

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ им. М.В. Ломоносова

Чл. Корр. РАН, профессор, д.ф.-м.н.

Федянин А.А.



04» 02 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу **Лебедева Дениса Владимировича** на тему «Методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах: неупругое туннелирование электронов и твердотельные нанопоровые мембраны», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. – Приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа Лебедева Д.В. посвящена разработке методов управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах, основанных на исследовании процессов неупругого туннелирования электронов и использовании твердотельных нанопоровых мембран. В работе решаются задачи усиления генерации света из наноразмерных туннельных контактов, а также управления селективностью и проводимостью ионных потоков через искусственные нанопоры, что имеет важное значение для развития функциональных систем в областях нанофотоники, оптоэлектроники и биосенсорики.

Актуальность темы выполненной работы и ее связь с соответствующими отраслями науки и народного хозяйства.

Актуальность работы обусловлена стремительным развитием нанотехнологий и острой потребностью в создании миниатюрных, энергоэффективных и высокопроизводительных компонентов для нового поколения оптоэлектронных устройств. В области нанофотоники и оптоэлектроники существует фундаментальная проблема интеграции компактных источников света в планарные схемы, поскольку традиционные лазеры обладают размерами, существенно превышающими длину волны излучения, что ограничивает плотность компоновки и быстродействие. Использование

явления неупругого туннелирования электронов (НТЭ) для генерации фотонов открывает путь к созданию наноразмерных электрически управляемых источников света, которые могут быть монолитно интегрированы в чипы. Однако изначально крайне низкая квантовая эффективность этого процесса требует разработки специальных методов её повышения, например, с помощью плазмонных наномантенн, что и является одной из ключевых задач данной работы.

Разработанные методы управления оптическим излучением на основе НТЭ вносят вклад в фундаментальную физику наносистем и имеют прикладное значение для создания элементной базы сверхбыстрой оптоэлектроники, квантовых технологий и телекоммуникаций. Параллельно, исследования ионного транспорта через твердотельные нанопоры и методы его управления внешними полями лежат в основе современной биофизики, аналитической химии и биомедицинской инженерии. Практические результаты работы могут быть использованы для разработки нового поколения высокочувствительных биосенсоров, систем «лаборатория-на-чипе», устройств для очистки воды, разделения веществ и доставки лекарств, что соответствует приоритетным направлениям развития биотехнологий и высокотехнологичной медицины в Российской Федерации.

Новизна полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе.

Научной новизной обладают следующие результаты диссертации:

- Разработан новый метод детектирования оптического излучения, возникающего при неупругом туннелировании электронов. Метод основан на регистрации и последующем анализе вольт-амперных характеристик туннельного контакта.
- Методами туннельной спектроскопии и СТМ-люминесценции проведено картирование локальной плотности оптических состояний одиночной золотой наномантенны дисковой формы. Экспериментальные распределения продемонстрировали хорошее соответствие с результатами численного моделирования собственных оптических мод данной структуры.
- Создана и апробирована методика нанолитографии с помощью сканирующего туннельного микроскопа для формирования гибридных Si/Au наномантенн. Установлено, что данные структуры способны генерировать оптическое излучение в контакте со зондом СТМ в двух различных режимах: за счёт неупругого туннелирования электронов при напряжениях смещения ниже 3 В и посредством электролюминесценции наноструктурированного кремния при более высоких напряжениях.

наноструктур при проектировании наноразмерных источников излучения, использующих неупругое туннелирование электронов.

– Реализованный подход интеграции нановставок с вюрцитной кристаллической фазой в волновод на основе нитевидного нанокристалла GaP позволяет создавать компактные электрически управляемые источники света. Работа таких источников на принципе НТЭ обеспечивает эффективный ввод генерируемого излучения в волновод с минимальными оптическими потерями.

– Продемонстрированная возможность обратимого управления ионной селективностью нанопористых мембран путём изменения потенциала на их проводящей поверхности открывает путь к повышению эффективности и управляемости процессов микро- и нанофильтрации.

– Разработанная и апробированная методика модуляции ионной проводимости одиночной нанопоры с помощью низкоинтенсивного оптического облучения закладывает основу для создания высокочувствительных нанопористых биосенсоров следующего поколения.

Недостатки диссертационной работы.

По материалам диссертации можно выделить следующие замечания:

1. В разделе 3.3.1 рассматривается распределение локальной плотности оптических состояний дисковой наноантенны. При этом утверждается, что усиление оптического STM-Л сигнала на краях антенны связано именно с плотностью состояний. Возможно ли такое усиление сигнала за счет повышения туннельного тока при нестабильности работы системы обратной связи на развитом рельефе на границе диска?

2. В разделе 2.3 рассматривается методика изготовления пористых мембран из материала Алюминан™ или NaFen. Однако, не совсем ясно для чего необходимо проводить этап ультразвуковой гомогенизации материала при формировании мембран. Почему нельзя использовать данный материал в исходном виде?

3. В таблице 1 на странице 100 допущена неточность в порядке величин квантовой эффективности.

4. На рисунке 2.7 представлено изображение чипа с четырьмя свободноподвешенными SiN мембранами. Не совсем ясно, почему используется именно геометрия с четырьмя образцами? Чем обусловлен такой выбор?

