

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
Белорусского государственного  
университета



А.В.Блохин

13 апреля 2026 г.

## ОТЗЫВ

### оппонирующей организации

Белорусский государственный университет  
на диссертационную работу Шилова Артура Владимировича  
«Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Принято на заседании совместного научного семинара факультета радиофизики и компьютерных технологий и кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета Белорусского государственного университета (далее – БГУ) (протокол от 13.04.2026 № 1).

### **1. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и отрасли науки со ссылкой на область исследования паспорта соответствующей специальности, утвержденного ВАК**

Диссертационная работа Шилова Артура Владимировича посвящена теоретическому исследованию процессов распространения электромагнитного излучения терагерцового диапазонов спектра в микроструктурных волокнах и использованию оптических явлений для создания методов измерений. Исследования относятся к отрасли «физико-математические науки». Задачи, содержание и полученные результаты соответствуют пунктам: 1. геометрическая оптика, волновая оптика, интерференция и дифракция, 2. оптические волноводы, волоконная оптика, фотоника раздела III паспорта специальности 01.04.05 – Оптика.

### **2. Научный вклад соискателя в решение научной задачи с оценкой его значимости**

В диссертации развит метод функции Грина применительно к исследованию модовых характеристик новых типов микроструктурных волокон. Этот подход позволяет получить численное решение волноводной задачи на собственные значения в неупрощенной векторной постановке. Его эффективность обеспечивается использованием множества локальных систем координат для представления электромагнитного поля в микроструктурном

волокне и автоматическим выполнением условий для полей мод на бесконечности.

Автором разработан метод суммирования модовых импульсов, который позволил описать распространение широкополосных терагерцовых импульсов в полых металлодиэлектрических волокнах и впервые оценить возможности использования таких волокон в волноводной терагерцовой спектроскопии газов во временной области.

Выполнен расчёт мультикапиллярных полимерных волокон с полыми сердцевинами нециркулярных конфигураций, предназначенных для транспортировки с низким затуханием широкополосных терагерцовых импульсов, пространственно-временной фильтрации излучения квантово-каскадного лазера и использования в качестве чувствительных элементов терагерцовых сенсоров растворов. Эффективность найденных конфигураций микроструктурных волокон подтверждена экспериментами, выполненными в Российской Федерации в ФНЦ КБНЦ РАН и НИЦ «Курчатовский институт».

Разработана теория резонансной связи вытекающих мод фотонно-кристаллических волокон с модами поглощающих тонкопленочных покрытий, нанесенных на боковую поверхность волокна. В результате предложены новые фотонно-кристаллические сенсоры давления и рефрактометры для жидких сред. Разработана теория связанных мод для расчета пропускания тейперов в фотонно-кристаллических волокнах. На ее основе выполнен расчет фотонно-кристаллического сенсора концентрации водорода в атмосфере со структурой тейпера с тонкопленочным палладиевым покрытием. Получена интерпретация экспериментальных данных для спектров пропускания такого сенсора, изготовленного и протестированного в Centro de Investigaciones en Optica (Leon, Mexico), определены возможности максимизации чувствительности данного устройства.

Научно значимыми являются также результаты автора, относящиеся к поперечной дифракции естественного света на микроструктурных волокнах. Они включают разработку зонной теории структурной окраски названных волокон и оценки их внутренних конфигураций, обеспечивающих насыщенный цвет волокна.

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 в микроструктурных волокнах методом бесконтактной волноводной рефлектометрии внедрены в образовательный процесс учреждения образования «Могилёвский государственный университет имени А.А. Кулешова».

В целом выполненное исследование вносит существенный вклад в развитие методов электродинамического моделирования микроструктурных

волокон и расширяет возможности их применения в терагерцовой фотонике, сенсорике и фотонных технологиях.

### **3. Конкретные научные результаты (с указанием их новизны и практической значимости), за которые соискателю может быть присуждена искомая учёная степень**

Наиболее значимые научные результаты диссертации, за которые соискателю может быть присуждена искомая степень:

1. Разработан метод векторного суммирования модовых импульсов в полых металлодиэлектрических волокнах, позволивший описать распространение широкополосных терагерцовых импульсов в данных волокнах и оценить возможности их использования для волноводной ТГц-спектроскопии газовых сред.

2. Развита метод функции Грина для строгого расчета модовых характеристик капиллярных микроструктурных волокон с покрытиями конечной толщины и сложной конфигурацией полой сердцевины, позволивший определить конфигурации волокон, оптимизированные по потерям, фильтрационным свойствам и сенсорной чувствительности.

