

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Лебедева Дениса Владимировича** на тему: «**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».

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Д.В. Лебедева посвящена двум фундаментальным и прикладным проблемам современной нанофизики: созданию наноразмерных источников света для оптоэлектронных интегральных схем и управлению ионным транспортом в наноканалах для биосенсорики. Актуальность работы не вызывает сомнений и подтверждается следующими факторами:

В области нанофотоники остро стоит проблема миниатюризации источников излучения и их интеграции с волноводами. Традиционные лазеры (VCSEL, микродисковые) имеют размеры, существенно превышающие длину волны, и сложны в сопряжении с планарными волноводами. Альтернативный подход — использование эффекта излучения света при неупругом туннелировании электронов (НТЭ) — позволяет создавать источники с размерами менее 100 нм, но требует повышения их крайне низкой квантовой эффективности. Диссертант обоснованно предлагает решать эту проблему путем применения оптических наноантенн различных типов.

В области биофизики и нанофлюидики ключевой задачей является создание "умных" мембран и нанопор, способных управлять транспортом ионов и молекул в реальном времени. Особый интерес представляет разработка методов управления ионной проводимостью с помощью внешних воздействий — электрического поля и оптического излучения, что открывает путь к новым методам детектирования биомолекул и моделирования клеточных процессов. Таким образом, тема диссертации находится на переднем крае исследований в области нанофотоники и нанобиоинженерии и является высокоактуальной.

Основные результаты, их новизна и достоверность

Наиболее существенные результаты, обладающие научной новизной, заключаются в следующем:

1. **Метод непрямой регистрации НТЭ:** Впервые экспериментально установлено однозначное соответствие между особенностями (перегибами) на вольт-амперных

характеристиках (ВАХ) туннельного контакта и генерацией фотонов. Показано, что анализ ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма и вторых производных позволяет визуализировать локальную плотность оптических состояний (ЛПОС) наноантенн без прямого детектирования оптического сигнала.

2. Гибридные Si/Au наноантенны: Впервые разработана и реализована методика СТМ-нанолиитографии для создания гибридных Si/Au наноантенн из тонких пленок. Показано, что такие структуры обладают повышенной ЛПОС и демонстрируют два режима излучения: при низких напряжениях (менее 3 В) за счет НТЭ, а при высоких (более 5 В) — за счет электролюминесценции наноструктурированного кремния. Внешняя квантовая эффективность (ВКЭ) таких антенн оценена как $1,2 \cdot 10^{-5}$, что выше, чем для гладкой золотой пленки ($9,0 \cdot 10^{-7}$).

3. Перестраиваемый источник на основе массивов: Впервые в массивах золотых нанобампов, полученных методом фемтосекундной лазерной печати, обнаружено возбуждение двух типов оптических мод при НТЭ: локализованных (в видимом диапазоне) и коллективных (в ближнем ИК-диапазоне). Продемонстрирована принципиальная возможность создания перестраиваемого электроуправляемого источника излучения путем изменения напряжения смещения.

4. Интегрированный источник "нано-волновод": Впервые создан наноразмерный электроуправляемый источник света, интегрированный непосредственно в полупроводниковый волновод на основе нитевидного нанокристалла (ННК) GaP. Показано, что вставка гексагональной фазы (вюрцита) в ННК p-GaP:Be служит активной областью, а кубическая фаза (сфалерит) выступает в роли волновода с малыми потерями, что решает проблему ввода излучения.

5. Управление ионным транспортом электрическим полем: Впервые обнаружено обратимое изменение ионной проводимости и селективности нанопористых мембран из волокон Al_2O_3 с проводящим углеродным покрытием (C-Nafen) под действием внешнего электрического поля. Показано, что изменение потенциала от -500 до +500 мВ позволяет переключать селективность мембраны с катион- на анион-селективную.

6. Управление ионным транспортом светом: Впервые показано, что оптическое излучение широкого спектрального диапазона (галогеновая лампа) с рекордно низкой интенсивностью (35 мВт/см^2) способно увеличивать ионную проводимость единичной твердотельной нанопоры в $SiNx$ на 21% (и до 35% при наличии плазмонной антенны). Доказано, что эффект обусловлен фотоиндуцированным захватом заряда на поверхностных дефектных состояниях $SiNx$, а не нагревом.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и обеспечивается:

Использованием современного и взаимодополняющего экспериментального оборудования: сверхвысоковакуумный СТМ/СТМ-Л, РЭМ, ПЭМ, спектроскопия комбинационного рассеяния, темнопольная микроскопия, электрохимические методы анализа.

