

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Лебедева Дениса Владимировича «Методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах: неупругое туннелирование электронов и твердотельные нанопоровые мембраны», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики»**

Диссертационная работа Лебедева Д. В. посвящена исследованию фундаментальных и прикладных аспектов управления транспортом зарядов в наноразмерных системах — электронов в туннельных контактах и ионов в твердотельных нанопорах. Данная тематика находится на стыке современной экспериментальной физики, нанофотоники, оптоэлектроники, электрохимии и биосенсорики и является одной из наиболее активно развивающихся областей современной науки.

Актуальность исследования генерации оптического излучения при неупругом туннелировании электронов (НТЭ) обусловлена необходимостью создания наноразмерных, энергоэффективных и высокоскоростных источников света, совместимых с современной электронной и фотонной элементной базой. В условиях ограничений традиционных полупроводниковых лазеров по масштабируемости и интеграции, источники оптического излучения, основанные на НТЭ, представляют собой перспективную альтернативу.

Не менее актуальной является вторая часть работы, посвященная управляемому ионному транспорту через твердотельные нанопоры. Исследования в данной области имеют принципиальное значение для развития нанофлюидных систем, биомиметических мембран, биосенсорных платформ и устройств класса lab-on-a-chip. Возможность управлять ионной проводимостью и селективностью нанопор с помощью электрического и оптического воздействия представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Таким образом, выбранная автором тематика является безусловно актуальной и соответствует современным направлениям развития экспериментальной физики и нанотехнологий.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 201 страницу, включая 58 рисунков и 4 таблицы. Библиография насчитывает 286 наименований, что свидетельствует о глубокой проработке состояния вопроса и хорошем знании автором современной научной литературы.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость и личный вклад автора.

Первая глава представляет собой развернутый литературный обзор, посвященный современному состоянию исследований в области наноразмерных источников оптического излучения, неупругого туннелирования электронов, а также твердотельных нанопор и ионного транспорта. Обзор выполнен на высоком научном уровне и логически подводит к постановке задач диссертационной работы.

Во второй главе подробно описаны экспериментальные методики, использованные автором, включая установки для СТМ-люминесценции, методы нанофабрикации и характеристики наноантенн и нанопор, а также электрохимические методы исследования ионного транспорта. Описание методик отличается полнотой и воспроизводимостью.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию процессов неупругого туннелирования электронов и генерации оптического излучения в различных типах наноантенных структур. В работе продемонстрированы оригинальные подходы к визуализации локальной плотности оптических состояний и повышению квантовой эффективности излучения.

В четвертой главе рассматриваются механизмы ионного транспорта через нанопоры и методы его управления с помощью внешних электрических и оптических воздействий. Полученные результаты представляют значительный интерес для развития нанопоровых мембран и сенсорных систем.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений и заключается, в частности, в следующем:

- впервые экспериментально установлено однозначное соответствие между особенностями вольт-амперных характеристик туннельного контакта и спектральными характеристиками излучения, возникающего при неупругом туннелировании электронов;
- впервые разработаны и реализованы гибридные плазмонные Si/Au наноантенны, полученные методом СТМ-нанолитографии, обладающие повышенной локальной плотностью оптических состояний;
- впервые продемонстрирована генерация излучения в видимом и ближнем ИК диапазонах, связанная с возбуждением оптических мод различной природы в упорядоченных массивах наноструктур;

- предложен и экспериментально реализован подход к созданию наноразмерного электроуправляемого источника оптического излучения, интегрированного в полупроводниковый нановолновод;
- впервые обнаружено обратимое управление ионной проводимостью нанопористых мембран с проводящей поверхностью под действием внешнего электрического поля;
- впервые показано, что оптическое излучение малой интенсивности способно изменять ионную проводимость одиночной твердотельной нанопоры за счет захвата заряда поверхностными состояниями.

Все основные результаты работы являются оригинальными, достоверными и получены лично автором либо при его определяющем участии.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования полученных результатов при разработке наноразмерных электроуправляемых источников оптического излучения для оптоэлектронных и фотонных интегральных схем, а также при создании функциональных нанопоровых мембран и биосенсорных систем.

Разработанные методики детектирования излучения из туннельного контакта и управления ионной проводимостью нанопор могут быть использованы в дальнейших фундаментальных и прикладных исследованиях.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертационной работе Лебедева Д.В., не вызывают сомнений и обеспечиваются совокупностью методических, экспериментальных и теоретических подходов.