3. Впервые получены оценки спектров пропускания фотонно-кристаллических сенсоров давления и рефрактометров для жидких сред, работа которых основана на резонансной связи вытекающих мод кварцевых микроструктурных волокон с модами поглощающего тонкоплёночного покрытия.

4. Предложена новая конфигурация диэлектрического волокна с продольно-гофрированной полой сердцевиной, обладающая меньшими потерями по сравнению со стандартным гладкостенным волокном тех же размеров и характеризующаяся аномальной дисперсией дифракционной природы.

5. Выполнен анализ преобразования мод на нерегулярных участках тейпера микроструктурного волокна при коллапсе воздушных каналов; дана интерпретация экспериментальных данных о спектральном отклике сенсора водорода с палладиевым покрытием и определены условия максимизации его чувствительности.

6. Разработаны методы расчёта дифракционных полей при поперечном освещении микроструктурных волокон, установлены условия формирования выраженной структурной окраски данных волокон и выявлена связь между зонной структурой двумерного фотонного кристалла и характеристиками рассеяния света.

Практическая значимость работы подтверждается использованием разработанных методов и программ в образовательном процессе, а также применением результатов при проектировании волоконных структур в ведущих научных центрах.

### **4. Замечания по диссертационной работе**

1. В работе разработан оригинальный математический аппарат и проведены численные расчеты мод для волноводов различного профиля.

Полученным зависимостям и их особенностям дается обоснованное физическое объяснение. Однако в тексте диссертации отсутствует информация о проведенных тестовых вычислениях, подтверждающих корректность работы программного кода. Например, сравнение с аналитическими решениями, результатами других авторов.

2. В работе проведена оптимизация чувствительности предложенных методов определения концентраций (водяного пара, водорода), давления и показателя преломления, но не проанализированы точность и погрешности, влияние на них технологического разброса размеров элементов волновода. Отсутствует сравнение характеристик предложенных методов определения концентраций с описанными в обзорной части.

3. При оформлении диссертационной работы автором допущены некоторые опечатки и стилистические неточности. Например: на стр. 45 «В этом случае численное интегрирование в (2.18) затруднено». В формуле (2.18) нет интеграла. Должна была быть ссылка на формулу 2.19;

в формуле Друде для диэлектрической проницаемости серебра на стр. 46 использованы нормированные величины для частоты и затухания. Неудачная нормировка частоты  $100 f/3$  затрудняет проверку правильности коэффициентов;

на стр. 129 на фрагменте (б) рисунка 4.3 правая ось должна быть  $\text{Im}(\Delta\beta\nu)$ .

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

### **5. Соответствие научной квалификации соискателя учёной степени, на которую он претендует**

Результаты диссертационного исследования представлялись на ряде конференций, среди которых 17 международных (Оптика неоднородных структур – 2015, 2019; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Conference on Lasers, Applications, and Technologies; Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности; Проблемы взаимодействия излучения с веществом; Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии; Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов; 4th International Conference on Information Technologies and Nanotechnologies – 2018; 18th International Conference on Laser Optics «ICLO 2018»; Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA – 2018); 4th International Conference on Applications of Optics and Photonics «AOP-2019»; The European Optical Society Annual meeting 2020 (EOSAM-2020, online 2020); ERA – современная наука: электроника, робототехника, автоматизация; одна республиканская конференция (VI Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники»); 2 региональные конференции («Итоги научных исследований ученых МГУ имени А.А. Кулешова»); научно-практическая конференция

студентов и аспирантов вузов Могилевской области «Молодая наука – 2019»).

Результаты диссертационного исследования опубликованы в ведущих международных научных журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, таких как: Applied Physics Letter, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Journal of the European Optical Society, Journal of Nanotechnology Research, Журнал прикладной спектроскопии, Проблемы физики, математики и техники, Журнал технической физики, Компьютерная оптика. Тематика публикаций, уровень постановки задач, строгость используемого математического аппарата и практическая направленность результатов свидетельствуют о высокой научной квалификации соискателя.

Основные результаты диссертации опубликованы в 31 научной работе, в том числе, в 9 статьях в рецензируемых научных изданиях, которые соответствуют п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (общим объемом 6,2 авторского листа), 1 статье – в другом рецензируемом зарубежном издании (объемом 0,35 авторских листа); 18 статьях в сборниках статей и материалов международных научных конференций; 3 статьях в сборниках материалов республиканской и региональной конференций. С учётом высокого научного уровня публикаций можно заключить, что **научная квалификация Шилова А.В. соответствует** искомой учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа является завершённым самостоятельным научным исследованием, в котором решена актуальная научная задача разработки эффективных методов расчёта оптических полей в микроструктурных волокнах и их применения к задачам терагерцовой спектроскопии, волноводной сенсорики и формирования структурной окраски синтетических волокон.

