

В диссертационный совет АУ 02.01, созданный на базе федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника - заведующего лабораторией физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Чернова Александра Игоревича

на диссертационную работу Соломонова Никиты Александровича на тему «Исследование эмиссии фотонов из туннельного контакта с оптическими наноразмерными или полупроводниковыми волноводами при неупругом туннелировании электронов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности

1.3.8. – физика конденсированного состояния

В представленной диссертационной работе исследованы физические процессы эмиссии фотонов при неупругом туннелировании электронов в металлических и полупроводниковых наноструктурах. Особое внимание уделено возможности управления оптическим откликом туннельного контакта за счёт использования плазмонных наноразмерных антенн и исследованию легированных нитевидных нанокристаллов GaP в качестве электроуправляемого источника излучения, интегрированного в нановолновод.

Неупругое туннелирование электронов представляет интерес как механизм создания наноразмерных источников излучения с электрическим возбуждением. Вместе с тем низкая эффективность электрон-фотонного преобразования и существенное влияние локальной электронной и кристаллической структуры ограничивают практическое применение таких устройств. Поэтому исследование взаимосвязи между параметрами туннельного контакта, структурой наноматериала и пространственным распределением светимости является **актуальной** задачей физики конденсированного состояния и нанофотоники.

В работе реализованы два взаимодополняющих подхода. Первый связан с возбуждением плазмонных мод в массивах золотых наноразмерных антенн. Второй основан на возбуждении оптических состояний в легированных нитевидных нанокристаллах GaP, выполняющих одновременно функцию полупроводниковых нановолноводов. Комплексное применение СТМ-Л, микроФЛ, электронной микроскопии и спектроскопии с временным разрешением позволило установить связь между структурными особенностями исследованных объектов и характером их оптического отклика. Таким образом, тема диссертационной работы является **актуальной**, а полученные результаты имеют значение

для развития представлений об электрон-фотонном преобразовании в туннельном контакте с наноструктурами и создания электроуправляемых источников излучения.

Общая характеристика работы: диссертация Соломонова Н.А. изложена на 139 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и библиографического списка из 183 наименований. Работа содержит 49 рисунков и 1 таблицу. Структура диссертации соответствует логике поставленных задач.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость результатов. Приведены сведения об апробации, публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе рассмотрены современные типы наноразмерных источников фотонов с электрическим возбуждением. Проанализированы нанолазеры, спазеры, поляритонные структуры и источники на основе неупругого туннелирования электронов. Автор особое внимание уделяет описанию преимуществ и проблем источников на основе неупругого туннелирования электронов и указывает, что повышение локальной плотности оптических состояний и эффективное согласование излучения с оптическими модами являются ключевыми условиями увеличения интенсивности сигнала и эффективности процесса возбуждения излучения.

Во второй главе описаны методики СТМ-Л и СТС-Л, применяемые для исследования излучения из туннельного контакта. Представлена схема синхронной регистрации топографии, электрических характеристик и оптического сигнала, а также разработанное программное обеспечение для обработки мультиканальных данных. Используемый подход позволяет непосредственно сопоставлять морфологию образца с пространственным распределением светимости.

В третьей главе исследованы полые золотые наноантенны, изготовленные методом фемтосекундной лазерной печати. Сопоставление результатов численного моделирования, спектроскопии рассеяния и СТМ-Л измерений позволило определить вклад собственных и коллективных плазмонных мод. Показано электрически управляемое излучение в диапазонах 550–850 и 1650–1870 нм.

Четвёртая глава посвящена разработке методики воспроизводимых СТМ-измерений легированных нитевидных нанокристаллов GaP. Исследованы различные способы переноса ННК и типы проводящих подложек, проанализированы характерные артефакты. Показано, что механический перенос на никелевую подложку и использование напряжений 7–10 В при туннельном токе не более 400 пА обеспечивают наиболее стабильные измерения.

В пятой главе проведено сопоставление структурных и оптических свойств ННК GaP:Si и GaP:Be. Для интерпретации СТМ-Л данных использованы результаты микрофотолюминесценции, спектроскопии с временным разрешением, электронной микроскопии и численного моделирования волноводных мод. Установлено, что в GaP:Be локализованные области повышенной светимости связаны с присутствием вставок вюрцитной фазы. Полученные результаты показывают возможность использования GaP ННК в качестве нановолновода с монолитно интегрированным электроуправляемым источником фотонов.

