

## ОТЗЫВ

Официального оппонента 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.

Диссертация Лебедева Д.В. посвящена разработке и экспериментальному исследованию методов управления транспортом электрического заряда в наноразмерных системах, включая процессы генерации оптического излучения при неупругом туннелировании электронов в локальных туннельных контактах и управление ионным транспортом в твердотельных нанопорах. В рамках работы реализованы и исследованы наноразмерные электроуправляемые источники оптического излучения на основе плазмонных и гибридных наноструктур, а также разработаны методы формирования и функционализации твердотельных нанопор, позволяющие управлять их транспортными и селективными свойствами под действием внешних электрических и оптических воздействий. Полученные результаты направлены на создание и развитие функциональных наносистем для приложений в оптоэлектронике, нанофотонике и биосенсорике.

### **Актуальность темы работы:**

Современное развитие нанофотоники, оптоэлектроники и микро-/нанoeлектронных технологий характеризуется стремлением к дальнейшей миниатюризации функциональных элементов, снижению энергопотребления и повышению быстродействия интегральных схем. Одной из ключевых нерешённых проблем в данной области остаётся создание компактных, энергоэффективных и технологически совместимых с существующей электронной платформой источников оптического излучения. Традиционные решения, основанные на полупроводниковых микролазерах и электрооптических модуляторах, сталкиваются с фундаментальными ограничениями по размеру активных элементов, сложности интеграции и инерционности процессов модуляции. В этом контексте особый интерес представляет использование эффекта излучения света при неупругом туннелировании электронов, который позволяет реализовать наноразмерные электроуправляемые источники излучения без резонаторов, обладающие потенциально высокой скоростью работы и низким энергопотреблением. Однако практическое применение таких источников сдерживается недостаточной квантовой эффективностью и ограниченным пониманием механизмов генерации и управления оптическим излучением в локальных туннельных контактах, что обуславливает актуальность их систематического экспериментального и методического исследования.

Наряду с этим, интенсивное развитие биосенсорики, нанофлюидики и биоинженерных технологий обуславливает возрастающий интерес к изучению и управлению ионным транспортом в твердотельных нанопорах. Управляемые нанопоровые системы рассматриваются как перспективная основа для создания высокочувствительных биосенсоров, мембран с регулируемой селективностью и элементов устройств класса lab-on-a-chip. Несмотря на значительный прогресс в области нанофабрикации, остаются недостаточно изученными механизмы влияния внешних электрических и оптических воздействий на транспортные свойства ионных систем в нанометровых каналах. В этой связи комплексное исследование процессов транспорта электронов и ионов в

наноразмерных структурах, а также разработка методов управления ими, является актуальной научной задачей, имеющей как фундаментальное значение для физики наноструктур, так и существенный прикладной потенциал для оптоэлектроники, нанофотоники и биосенсорных технологий.

#### **Обоснованность и новизна научных результатов диссертационной работы:**

Обоснованность научных результатов диссертационной работы обеспечивается использованием совокупности современных, взаимодополняющих экспериментальных методов исследования, включая сканирующую туннельную микроскопию и спектроскопию, регистрацию СТМ-индуцированной люминесценции, электронную и оптическую литографию, методы электронной микроскопии, а также электрохимические методы анализа ионного транспорта. Все экспериментальные исследования проводились на хорошо охарактеризованных наноразмерных структурах с контролируемой геометрией и составом, а полученные данные демонстрируют высокую воспроизводимость и согласуются с существующими теоретическими представлениями и результатами, опубликованными в ведущих работах мирового научного сообщества. Интерпретация экспериментальных результатов основана на корректно выбранных физических моделях, включая теорию неупругого туннелирования электронов и описание ионного транспорта в нанопорах с учётом двойного электрического слоя и локальной плотности оптических состояний, что подтверждает достоверность сделанных выводов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении новых экспериментальных результатов, расширяющих представления о механизмах транспорта зарядов в наноразмерных системах. Впервые установлено однозначное соответствие между параметрами туннельного контакта и спектральными характеристиками оптического излучения, генерируемого при неупругом туннелировании электронов, а также продемонстрирована возможность целенаправленного управления эффективностью и спектром наноразмерных источников света за счёт инженерии локальной плотности оптических состояний в плазмонных и гибридных наноструктурах. Впервые реализованы и экспериментально исследованы методы управления ионным транспортом в твердотельных нанопорах под действием внешних электрических и оптических воздействий, включая эффект обратимого изменения ионной проводимости при низкоинтенсивном оптическом облучении. Совокупность полученных результатов формирует новые подходы к созданию функциональных элементов оптоэлектроники, нанофотоники и биосенсорных систем.

#### **Научная ценность и практическая значимость результатов диссертационной работы.**

Научная ценность результатов диссертационной работы заключается в развитии фундаментальных представлений о процессах транспорта электрического заряда в наноразмерных системах, в частности о механизмах генерации оптического излучения при неупругом туннелировании электронов и об особенностях ионного транспорта в твердотельных нанопорах. Полученные экспериментальные данные позволяют установить взаимосвязь между геометрией и материалами наноструктур, локальной плотностью оптических состояний и характеристиками излучения наноразмерных источников света, а также выявить роль внешних электрических и оптических воздействий в управлении транспортными свойствами ионных систем. Разработанные и апробированные методические подходы расширяют инструментарий экспериментальной физики наноструктур и могут быть использованы для дальнейших исследований в области нанофотоники, оптоэлектроники и нанофлюидики.

