



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования

**«Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)**

ул. Профессора Попова, д.5, литера Ф,
Санкт-Петербург, 197022

Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58;

e-mail: info@etu.ru; <https://etu.ru>

ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381;

ИНН/КПП 7813045402/781301001

11.09.2026 № 100206/1779
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности

А.А. Семенов

«11» сентября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Соломонова Никиты Александровича

**«Исследование эмиссии фотонов из туннельного контакта с оптическими
наноантеннами или полупроводниковыми волноводами при неупругом
туннелировании электронов»,**

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационной работы

Создание энергоэффективных фотонных интегральных схем (ФИС) с высокой плотностью элементов ограничено рядом нерешенных технологических задач, одной из которых является разработка наноразмерных источников фотонов, возбуждаемых и управляемых электрическим напряжением, сочетаемых с материалами и промышленными процессами КМОП-совместимых фотонных платформ. В этом контексте особый интерес представляют источники излучения, основанные на неупругом туннелировании электронов (НТЭ) через нанометровые диэлектрические зазоры структур металл-изолятор-металл (МИМ) и металл-изолятор-полупроводник (МИП). Особенности процесса НТЭ позволяют реализовать источники фотонов в предельно малом объеме с возможностью управления спектральными характеристиками излучения за счёт изменения электрического смещения. Однако практическое применение таких источников ограничено сейчас их чрезвычайно низкой внешней квантовой эффективностью.

В связи с этим, **актуальность** диссертационной работы Н.А. Соломонова обусловлена необходимостью проведения систематических исследований с целью повышения эффективности процессов эмиссии фотонов при неупругом туннелировании электронов в МИП и МИМ структурах и создания наноразмерных электроуправляемых источников излучения для ФИС нового поколения.

В рамках работы автор исследует два подхода к решению данной задачи. Первый подход связан с повышением интенсивности излучения из туннельного контакта за счёт введения в МИМ-структуру массивов золотых плазмонных наноплазмонных антенн. Второй подход основан на увеличении эффективности МИП-источника фотонов за счёт возбуждения излучения в прямозонных кристаллических вставках, сформированных в непрямоzonных нитевидных нанокристаллах фосфида галлия (GaP ННК). Результаты исследования, полученные в рамках работы, позволили рассматривать исследуемую МИМ-структуру с массивом золотых плазмонных наноплазмонных антенн в качестве электроуправляемого источника фотонов с возможностью настройки спектра излучения в широком спектральном диапазоне, а МИП-структуру на основе GaP ННК как наноразмерный источник фотонов, монолитно интегрированный в полупроводниковый оптический нановолновод.

Таким образом, данная диссертационная работа вносит вклад как в развитие физических представлений о процессах излучения фотонов из твердого тела при неупругом туннелировании электронов, так и в разработку новых подходов к созданию компактных источников излучения для фотонных интегральных схем нового поколения.

Научная новизна исследований и полученных результатов

1. Автором впервые проведены оптические измерения люминесценции в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ-Л) массивов полых золотых наноплазмонных антенн, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати. Установлено, что такие плазмонные структуры при возбуждении путем неупругого туннелирования электронов через сверхтонкий вакуумный промежуток выступают в роли широкополосных электрически возбуждаемых источников фотонов с возможностью перестройки спектра излучения в 1600–1870 нм (ИК) и в 550–870 нм спектральных диапазонах посредством регулировки напряжения смещения туннельного контакта в диапазонах 0,6–0,7 и 2,2–2,5 В.

2. Впервые с помощью прямых оптических измерений СТМ-Л визуализировано пространственное изменение локальной плотности оптических состояний (ЛПОС) с 10-нм разрешением в системе двух близкорасположенных золотых наноплазмонных антенн: полый полусферы диаметром 520 нм и высотой 265 нм и наночастицы со средним диаметром 120 нм. Показано, что ближнепольное взаимодействие двух таких плазмонных резонаторов приводит к повышению оптического сигнала на 10–15% относительно уровня единичной наноплазмонной антенны и сопровождается заметными изменениями в картинах пространственного распределения ЛПОС.