Корректным применением теоретических моделей (формализм Бардина для НТЭ, модели Симмонса и Фаулера-Нордгейма, модель Пуассона-Нернста-Планка, ТМС-модель) для интерпретации экспериментальных данных.

Верификацией экспериментальных результатов с помощью численного моделирования методом конечных элементов (COMSOL Multiphysics).

Воспроизводимостью экспериментальных результатов и их согласием с ограниченными данными, имеющимися в мировой литературе (например, работы Qian et al., Parzefall et al., Nicoli et al.).

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

– **Для нанофотоники:** Разработанные методики непрямого контроля НТЭ и визуализации ЛПОС могут быть использованы для тестирования и оптимизации наноантенн и источников излучения непосредственно на оптоэлектронных чипах. Предложенная концепция интеграции источника в ИНК GaP открывает путь к созданию компактных фотонных интегральных схем, совместимых с кремниевой технологией.

– **Для мембранных технологий:** Продемонстрированная возможность обратимого переключения ионной селективности мембран C-Nafen с помощью слабого электрического поля может быть использована для создания "умных" фильтров и систем дозирования веществ в микрофлюидных устройствах.

– **Для биосенсорики:** Разработанная методика управления ионной проводимостью единичной нанопоры с помощью сверхслабого оптического излучения (35 мВт/см^2) является перспективной для создания нового поколения нанопоровых биосенсоров, позволяющих изучать функциональную активность единичных биомолекул (что продемонстрировано на примере фермента аспарагиназы) без их термического повреждения.

Полнота изложения результатов в научной печати, апробация работы

Основные положения диссертации полностью отражены в научных публикациях автора. Соискателем опубликовано **30 работ** в ведущих рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных SCOPUS, Web of Science и рекомендованных ВАК. Среди них такие высокорейтинговые издания, как *Advanced Optical*

Materials, Journal of Physical Chemistry Letters, Physical Review Letters и др. Полученные результаты прошли широкую апробацию: они докладывались на множестве Всероссийских и международных конференций, включая симпозиум "Нанофизика и нанозлектроника" (Нижний Новгород, 2022-2025), конференции по мембранам (Сочи, Прага) и электрохимии (Москва).

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики». Полученные результаты соответствуют области исследования, в частности пунктам:

1. Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики.

6. Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики.

10. Моделирование физических явлений и процессов.

Содержание автореферата полностью соответствует основным идеям и выводам диссертации.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на общее высокое качество работы, по ней имеются следующие замечания, носящие скорее дискуссионный или рекомендательный характер и не снижающие ее общей положительной оценки:

Вольт-амперные характеристики туннельного зазора, а также карты светимости/проводимости поверхности образца во многих экспериментах получены в нормальных окружающих условиях, в атмосфере окружающего воздуха. Напряжения между иглой и образцом в этих экспериментах достигают 10В, что позволяет заподозрить возможность химических превращений неизвестных веществ, адсорбированных на поверхностном слое, стимулированных доставкой дополнительных электронов на энергетические уровни в этих слоях, или наоборот, оттоком электронов с каких-то поверхностных уровней. Автор осознает упомянутую в замечании опасность, и принимает вполне достойные меры к тому, чтобы проверить отсутствие артефактов такого рода. Однако, рассуждая об идеале, следует отметить, что перенос исследований в высокий вакуум, сопровождаемый полноценной очисткой поверхности (отжиг, бомбардировка образца пассивными ионами) был бы вполне ожидаемым шагом при дальнейшем развитии описанной в диссертации экспериментальной техники.

Эффективность преобразования электричества в свет, достигаемая в описанных автором эксперимента, составляет ничтожный процент. Оппонент понимает, что в этом не вина автора диссертации, и что не прямые/неупругие оптические переходы вообще весьма маловероятная вещь. Это замечание не снижает впечатления о высоком качестве работы, это скорее сетование на несовершенство мира, доставшегося нам всем для исследований.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы, которая представляет собой законченное научное исследование высокого уровня, и носят рекомендательный характер для дальнейших исследований.

Заключение

Диссертация Лебедева Дениса Владимировича является завершённой научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема — разработаны методы управления оптическим излучением и ионным транспортом в наносистемах, что имеет важное значение для развития приборов и методов экспериментальной физики, нанофотоники и биосенсорики. Работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор, Лебедев Денис Владимирович, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2 — «Приборы и методы экспериментальной физики».

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
ФИАН им.П.Н.Лебедева РАН,
Старший научный сотрудник

19.03.2026

Казанцев Д.В.

ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

Помощник
директора



Иван С. Кр