Научная новизна работы определяется комплексным исследованием эмиссии фотонов из туннельного контакта с металлическими и полупроводниковыми

наноструктурами. Впервые выполнены СТМ-Л измерения массивов полых золотых наноплазмонных антенн, изготовленных фемтосекундной лазерной печатью, и показана возможность электрического управления диапазоном излучения. Установлено влияние ближнепольного взаимодействия наноплазмонных антенн на пространственное распределение оптического сигнала. Существенным результатом является разработка воспроизводимой методики СТМ- и СТМ-Л измерений легированных ННК GaP при комнатной температуре без высокотемпературной или химической обработки поверхности. Для ННК GaP:Be установлена взаимосвязь локализованных областей повышенной светимости с присутствием вставок вюрцитной фазы, обеспечивающих дополнительные оптические переходы.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о влиянии локальной плотности оптических состояний, кристаллической структуры и типа легирования на эмиссию фотонов при неупругом туннелировании электронов. Сопоставление свойств GaP:Si и GaP:Be позволило выявить различия в механизмах возбуждения и распространения излучения в полупроводниковых ННК.

Практическая значимость определяется созданием методических основ для исследования слабопроводящих полупроводниковых нанообъектов методами СТМ-Л. Показана возможность использования GaP:Be ННК в качестве полупроводникового нановолновода с монолитно интегрированным источником фотонов. Разработанные подходы могут быть применены при исследовании других полупроводниковых наноструктур и создании элементов интегральной оптоэлектроники.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением комплекса взаимодополняющих методов, включающих СТМ-Л, СТС-Л, электронную микроскопию, микрофотолюминесцентную спектроскопию, спектроскопию с временным разрешением и численное моделирование. Выводы подтверждаются согласованностью независимых экспериментальных данных и воспроизводимостью проведённых измерений. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в пяти статьях в международных рецензируемых научных изданиях и представлены на российских и международных конференциях. Содержание публикаций и автореферата в достаточной степени отражает основные положения и результаты диссертации.

Рекомендуется продолжить исследования влияния фазового состава, концентрации легирующей примеси и дефектной структуры ННК GaP на пространственные и спектральные характеристики туннельной люминесценции. Представляет интерес разработка подходов к контролируемому формированию и позиционированию вставок вюрцитной фазы, а также повышение эффективности связи источника с волноводными модами ННК.

Отмечая высокий научный уровень работы, следует высказать ряд замечаний и вопросов:

1. В работе показано, что локальные максимумы светимости в нанонитях p-GaP:Be связаны с наличием вставок псевдопрямоугольной вюрцитной фазы (WZ). Вместе с тем в тексте не обсуждается возможность управляемого формирования таких вставок. Поскольку в процессе эпитаксиального роста появление дефектов упаковки часто носит стохастический характер, возможно ли технологически контролировать их положение и протяженность? И как, с учетом этой структурной случайности, принципиально обеспечить

предсказуемую и воспроизводимую эмиссию от устройства к устройству, что критически важно для масштабируемой интегральной фотоники?

2. Представляет несомненный интерес заявленная в работе возможность интеграции исследуемых нанисточников в реальные фотонные схемы. Однако текущая экспериментальная конфигурация опирается на субнанометровый туннельный зазор, прецизионно поддерживаемый зондом СТМ. Уместным является более детальный анализ перспектив масштабирования и перехода от СТМ-конфигураций к планарным твердотельным структурам. Необходимо уточнить, не является ли технологическая трудоемкость создания стабильного монолитного туннельного зазора (без применения активной пьезо-обратной связи) фундаментальным барьером для их последующей практической интеграции.

3. Связь максимумов светимости со вставками вюрцитной фазы установлена на основании совокупности независимых СТМ-Л и структурных измерений. Насколько технически реализуем прямой эксперимент по сопоставлению кристаллической структуры и светимости на одном и том же нанокристалле? Кроме того, при исследовании локальных аномалий на высоких токах, как удастся надежно отделить истинно квантовые эффекты от паразитных явлений, таких как локальный джоулев нагрев и возможная термомеханическая деградация наноконтакта?

Указанные замечания не ставят под сомнение достоверность основных результатов и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа Соломонова Никиты Александровича представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, в котором решена актуальная задача изучения эмиссии фотонов при неупругом туннелировании электронов в металлических и полупроводниковых наноструктурах. Полученные результаты обладают научной новизной и имеют значение для физики конденсированного состояния, физики полупроводниковых наноструктур и нанопотоники. Достоверность выводов подтверждается использованием комплекса современных экспериментальных методов, воспроизводимостью измерений и согласованностью результатов СТМ-Л, электронной микроскопии, микрофотолюминесцентной спектроскопии и численного моделирования. Основные результаты опубликованы в пяти рецензируемых научных изданиях и представлены на российских и международных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает её основные положения.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней в СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Соломонов Никита Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
д.ф.-м.н., гл. науч. сотр. - зав. лаб. физики
магнитных гетероструктур и спинтроники
для энергосберегающих информационных

Чернов Александр Игоревич

технологий ФГАОУ ВО «Московский
физико-технический институт
(национальный исследовательский
университет)»

20» августа 2026 г.

Место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Адрес места работы: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

Сайт организации: <https://itmo.ru/>

Телефон: +7 9

Электронная почта: chernov.ai@mipt.ru

РЬ
ТИ
В