

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. Алферова Российской академии наук»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

PhD по физике, ведущего научного сотрудника физического факультета
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Кравцова Василия Андреевича

на диссертационную работу Соломонова Никиты Александровича
на тему «Исследование эмиссии фотонов из туннельного контакта с оптическими
наноантеннами или полупроводниковыми волноводами при неупругом туннелировании
электронов»

по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния

В представленной диссертационной работе реализован комплексный подход к исследованию эмиссии фотонов при неупругом туннелировании электронов в структурах с металлическими плазмонными наноантеннами и полупроводниковыми нитевидными нанокристаллами. Использование неупругого туннелирования позволяет создавать источники излучения с нанометровыми размерами активной области, электрическим возбуждением и возможностью управления спектральными характеристиками. Вместе с тем, практическое применение таких источников ограничивается низкой эффективностью электрон-фотонного преобразования, что определяет необходимость поиска способов усиления возбуждаемых оптических состояний и эффективного вывода излучения.

В работе исследованы два подхода к решению данной задачи. Первый подход основан на использовании массивов полых золотых наноантенн, плазмонные резонансы которых обеспечивают модификацию спектральных и пространственных характеристик излучения туннельного контакта. Второй подход связан с возбуждением оптических состояний в легированных нитевидных нанокристаллах GaP, одновременно выполняющих функцию полупроводниковых нановолноводов. Необходимость детального изучения физических механизмов эмиссии фотонов в подобных структурах непосредственно связана с актуальными задачами современной нанофотоники и интегральной оптоэлектроники, что определяет высокую **актуальность** диссертационной работы.

Общая характеристика работы: диссертация Соломонова Н.А. изложена на 139 страницах, включает введение, пять глав, заключение, список сокращений и условных обозначений и библиографический список из 183 наименований. Работа содержит 49 рисунков и 1 таблицу. Структура диссертации логична и соответствует последовательности поставленных задач.

Во введении обоснована актуальность выбранного направления, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

Представлены основные положения, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов, публикациях и личном вкладе автора.

В первой главе представлен аналитический обзор современного состояния исследований в области наноразмерных источников фотонов с электрическим возбуждением. Рассмотрены когерентные и некогерентные источники излучения, включая нанолазеры, спазеры, поляритонные структуры и источники на основе неупругого туннелирования электронов. Проанализированы их основные преимущества и ограничения, связанные с размерами активной области, эффективностью, тепловыделением и совместимостью с фотонными интегральными платформами. Особое внимание уделено механизмам возбуждения оптических состояний в структурах металл-изолятор-металл и металл-изолятор-полупроводник. Проведённый анализ убедительно обосновывает выбор золотых плазмонных нанополос и нитевидных нанокристаллов GaP в качестве объектов дальнейшего исследования.

Во второй главе описаны экспериментальные методы и оборудование, использованные при выполнении работы. Представлена модифицированная сверхвысоковакуумная СТМ-установка, позволяющая одновременно регистрировать топографию, вольтамперные характеристики туннельного контакта и оптический сигнал. Рассмотрены методики СТМ-Л и СТС-Л, схема синхронизации измерительных каналов и разработанное программное обеспечение для автоматизированной обработки данных.

В третьей главе представлены результаты исследования массивов полых золотых нанополос, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати. Проведены анализ морфологии, численное моделирование собственных мод, измерения спектров рассеяния и прямые измерения интенсивности люминесценции туннельного контакта. Показано, что массив нанополос обеспечивает электрически управляемое излучение при возбуждении зондом СТМ. Выявлено, что в системах близкорасположенных нанополос оптический сигнал может быть увеличен на 10–15 % вследствие ближнепольного взаимодействия плазмонных резонаторов. Полученные результаты демонстрируют возможность управления спектральными и пространственными характеристиками излучения туннельного источника.

В четвёртой главе рассмотрены особенности проведения СТМ-измерений легированных нитевидных нанокристаллов GaP. Исследованы две методики переноса ННК на пять типов проводящих подложек и определены условия получения воспроизводимых топографических изображений. Показано, что наиболее стабильные измерения достигаются при механическом переносе ННК на никелевую подложку. Выявлено, что оптимальные параметры туннельного контакта составляют 7–10 В при токе не более 400 пА, что обеспечивает получение серий из более чем 15 последовательных изображений.

В пятой главе исследованы структурные, оптические и волноводные свойства ННК GaP:Si и GaP:Be. Проведены измерения микрофотолюминесценции и времени жизни возбужденных состояний, численное моделирование волноводных мод и СТМ-Л картирование. Для ННК GaP:Si зарегистрировано слабое распределённое излучение, связанное преимущественно с примесно-дефектными состояниями. В ННК GaP:Be обнаружены локализованные области повышенной светимости, ассоциированные со вставками вюрцитной фазы и дополнительными оптическими переходами. Показано, что ННК GaP:Be может выполнять функцию нановолновода с монолитно интегрированным электроуправляемым источником фотонов, возбуждаемым за счёт неупругого туннелирования электронов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении ряда новых результатов, имеющих значение для физики наноструктур и нанофотоники. Впервые проведены СТМ-Л исследования массивов полых золотых наноантенн, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати, и продемонстрирована электрическая перестройка спектра их излучения. Впервые с нанометровым разрешением исследовано изменение локальной плотности оптических состояний при взаимодействии близкорасположенных плазмонных резонаторов. Разработана воспроизводимая методика СТМ и СТМ-Л измерений легированных НК GaP при комнатной температуре. Установлена связь локальных максимумов светимости GaP:Be с наличием вставок вюрцитной фазы и продемонстрирована возможность создания источника фотонов, интегрированного в полупроводниковый нановолновод.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии представлений о возбуждении оптических состояний при неупругом туннелировании электронов в металлических и полупроводниковых наноструктурах. Полученные результаты уточняют влияние плазмонных резонансов, локальной плотности оптических состояний и кристаллической структуры полупроводника на эффективность эмиссии фотонов из туннельного контакта.