3. Впервые проведены воспроизводимые СТМ и СТМ-Л измерения GaP ННК при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума без применения методов подготовки образца, модифицирующих свойства или морфологию поверхности нанокристаллов (высокотемпературных отжиг, химическое и физическое травление и др.).

4. Впервые продемонстрировано, что легированные ННК GaP могут выступать в качестве нановолноводов с монолитно интегрированными электроуправляемыми источниками фотонов, в которых излучение возбуждается за счёт неупругого туннелирования электронов с возбуждением оптических состояний в полупроводниковой наноструктуре. Проведены

сравнения механизмов возбуждения излучения для двух типов ННК GaP, легированных атомами Si (*n*-тип проводимости) и Be (*p*-тип проводимости), с использованием комплексного подхода: СТМ-Л, спектроскопия микро-фотолюминесценции и ФЛ-спектроскопия с временным разрешением.

5. Впервые установлена взаимосвязь между пространственными неоднородностями светимости на СТМ-Л картах с наличием псевдопрямозонных вставок вюрцитной фазы в GaP:Be, которые приводят к локальному повышению эффективности электрон-фотонного преобразования.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов

В работе продемонстрирована возможность пространственного картирования фотолюминесцентными методами локальной плотности оптических состояний с субдифракционным разрешением с помощью сканирующей туннельной микроскопии (СТМ-Л) и сканирующей туннельной спектроскопии (СТС-Л), что позволяет установить связь между параметрами туннельного контакта, морфологией наноструктур и особенностями их оптического отклика. Такая точность и чувствительность методик измерения позволяет углубить представление о процессах электрон-фотонного преобразования при неупругом туннелировании электронов в наноразмерных МИМ- и МИП-структурах.

Практическая значимость работы состоит в реализации двух подходов к созданию наноразмерных электроуправляемых источников фотонов: на основе массивов золотых плазмонных наноантенн и на основе легированных нитевидных нанокристаллов GaP, выполняющих функцию полупроводниковых оптических нановолноводов. Первый подход обеспечивает усиление и спектральную перестройку излучения из туннельного контакта, второй – возможность монолитной интеграции источника фотонов с нановолноводом.

В процессе исследований подобрано оптимальное сочетание материалов подложек, методов переноса ННК на подложку и режимов туннельного контакта, что обеспечивает воспроизводимые СТМ и СТМ-Л измерения полупроводниковых наноструктур. Полученные результаты по исследованию обоих типов исследуемых НТЭ источников фотонов имеют практическое значение при разработке компактных источников излучения, потенциально пригодных для интеграции в фотонные интегральные схемы и оптоэлектронные компоненты нового поколения.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Соломонова Н.А. состоит из введения, пяти основных глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Общий объем основного текста составляет 139 страниц. Работа включает 49 иллюстраций и 1 таблицу. Список литературы насчитывает 183 наименования. Оформление работы соответствует требованиям ВАК.

Во введении приведен краткий обзор современных тенденций развития вычислительной техники, центров коллективной обработки данных и проблем разработки фотонных интегральных схем. Обоснованы цели и задачи исследований, обозначены защищаемые положения, а также сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований в области технических решений для компактных источников фотонов для ФИС, а также выделены

физические и технологические ограничения различных подходов. Особое внимание уделено источникам излучения, основанным на неупругом туннелировании электронов, потенциально удовлетворяющим всем указанным требованиям для ФИС, однако ограниченным в практическом применении малым внешним квантовым выходом. На основе проведённого обзора сформулированы цели работы и определён список задач, решение которых может способствовать разработке эффективных источников фотонов данного типа.