Рекомендации по использованию выводов и результатов диссертационной работы.

Полученные в диссертационной работе результаты и разработанные методики носят междисциплинарный характер и могут быть использованы в различных областях науки и технологий. Рекомендуется их внедрение и дальнейшее развитие по следующим основным направлениям:

В области нанофотоники и оптоэлектроники:

Рекомендуется использовать методику СТМ-наноитографии для создания гибридных плазмонных наноантенн (Si/Au и аналогичных) при разработке элементной базы сверхкомпактных оптоэлектронных интегральных схем. Данные структуры перспективны в качестве миниатюрных, электрически управляемых источников и модуляторов света. Результаты исследования упорядоченных массивов наноструктур, полученных фемтосекундной лазерной печатью, и методика управления их эмиссией целесообразны для применения при создании перестраиваемых источников излучения и плазмонных метаповерхностей для управления светом на наноуровне. Подход к интеграции наноразмерного источника на основе НТЭ в полупроводниковый волновод (на примере НК GaP) рекомендуется к использованию в проектировании и изготовлении монокристаллических фотонных и оптоэлектронных чипов для квантовых технологий, телекоммуникаций и сенсорики.

В области аналитического приборостроения, биосенсорики и биомедицины:

Разработанная методика управления ионным транспортом в нанопорах с помощью внешнего электрического поля рекомендуется для реализации в устройствах для селективного разделения ионов, очистки воды, а также в модулях «лаборатория-на-чипе» для контролируемой доставки веществ. Метод оптической модуляции проводимости единичной нанопоры предлагается к использованию при создании нового класса высокочувствительных биосенсоров. Такие сенсоры могут быть применены для детектирования биомолекул (ДНК, белков), вирусных частиц и для медицинской диагностики с возможностью дистанционного оптического управления.

В области фундаментальных исследований и методического обеспечения:

Методика непрямого анализа НТЭ через ВАХ туннельного контакта рекомендуется к применению в исследовательских лабораториях как доступный и информативный инструмент для изучения процессов генерации света в наноструктурах без необходимости сложной оптической регистрации. Комплекс методов СТМ-Л и туннельной спектроскопии для картирования локальной плотности оптических состояний следует использовать при фундаментальных исследованиях плазмонных, диэлектрических и гибридных наноантенн для оптимизации их дизайна.

В образовательном процессе:

Основные теоретические и экспериментальные результаты работы рекомендуется включить в учебные курсы для магистрантов и аспирантов по направлениям «Нанофотоника», «Физика наносистем», «Бионанотехнологии» и «Сканирующая зондовая микроскопия».

Полученные в ходе выполнения диссертации результаты могут быть использованы в следующих организациях: СПБАУ РАН им. Ж.И. Алферова, АО «Светлана-Электронприбор», СПбГУ, Университет ИТМО, Научно-производственная компания СИНТОЛ, ИАП РАН, ИСАН, Казанский федеральный университет, ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Реализация данных рекомендаций будет способствовать технологическому развитию в областях, связанных с нанотехнологиями, и укреплению научно-технического потенциала.

Заключение.

Диссертационная работа Лебедева Д.В. «Методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах: неупругое туннелирование электронов и твердотельные нанопоровые мембраны» является комплексным сбалансированным исследованием, посвященным созданию методов и исследованию усиления генерации света из локальных туннельных контактов и управления транспортом ионов через твердотельные нанопоры для функциональных наносистем оптоэлектроники, нанофотоники и биосенсорики. Работа содержит как результаты теоретических исследований, так и экспериментальные результаты, обладающие существенной новизной и высоким потенциалом прикладного внедрения. Сделанные в работе выводы и заключения являются обоснованными и достоверными.

Основные научные результаты опубликованы в 30 статьях в высокорейтинговых рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях. Результаты исследований представлены на признанных всероссийских и международных конференциях и симпозиумах. Содержание автореферата соответствует содержанию работы.

Таким образом, диссертация Лебедева Д.В. является законченным исследованием, выполненным на высоком научно-техническом уровне, имеет высокую теоретическую и практическую значимость.

Приведенные замечания не являются принципиальными и не снижают ценности выполненной работы. Диссертация соответствует пунктам 1, 2 и 7 паспорта специальности ВАК физико-математических наук 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики» и отвечает требованиям, предъявляемым к диссертации в соответствии с пп. 9-14 Положения «О порядке присуждения научных степеней».

утвержденного постановлением правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г.

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертационная работа Лебедева Д.В. и настоящий отзыв рассмотрены и утверждены на заседании кафедры физики полимеров и кристаллов физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова 21 января 2026 г., протокол № 1/2026

Заведующий кафедрой физики полимеров и кристаллов

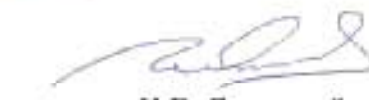
Профессор, д.ф.-м.н.



А.Р. Хохлов

Профессор кафедры физики полимеров и кристаллов,

д.ф.-м.н.



И.В. Яминский

Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы д.1, стр.2

Тел: +7 (495)939-16-82

e-mail: info.ff@org.msu.ru

Кафедра физики полимеров и кристаллов

Тел: +7 (495)939-10-13

e-mail: secretary@polly.phys.msu.ru