродействующих телекоммуникационных систем, при построении изображений макро- и микрообъектов в высоком разрешении, для создания новых методов диагностики вещества, включая химически и технологически сложные искусственные материалы и биологические ткани. Диссертационная работа выполнена в указанных актуальных направлениях. Она включает существенные результаты в области оптимального проектирования МВ с полыми сердцевинами для транспорта терагерцового (ТГц-) излучения, ТГц-спектроскопии газов и растворов во временной области, фотонно-кристаллических сенсоров с активными элементами в виде поглощающих покрытий на боковой поверхности фотонно-кристаллических волокон, фотонно-кристаллических структур с регулируемой структурной окраской. Актуальность темы диссертации подтверждается также тем, что работа выполнена в рамках финансируемых научных проектов, международного контракта, представляемые результаты были апробированы на ряде международных конференций и опубликованы в авторитетных научных изданиях.

### ***Степень новизны результатов и научных положений, выносимых на защиту***

В диссертационной работе представлены новые эффективные алгоритмы для расчетов МВ и металлodieлектрических направляющих структур, реализованные на основе метода интегральных уравнений, или функции Грина. Для данного подхода характерно представление электромагнитного поля с использованием множества локальных базисов цилиндрических функций, учет векторного характера открытых электродинамических задач на собственные значения, корректное описание дальних дифракционных полей. Эти особенности обеспечивают принципиаль-

ное отличие предлагаемого подхода от распространенных в зарубежных публикациях и интернете коммерческих пакетов, основанных на конечно-разностных и вариационных схемах, по своей природе приспособленных для расчета электромагнитных полей в замкнутых областях пространства. Такие схемы для имитации открытого пространства и оценки вытекающего излучения предполагают использование так называемых полностью согласованных слоев (ПСС) или введение поглощающих граничных условий, строго обоснованных лишь для плоской геометрии. Неизбежные изгибы ПСС при моделировании трехмерных волноводов вызывают неконтролируемые ошибки в количественной оценке затухания мод.

Новыми, имеющими существенное научное значение, являются следующие результаты автора:

- метод суммирования модовых импульсов в металлодиэлектрических МВ с поллой сердцевинной, описание на его основе полей широкополосных ТГц-импульсов в МВ, оценки возможностей максимизации чувствительности спектроскопических сенсоров газов, заполняющих полую сердцевину МВ,
- метод функции Грина, предназначенный для строгого расчета модовых характеристик капиллярных МВ с поллой сердцевинной и циркулярным диэлектрическим покрытием конечной толщины, выявленные на его основе оптимальные конфигурации поперечного сечения полимерных МВ, минимизирующие затухание передаваемого ТГц-сигнала, максимизирующие чувствительность волоконно-оптического сенсора состава растворов, осуществляющие пространственно-временную фильтрацию излучения квантово-каскадного лазера,
- оценки спектров пропускания волоконно-оптических рефрактометров и сенсоров давления в жидкости, принцип действия которых основан на эффекте резонансной связи основных вытекающих мод кварцевых МВ с модами их циркулярного поглощающего покрытия;
- конфигурация диэлектрического волокна с продольно-гофрированной поллой сердцевинной, отличающаяся от стандартного гладкостенного волокна тех же поперечных размеров более низким уровнем потерь оптического сигнала и характеризующаяся в полосе пропускания аномальной дисперсией;
- метод анализа преобразования мод на нерегулярных участках тейпера в МВ в условиях коллапса внутренних воздушных каналов, интерпретация экспериментальных данных о спектральном отклике оптического сенсора концентрации водорода в атмосфере, чувствительным элементом которого является тонкопленочное палладиевое покрытие тейпера, оценки возможностей максимизации чувствительности сенсора;
- теоретическая модель дифракционного рассеяния светового поля на внешней границе фотонно-кристаллических волокон с гексагональной симметрией при учете сложной кластерной структуры оболочки, содержащей воздушные каналы с циркулярным и гофрированным сечением границ; с применением зонной теории двумерных фотонных кристаллов дана формулировка критериев получения контрастной структурной окраски фотонно-кристаллических волокон, что представляет несомненную ценность для реальной практики производства тканей или материала защитных маскирующих покрытий.