Во второй главе автор подробно описывает особенности измерений излучения из туннельного контакта под воздействием фотоэлектронов в условиях сверхвысокого вакуума. Глава содержит подробное описание режимов проведения измерений фотолюминесценции в СТМ, а также процедуру анализа получаемых данных с использованием разработанного оригинального программного пакета для автоматизированной обработки мультиканальных данных.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований перестраиваемых источников излучения в видимом и инфракрасном оптических диапазонах на основе туннельного контакта с массивом тонкостенных полусферических наноантенн, изготовленных в тонкой золотой плёнке с помощью фемтосекундной лазерной печати. Показано, что в таких структурах возможно возбуждение оптического излучения за счёт процесса неупругого туннелирования электронов, а изменение напряжения на туннельном контакте позволяет управлять спектральными характеристиками оптического отклика в широком спектральном диапазоне. Продemonстрировано линейное увеличение интенсивности излучения от источника фотонов при изменении напряжения смещения туннельного контакта в диапазоне 1.4–2.6 В (эквивалентно спектральному диапазону 550–850 нм) для источника Au-Pt/Ir, также определена возможность возбуждения излучения в ИК-диапазоне (1650–1870 нм) при напряжении смещения 0.66–0.75 В. Рассмотрена мультиантенная геометрия источника и влияние ближнепольного взаимодействия плазмонных наноструктур на пространственное распределение интенсивности оптического сигнала.

В четвертой главе представлены результаты оптимизации процесса подготовки образцов с ННК и режима СТМ измерений, которые позволили достичь воспроизводимого получения высококачественных топографических изображений GaP нитевидных нанокристаллов *p*- и *n*-типа проводимости (легированных Be и Si, соответственно) при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума. Здесь же исследованы сочетания двух методов переноса GaP ННК *n*- и *p*-типов с кремниевой ростовой подложки на пять различных проводящих поверхностей, используемых в практике сканирующей туннельной микроскопии. Полученные результаты позволили сформировать воспроизводимую экспериментальную методику исследования легированных GaP ННК при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума.

Пятая глава представляет результаты исследований процессов генерации излучения в туннельном контакте между зондом СТМ и полупроводниковыми ННК GaP. Проведённые измерения люминесценции нанокристаллов в СТМ выявили принципиальные различия в областях излучения и пространственном распределении локальной плотности оптических состояний между ННК с различным типом легирования. Для GaP:Si продемонстрировано возбуждение оптического излучения слабой интенсивности в видимом спектральном диапазоне с равномерной интенсивностью на протяжении всего ННК. Такое излучение ассоциировано автором с релаксацией горячих фотоэлектронов через примесные и дефектные со-

стояния в полупроводнике. Для GaP:Be наблюдались локализованные участки с повышенной интенсивностью сигнала, такие особенности ассоциированы с наличием областей с прямозонной структурой и повышенной эффективностью излучательного канала релаксации. Полученные результаты позволили автору сделать вывод о перспективе таких МИП структур в качестве наноразмерных электроуправляемых источников фотонов, которые можно монолитно интегрировать в полупроводниковый оптический волновод.

Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут представлять интерес при разработке наноразмерных источников излучения для фотонных интегральных схем нового поколения на основе плазмонных наноантенн и создания и оптимизации параметров гибридных оптоэлектронных платформ на основе нитевидных нанокристаллов, управляемых электрическим током.

Особый интерес представляет дальнейшая оптимизация геометрии плазмонных наноантенн, исследование мультиантенной геометрии и коллективных эффектов в регулярных массивах наноструктур, а также разработка способов эффективного согласования излучения из туннельного контакта с оптическими модами планарных и нитевидных волноводов. Полученные в работе результаты могут быть использованы научными лабораториями, занимающимися исследованиями в области нанофотоники, плазмоники, сканирующей зондовой микроскопии, физики полупроводниковых наноструктур и интегральной оптоэлектроники. Алгоритмы мультиканальной обработки экспериментальных данных и высокое разрешение люминесцентных СТМ измерений при визуализации слабопроводящих нанообъектов типа GaP ННК представляют интерес для научных групп, занимающихся высокоразрешающей диагностикой локальных электронных и оптических свойств наноструктур.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в научно-исследовательских организациях и университетах, ведущих работы в области физики конденсированного состояния, нанофотоники и интегральной оптоэлектроники, включая ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Университет ИТМО, МФТИ, НИУ «МИЭТ», а также в других организациях, занимающихся разработкой наноразмерных источников излучения, полупроводниковых наноструктур и фотонных интегральных платформ.