Практическая значимость работы определяется возможностью применения полученных результатов при создании функциональных элементов нано- и оптоэлектронных устройств и биосенсорных систем. Разработанные наноразмерные электроуправляемые источники оптического излучения на основе эффекта неупругого туннелирования электронов перспективны для интеграции в фотонные и оптоэлектронные схемы с пониженным энергопотреблением и высокой скоростью работы. Предложенные методы управления ионной проводимостью и селективностью твердотельных нанопор могут быть использованы при разработке нанопоровых сенсоров, мембран с регулируемыми транспортными свойствами и устройств класса lab-on-a-chip. Полученные результаты создают научно-технический задел для разработки новых приборов и технологий в области биосенсорики, нанофотоники и микро-/нанофлюидных систем.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах и специализированных школах, что подтверждает их научную значимость и признание научным сообществом. Результаты исследований представлялись на международном симпозиуме «Нанозлектроника и нанофизика» (Россия, Нижний Новгород, 2022–2025), Всероссийской конференции «Особенности применения сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах» (Россия, Черноголовка, 2020, 2022, 2023, 2025), International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'24) (Россия, Владивосток, 2024), а также на профильных конференциях, посвящённых электрохимии, мембранным и нанофлюидным процессам, биосенсорике и методам анализа биологических проб. Кроме того, результаты работы обсуждались на научных семинарах ведущих российских научных и образовательных организаций, включая Санкт-Петербургский академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, ИАП РАН, Университет ИТМО, СПбГУ, а также институты РАН в Москве, Троицке и Красноярске. Положения и выводы диссертационной работы отражены в публикациях в ведущих российских и зарубежных научных журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, что обеспечивает широкую апробацию и верификацию полученных результатов.

#### **По рецензируемой диссертации можно сделать следующие замечания:**

1. В разделе 3.3.1 показано, что интенсивность СТМ-индуцированной люминесценции максимальна вблизи краев дисковой золотой нанополосы. Вместе с тем известно, что при сканировании СТМ в области резких топографических границ особенности работы системы обратной связи могут приводить к локальным скачкам туннельного тока. В этой связи представляется целесообразным дополнительно прокомментировать, в какой степени наблюдаемое увеличение интенсивности СТМ-люминесценции на краях наноструктуры обусловлено именно локальным усилением оптических мод, а в какой — возможными вариациями туннельного тока, связанными с режимом работы обратной связи СТМ. Такое обсуждение позволило бы более однозначно интерпретировать полученные экспериментальные результаты.

2. В диссертационной работе, в разделе 3.3.3 рассматривается возможность создания наноразмерного источника оптического излучения с перестраиваемыми спектральными характеристиками в видимой и ближней инфракрасной областях. При этом основные экспериментальные данные по интенсивности излучения представлены для видимого диапазона, тогда как для ближней ИК области приводится преимущественно качественное обсуждение, связанное с особенностями регистрации сигнала. Представляется, что

дополнительное пояснение ограничений экспериментальной детекции и условий наблюдения излучения в ближней ИК области, а также более четкое разграничение экспериментально подтвержденных и ожидаемых спектральных характеристик, сделало бы изложение результатов еще более ясным и наглядным для читателя.

3. В диссертационной работе (в частности, разделе 4) увеличение ионной проводимости нанопор связывается с изменением поверхностного заряда. Представляется, что более развернутое обсуждение взаимосвязи между величиной поверхностного заряда и наблюдаемыми изменениями ионной проводимости, включая качественное или модельное описание соответствующих механизмов, сделало бы интерпретацию данного эффекта более наглядной и полной. Такое дополнение способствовало бы более глубокому пониманию физической природы наблюдаемого явления.

#### **Заключение.**

Диссертационная работа Лебедева Д.В. является комплексным законченным научным исследованием. Проведенные эксперименты и выполненный теоретический анализ, а также результаты численного моделирования заслуживают высокой оценки. Указанные выше замечания не относятся к основным положениям работы и не снижают значимость полученных результатов, представленных в работе.

Полученные Лебедевым Д.В. результаты и использованные методы решения поставленных задач соответствуют специальности ВАК физико-математических наук 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

Диссертация Лебедева Д.В. полностью удовлетворяет требованиям и критериям, предъявляемым к подобным работам и приведенным в пп. 9-14 Положения «О порядке присуждения научных степеней», утвержденного постановлением правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Лебедев Денис Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент  
Профессор кафедры микро- и наноэлектроники  
Санкт-Петербургского государственного  
электротехнического университета  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Вячеслав Алексеевич Мошников

Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф, кафедра микро- и наноэлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
тел. +7(921)9874891  
e-mail: vamoshnikov@mail.ru

Подпись проф. Мошникова В.А. удостоверяю  
Начальник отдела диссертационных советов, к.э.н.

18.03.2026