Анализ представленной диссертационной работы определяет явную новизну её результатов, Положения исследования, выносимые соискателем на защиту,

формулируют сущность и оригинальность применяемых им подходов к расчету устройств волноводной оптики. На этих подходах основаны методы векторного суммирования полей и функций Грина, и в защищаемых положениях в логической увязке отражена эффективность применения этих методов.

### ***Обоснованность и достоверность заключительных выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Соискателем использован широкий арсенал расчётной методики высокого уровня в рамках прочно обоснованных теоретических общих подходов. Методика расчёта включает компьютерное моделирование или аналитический расчёт с формулировкой количественных соотношений. Основательной опорой исследования выступают приводимые экспериментальные данные, как цитированные из литературы, так и полученные при участии соискателя. Их присутствие и согласованность с расчётами – серьёзный довод в пользу достоверности и обоснованности полученных заключений и рекомендаций. Научные положения, обоснования и рекомендации, представленные в диссертации, сформулированы корректно, содержат необходимые ссылки на литературные данные. Результаты исследования и сделанные на их основе выводы физически непротиворечивы.

### ***Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации и рекомендации по их использованию***

Научная значимость результатов и основных положений диссертации состоит в разработке эффективных методов расчета оптических полей в МВ при учете открытого характера образующих структур. Модификация и соответствующее применение предложенных методов расчетной оценки обосновывает пути решения проблем снижения затухания передаваемого ТГц-сигнала за счет вариации профиля МВ, возникающих при транспорте терагерцового излучения или в сенсорных приложениях.

Методика исследования и её итоги характеризуются несомненной практической значимостью. Именно результаты расчётов по обоснованию направлений оптимизации полимерных МВ, реальных сенсорных устройств и направляющих структур для световых полей ТГц-диапазона используются при проектировании и изготовлении приборов на их основе в ряде научно-технологических центров, в том числе, за пределами Республики Беларусь. Результаты разработки алгоритмов и программного обеспечения для моделирования пространственно-временного распределения ТГц-импульсов и их спектров после прохождения через волноводные структуры, а также созданный макет экспериментальной установки для измерения и демонстрации распределения дифракционных полей методом бесконтактной волноводной рефлектометрии внедрены в учебный процесс МГУ имени А.А. Кулешова.

С экономической точки зрения использование полученных в диссертации результатов позволит повысить эффективность разработки современных сенсорных устройств ТГц-диапазона частот с возможностью обоснованно и целенаправленно решить проблемы их оптимизации, избежать продолжительных и дорогостоящих этапов предварительного экспериментального макетирования при разработке реальных технических объектов.

Результаты диссертационного исследования применимы:

- при оптимизации схем транспортировки и преобразования ТГц-излучения в устройствах бесконтактной, дистанционной и неинвазивной диагностики различных технических объектов, материалов и культурных артефактов;
- в технологиях изготовления фотонно-кристаллических волокон с плотной упаковкой образующих каналов и микроструктурных волокон с покрытиями, выполняющими сенсорные функции;
- особый интерес для отечественных производителей синтетических волокон должны вызвать разработанные методы оценки структурной окраски микроструктурного волокна и максимизации ее контраста

Результаты диссертационного исследования можно использовать при сотрудничестве с научно-технологическими центрами и научными группами, которые занимаются технологическим выращиванием и экспериментальным исследованием пассивных модулирующих или сенсорных систем, созданных на основе световодных и планарных структур пониженной размерности для нужд волоконной и интегральной оптики и ТГц-спектроскопии, в Республике Беларусь — центры «Лазерная техника и технологии», «Нанофотоника», «Нелинейная оптика и активированные материалы» в ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной АН Беларуси»; научно-производственное унитарное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий» НАН Беларуси, НИЦ оптических материалов и технологий при БНТУ, ОАО «Пеленг» или НПО «Планар»; Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, а также в Российской Федерации — Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург), Национальный исследовательский центр "Курчатовский Институт" (Москва), Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (Черноголовка). Полученные в диссертации результаты также перспективны для совершенствования учебного процесса по преподаванию курсов современной оптики в учреждениях образования Республики Беларусь, реализующих образовательные программы получения высшего и послевузовского образования.