Практическая значимость работы определяется демонстрацией двух подходов к созданию наноразмерных электроуправляемых источников фотонов. Использование плазмонных наноантенн обеспечивает управление спектром излучения, а применение НК GaP позволяет совместить источник фотонов и оптический нановолновод в одной структуре. Разработанные методики подготовки образцов и проведения СТМ-Л измерений могут быть использованы при исследовании других полупроводниковых наноструктур.

Рекомендуется продолжить исследования в направлении повышения внешней квантовой эффективности туннельных источников, оптимизации геометрии плазмонных наноантенн и эффективности ввода излучения в волноводные моды. Перспективным представляется также переход от конфигурации с СТМ-зондом к масштабируемым планарным туннельным структурам, пригодным для интеграции в фотонные схемы.

Отмечая высокий научный уровень работы, ее актуальность и научную новизну, следует высказать **ряд вопросов и замечаний**:

1. В главе 2 (стр. 44), значения ВКЭ рассчитываются путем нормировки оптического сигнала на значения тока обратной связи. Такой подход оправдан, если измеряемый оптический сигнал строго пропорционален току обратной связи и не проявляет дополнительной зависимости от расстояния между зондом и образцом для постоянного значения тока. Проверялось ли такое поведение экспериментально? Каким образом при этом исключается вклад темновых отсчетов из оптического сигнала?

2. В главе 3 (стр. 56) обсуждаются решеточные резонансы массива наноантенн, но не указывается диапазон углов падения света для измерений FTIR в сравнении с углами сбора в установке СТМ-Л. Известно, что такие резонансы имеют существенную дисперсию, т.е. зависимость энергии от угла падения света. Может ли разница в экспериментальных конфигурациях объяснять тот факт, что в экспериментах не удалось зафиксировать СТМ-Л сигнал в ближнем ИК диапазоне (стр. 65)? Потенциально, в изучаемых структурах могут поддерживаться решеточные резонансы высших порядков в видимом диапазоне. Может ли возникновение «аномального» режима СТМ-Л (стр. 69) быть связано с возбуждением решеточных мод второго порядка с волновыми векторами, соответствующими геометрии

сбора оптического сигнала? Какова основная гипотеза возникновения «аномального» режима?

3. В главе 4 (стр. 92) обсуждается «след» на Ni подложке, обнаруженный после перемещения ННК в другую область образца. Чем объясняются необычайно большие значения высоты «следа» (около 30 нм при общей высоте ННК 150 нм), представленные на Рис. 37(г)?

4. В главе 5 (стр. 112-113) обсуждаются результаты измерений СТМ-Л для GaP:Be и GaP:Si ННК и делается вывод о различиях в пространственном распределении оптического сигнала, связанных с различными механизмами люминесценции. Однако, из-за значительных артефактов в СТМ топографии для GaP:Be ННК сложно оценить, насколько существенны различия в пространственных распределениях сигналов. Фактически, на обоих графиках (б) и (д) наблюдается излучение сигнала по всей длине ННК с локальными флуктуациями количества отсчетов. В тексте также упоминается «локализованный в области торца ННК сигнал СТМ-Л от GaP:Be ННК» - необходимо пояснить, какая особенность имеется в виду, поскольку из представленных графиков это не очевидно.

5. В положении 1 (стр. 11), антенны называются параболическими; однако в тексте диссертации речь идет о полусферической геометрии, которая в расчетах описывается эллипсоидом. На стр. 28 вместо термина «связанное состояние в континууме» используется некорректный термин «состояние, связанное с континуумом». Для аббревиатуры ЛНТЭ не представлена полная расшифровка. На нескольких рисунках отсутствуют подписи для величин, соответствующих осям либо цветовым шкалам графиков, например, Рис. 17(в), Рис. 19 (б, в), Рис. 49. На Рис. 41 для временной оси некорректно указаны единицы «нм». На стр. 103-104 термин «вектор Пойнтинга» используется с опечаткой и с единицами измерения «Вт/м» вместо «Вт/м²». В тексте присутствует несколько дополнительных опечаток.

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

Диссертационная работа Соломонова Никиты Александровича представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в котором решена актуальная задача исследования эмиссии фотонов при неупругом туннелировании электронов в металлических и полупроводниковых наноструктурах. Полученные результаты обладают научной новизной и имеют существенное значение для физики конденсированного состояния, нанофотоники и интегральной оптоэлектроники.

Достоверность результатов обеспечивается применением комплекса современных экспериментальных методов, согласованностью независимых измерений и сопоставлением экспериментальных данных с результатами численного моделирования. Основные результаты работы опубликованы в пяти рецензируемых научных изданиях и представлены на профильных научных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает её основные положения и результаты.

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 специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент, PhD по
физике, ведущий научный сотрудник
физического факультета Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования

«Национальный исследовательский
университет ИТМО»

Кравцов Василий Андреевич

«17» августа 2026 г

Место работы: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», физический факультет.

Адрес места работы: 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский просп., д. 49, литера А.

Сайт организации: <https://itmo.ru/>

Телефон: +7 9

Электронная почта: vasily.kravtsov@metalab.ifmo.ru

ПОДПИСЬ

ПО
УД
МЕ
ТО