Все основные результаты получены с использованием современных и взаимодополняющих экспериментальных методов, включая сверхвысоковакуумную сканирующую туннельную микроскопию и СТМ-индуцированную люминесценцию, электронную и ионную литографию, просвечивающую и сканирующую электронную микроскопию, оптическую спектроскопию, а также электрохимические методы исследования ионного транспорта через твердотельные нанопоры. Применяемые методики подробно описаны, параметры экспериментов обоснованы и соответствуют современному уровню развития экспериментальной физики наносистем.

Полученные экспериментальные данные отличаются высокой воспроизводимостью, подтверждены сериями независимых измерений и согласуются с используемыми физическими моделями и численными расчетами. Интерпретация результатов основана на общепринятых теоретических подходах к описанию неупругого туннелирования электронов, локальной плотности оптических состояний, а также процессов ионного транспорта в нанопоровых системах.

Важным подтверждением обоснованности и признания результатов является их широкая апробация и публикационная активность автора. Основные результаты диссертации опубликованы в 30 научных статьях в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus и рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов докторских диссертаций. Публикации отражают все ключевые направления работы и содержат основные экспериментальные и теоретические выводы диссертации.

Результаты исследования неоднократно докладывались и обсуждались на более чем всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и научных школах, включая специализированные конференции по нанофизике, электрохимии, мембранным процессам, сканирующей зондовой микроскопии и биосенсорике.

Несмотря на высокое научное и методическое качество работы, по диссертации можно высказать ряд замечаний и вопросов, которые, однако, не снижают ее общей положительной оценки:

В работе показано, что после процесса lift-off на поверхности  $\text{SiN}_x$  мембраны могут сохраняться остаточные наночастицы золота, что проиллюстрировано, в частности, на рисунке 4.9. В связи с этим представляется целесообразным более подробно обсудить возможное влияние остаточных Au-наночастиц на распределение и фокусировку оптического излучения в области нанопоры и, как следствие, на измеряемую ионную проводимость. В частности, представляет интерес вопрос о том, могут ли такие металлические наночастицы вносить дополнительный вклад в локальные электромагнитные поля и приводить к вариациям наблюдаемого эффекта. диссертационной работе при обсуждении электрических свойств нанопористых мембран на основе Nafen и C-Nafen не приводятся численные значения их поверхностного удельного сопротивления, при этом отмечается, что низкое сопротивление C-Nafen мембраны является характерным для проводящих углеродных слоев. Вместе с тем представляется целесообразным дополнить данный вывод обсуждением конкретных экспериментальных проявлений или особенностей измерительной методики, которые позволяли бы качественно или наглядно идентифицировать высокую электропроводность C-Nafen мембраны. Такое дополнение сделало бы интерпретацию полученных данных еще более убедительной и наглядной.

диссертационной работе при проведении СТМ- и СТМ-люминесцентных экспериментов использовались зонды из различных материалов, в частности вольфрамовые и платиновые. Представляется целесообразным более подробно

обсудить особенности работы с каждым типом зондов, а также возможные различия в их влиянии на характеристики туннельного контакта, стабильность измерений и параметры регистрируемого оптического излучения. Такое обсуждение позволило бы более полно оценить воспроизводимость результатов и область применимости используемых экспериментальных подходов.

Диссертационная работа Лебедева Дениса Владимировича «Методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах: неупругое туннелирование электронов и твердотельные нанопоровые мембраны» является завершенным научным трудом, выполненным на высоком научном уровне.

По своему содержанию, объему, научной новизне, практической значимости и степени обоснованности полученных результатов диссертация полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к докторским диссертациям по специальности 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., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Я, Екатерина Владимировна Скорб, выражаю согласие на обработку персональных данных, включение их в аттестационное дело соискателя, размещение отзыва на сайте.

Официальный оппонент

Директор мегафакультета наук о жизни,  
директор, профессор научно-образовательного  
центра инфохимии  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский  
университет ИТМО», д.х.н.

Скорб Екатерина  
Владимировна

Почтовый адрес: 197101, г. Санкт-Петербург,  
Кронверкский проспект, д.49, лит. А., <https://itmo.ru/>  
тел: +7(999)2103977  
Электронная почта: [skorb@itmo.ru](mailto:skorb@itmo.ru)  
Дата составления :04.02.2026 г.

Подпись  
удостоверяю  
Менеджер ОПС  
Виноградова А.Д.