***Полнота изложения основных положений и результатов диссертации в опубликованных работах***

Выносимые на защиту положения в достаточной мере отражены в 32 публикациях, включая 9 статей (общим объемом 6,2 авторского листа) в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, в том числе 4 статьи в журналах, издаваемых за рубежом, а также 1 статью в рецензируемом научном издании, 12 статей и 10 тезисов в сборниках материалов научных конференций. Результаты работы докладывались и обсуждались на 20 международных и региональных научных и научно-технических конференциях.

Опубликованность результатов диссертационной работы полностью удовлетворяет требованиям ВАК.

***Оценка оформления работы***

Диссертационная работа и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК по оформлению диссертации и автореферата.

Содержание рукописи автореферата в полной мере соответствует содержанию диссертации и основным положениям, выносимым на защиту. Верно изложены заключение и обобщение результатов по главам.

***Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует***

Анализ содержания диссертации показал способность автора ставить цели и задачи исследования, определить необходимые средства их решения. Автор проявил умение разбираться в сущности физических процессов, грамотно их объяснить и применять для решения поставленных научных задач. Должная универсальность и уровень исследованных проблем, высокий уровень полученных результатов подтверждают, что научная квалификация автора соответствует учёной степени кандидата физико-математических наук.

***Замечания по работе***

1. На стр. 16 из-за лишних знаков препинания затруднено понимание высказывания «Первая идея об усложнении внутренней структуры оптического волокна путём использования нескольких волноводных сердцевин, возникла более 30 лет назад вскоре после появления одномодовых световодов [8]».

2. На стр. 16 содержится утверждение «... Если оболочка дырчатого волокна содержит три и более гексагональных кольца воздушных каналов, то такие волокна уже называются фотонно-кристаллическими».

Известно, однако, фотонно-кристаллическими волокнами считаются волокна, оболочка которых представляет собой двумерный фотонный кристалл, а их световедущие свойства определяются фотонными запрещенными зонами. Подобные свойства характеризуют, например, и волокна со структурой профиля в виде пчелиных сот, а не только оболочки с гексагональным распределением отверстий.

3. На стр. 21 допущена орфографическая ошибка: пропущена буква «н» в слове «металлизированным» (7-я строка снизу).

4. На стр. 37 в высказывании «В виду нарастающей популярности ТГц-излучения проведён анализ источников и известных типов МВ, наиболее пригодных для передачи такого излучения, а также обоснован выбор материалов для их создания ...» отмечена стилистическая погрешность – очевидно, следует говорить о применимости ТГц-излучения, речь также не может идти о «проведенном анализе источников ... МВ ...», а об анализе литературных источников по тематике МВ, и предлог «в» со значением причины «ввиду...» пишется слитно.

5. Стр. 96, видимо, содержит неточность в приведенных геометрических размерах при ссылке на иллюстрации: «... Рисунки 3.15, 3.16 иллюстрируют зависимости  $P(d)$  и  $\text{Im } \beta(d)$  для волокна с  $R = 3000 \text{ мкм}$  ( $r = 830 \text{ мкм}$ )...». Радиус капилляра 830 мкм, а толщина стенок (из рис. 3.15, 3.16) до 800 мкм. Толщина стенок практически равна радиусу капилляра, радиус отсчитывается по внешней окружности (на стр. 88 — «... при том же внешнем радиусе капилляра  $r = 0,4 \text{ мм}$ »). Несложно оценить, что радиус отверстия капилляра всего 30 мкм, и распространение излучения с длиной волны 300 мкм оказывается не критичным к структуре капилляра. Капилляр тогда следует рассматривать как сплошной диэлектрический стержень типа цилиндра с некоторой средней диэлектрической проницаемостью.