Замечания по диссертационной работе

1. По научному положению №1. В роли широкополосного перестраиваемого источника фотонов с электрическим возбуждением в представленной работе выступает не исключительно массив золотых параболических наноантенн, но его комплекс с зондом сканирующего туннельного микроскопа. В Заключение автор формулирует этот вывод более корректно.

2. В диссертации в качестве одного из преимуществ отмечается масштабируемость метода фемтосекундной лазерной печати при изготовлении массивов наноантенн. Следовало бы проанализировать влияние неизбежного статистического разброса геометрии формируемых наноантенн на воспроизводимость предложенной технологии с точки зрения удовлетворения конкретных критериев.

3. В работе продемонстрирована возможность возбуждения и перестройки спектральных характеристик излучения наноантенн и нитевидных нанокристаллов за счет изменения

напряжения туннельного контакта в условиях сверхвысокого вакуума. Вместе с тем для реального применения подобного перспективного прибора было бы полезно исследовать возможность перехода от СТМ-конфигурации с вакуумным зазором к возбуждению источника фотонов вне дорогостоящей вакуумной камеры.

4. В GaP ННК *p*-типа автором наблюдались участки с повышенной интенсивностью сигнала, обусловленные наличием областей с псевдопрямозонной структурой, что позволило ему сделать вывод о перспективе таких МИП-структур в качестве наноразмерных электроуправляемых источников фотонов. Насколько может быть воспроизводима такая вюрцитная кристаллическая фаза при изготовлении серии образцов?

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки выполненного исследования.

Заключение

Диссертационная работа Соломонова Никиты Александровича представляет собой завершенное научное исследование, выполненное на высоком уровне и посвященное актуальной задаче современной физики конденсированного состояния, нанофотоники и оптоэлектроники. Полученные соискателем результаты характеризуются существенной научной новизной и вносят вклад в развитие физических представлений об электрон-фотонных преобразованиях в туннельных контактах и разработку источников оптического излучения для интегральной фотоники. Сформулированные в работе научные положения являются обоснованными и достоверно подтверждены совокупностью экспериментальных и теоретических данных. Основные результаты диссертации отражены в 5 публикациях в рецензируемых научных изданиях и апробированы на профильных научных конференциях. На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова РАН», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Доклад по диссертационной работе Н.А. Соломонова заслушан и обсужден 8 июля 2026 г. на научном семинаре кафедры микро- и нанoeлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». Отзыв обсужден и одобрен 10. 09. 2026 г. на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (протокол № 9/26). Присутствовало на заседании 34 чел. Результаты голосования: «за» – 34, «против» – 0, «воздержались» – 0 чел.

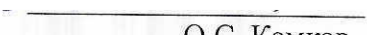
Отзыв составил профессор, доктор физ.-мат. наук,
профессор кафедры микро- и нанoeлектроники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Телефон: +7 812 2343164

Адрес электронной почты: vizubkov@etu.ru


В.И. Зубков

Заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», доктор физ.-мат. наук, доцент
Телефон: +7 812 2343164


О.С. Комков

Адрес электронной почты: oskomkov@etu.ru

Ученый секретарь кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ», кандидат физ.-мат. наук, доцент

Телефон: +7 812 2343164

Адрес электронной почты: oaaleksandrova@etu.ru

О.А. Александрова

Подписи В.И. Зубкова, О.С. Комкова, О.А. Александровой заверяю:

Ученый секретарь

диссертационных советов СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Т.Л. Русяева

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф.

Телефон: +7 (812) 234-46-51

Электронная почта: info@etu.ru

Сайт: <https://etu.ru>