Считаем, что диссертационная работа **Шилова Артура Владимировича «Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах»** соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени **кандидата физико-математических наук** по специальности **01.04.05 – Оптика** за существенный вклад в решение фундаментальных научных проблем по разработке строгих методов расчета модовых характеристик микроструктурных волокон и дифракционных полей возникающих при их поперечном освещении. Они относятся к современным направлениям оптических исследований в области оптики и включают:

- разработку методики суммирования модовых импульсов в полых металлодиэлектрических волокнах с циркулярной симметрией, позволяющей описать пространственно-временную форму электромагнитных импульсов на выходе волокна, установить возможности фильтрации высших мод волокон и шумов, вызванных их интерференцией при терагерцовой спектроскопии воздуха;

– развитие метода функций Грина для расчёта характеристик вытекающих мод и спектров пропускания полимерных капиллярных микроструктурных волокон с полый сердцевиной, позволившее найти оптимальные конфигурации таких волокон с минимально возможным затуханием передаваемого терагерцового сигнала, а также обладающие частотной и пространственной фильтрацией излучения квантово-каскадных лазеров;

– разработку метода расчета пропускания тейпера в фотонно-кристаллическом волокне в условиях коллапса образующих воздушных каналов и наличия на поверхности тейпера тонкопленочного металлического покрытия, позволившего дать интерпретацию экспериментальных данных по влиянию примеси водорода в атмосфере на спектральный отклик фотонно-кристаллического сенсора водорода при наличии наноразмерного палладиевого покрытия на поверхности тейпера и определить возможности повышения чувствительности данного сенсора;

– разработку методов расчета зонной структуры двумерных фотонных кристаллов и дифракционных полей, возникающих при поперечном освещении фотонно-кристаллических волокон, установление на их основе оптимальной внутренней конфигурации фотонно-кристаллического волокна с гексагональной симметрией, позволяющей реализовать его выраженную структурную окраску.

Отзыв обсужден после заслушивания доклада соискателя на заседании совместного научного семинара факультета радиофизики и компьютерных технологий и кафедры физической оптики и прикладной информатики физического факультета БГУ (протокол от 13.04.2026 № 1).

#### ПРИСУТСТВОВАЛИ:

1. Афоненко А.А., доктор физ.-мат. наук, профессор;
  2. Новицкий А.В., доктор физ.-мат. наук, профессор;
  3. Кугейко М.М., доктор физ.-мат. наук, профессор;
  4. Поляков А.В., доктор физ.-мат. наук, доцент;
  5. Ушаков Д.В., доктор физ.-мат. наук, доцент;
  6. Фираго В.А., доктор физ.-мат. наук, доцент;
  7. Малый С.В., кандидат физ.-мат. наук, доцент;
  8. Микитчук Е.П., кандидат физ.-мат. наук, доцент;
  9. Раткевич С.В., старший преподаватель
- (всего: 6 докторов наук, 2 кандидата наук).

#### СЛУШАЛИ:

1. Доклад соискателя Шилова Артура Владимировича по диссертационной работе на тему «Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах» на соискание учёной степени кандидата

физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

2. Проект отзыва оппонировающей организации, представленный доктором физ.-мат. наук, профессором Афоненко А.А. – экспертом от оппонировающей организации, назначенным приказом ректора БГУ от 07.04.2026 № 192-ОД.

В обсуждении диссертации приняли участие: Афоненко А.А., Новицкий А.В., Кугейко М.М., Поляков А.В., Малый С.В., Микитчук Е.П.

В голосовании приняли участие 8 членов семинара, имеющих ученые степени. Результаты открытого голосования: «за» – 8, «против» – нет, «воздержались» – нет.

#### ПОСТАНОВИЛИ:

1. Рекомендовать к защите диссертацию Шилова Артура Владимировича «Расчёт оптических полей в микроструктурных волокнах» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика.

2. Одобрить заключение оппонировающей организации.

Председатель совместного научного семинара –  
доктор физ.-мат. наук, доцент,  
профессор кафедры физики  
и аэрокосмических технологий  
факультета радиофизики  
и компьютерных технологий БГУ



А.В.Поляков

Эксперт –  
доктор физ.-мат. наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
квантовой радиофизики и оптоэлектроники  
факультета радиофизики  
и компьютерных технологий БГУ



А.А.Афоненко

Секретарь совместного научного семинара –  
старший преподаватель кафедры физики  
и аэрокосмических технологий  
факультета радиофизики  
и компьютерных технологий БГУ



С.В.Раткевич