6. На стр. 151 в предложении «... данный факт можно объяснить требованием большего числа гармоник в рядах Фурье для описания гофрированной границы воздушных каналов 90» вероятно пропущено слово «учёта».

7. На стр. 152 в высказывании «... поэтому имеет смысл исследовать погонное дифференциальное поперечное сечением рассеяния вида» лишняя буква «м» в слове «сечением».

8. Стр. 156 содержит неточное утверждение «... зеленый с длиной волны  $\lambda = 0,564$  мкм (данное значение соответствует максимуму чувствительности человеческого глаза в зеленом участке спектра [131])».

Можно сослаться, однако, на ГОСТ 8.332-78 (Государственная система обеспечения единства измерений. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения) — максимуму чувствительности человеческого глаза (функция видности равна 1) соответствует длина волны 0,555 мкм.

9. В тексте основной части автореферата диссертации на стр. 10, рис. 1 отсутствует указание величин, характеризующих изгиб и длину исследуемого образца; текст диссертации содержит требуемое для понимания пояснение.

10. Также представляются недостаточными оценки границы применимости предложенного метода расчетного анализа с применением функции Грина в теории МВ. Судя по исследованным в работе структурам, этот метод, возможно, результативно применим лишь для волокон с близкой к круговой формой профиля образующих каналов.

Приведенные выше замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы в целом.

### *Заключение*

Считаю, что диссертационная работа Шилова А.В. «Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах» представляет собой завершённую аттестационную научно-исследовательскую работу, соответствует специальности 01.04.05 – оптика и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Работа содержит новые научные теоретические и экспериментальные результаты по актуальному направлению научных исследований: развитию методики расчетного анализа оптических полей в микроструктурированных волокнах с учетом открытого характера структур и решению на этой основе проблем совершенствования конфигураций МВ для транспорта ТГц-излучения и сенсорных приложений.

Ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика может быть присуждена Шилову Артуру Владимировичу за:

- разработку метода векторного суммирования оптических полей мод полых металлодиэлектрических волокон и установление на его основе пространственно-временной формы оптических импульсов в таких волокнах и возможности подавления высших мод волокна, затрудняющих терагерцовую спектроскопию сред, в диэлектрическом слое оптимальной толщины, локализованном на поверхности металла;
- модификацию метода функции Грина и на основе её применения анализ оптимальных конфигураций микроструктурных волокон с мультикапиллярной оболочкой и полый сердцевинной, при которых обеспечивается минимальное затухание передаваемых терагерцовых импульсов, максимизация чувствительности волноводных сенсоров растворов и возможность управляемой вариации параметров излучения квантово-каскадных лазеров;
- анализ электродинамической модели датчика концентрации водорода в виде тейпера с палладиевым покрытием в фотонно-кристаллическом волокне в условиях коллапса образующих воздушных каналов и наличия на поверхности

тейпера металлического покрытия конечной толщины, позволяющей рассчитывать спектры пропускания тейпера в зависимости от концентрации водорода в атмосфере азота с установлением возможности повышения чувствительности сенсора;

- разработку алгоритмов расчёта дифракционных полей при поперечном освещении фотонно - кристаллических волокон с каналами сложного сечения и установленную на их основе корреляцию между зонной структурой двумерного фотонного кристалла в поперечном сечении микроструктурного волокна и контрастом структурной окраски волокна при его поперечном освещении естественным светом.

### Официальный оппонент

профессор кафедры техносферной безопасности  
и общей физики Белорусского государственного  
университета пищевых и химических технологий

доктор физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 – лазерная физика  
профессор



В.А. Юревич

