



На правах рукописи

Соломонов Никита Александрович

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

Специальность 1.3.8 —
«Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2026

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук».

Научный руководитель:

Мухин Иван Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор, проректор по науке, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алферова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

Чернов Александр Игоревич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Кравцов Василий Андреевич, PhD по физике (признаваемый в РФ), область исследования соответствует научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния, ведущий научный сотрудник физического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Ведущая организация:

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

Защита диссертации состоится «01» октября 2026 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета АУ 02.01 СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбАУ РАН им. Ж. И. Алферова и на сайте университета www.srbau.ru в разделе «Диссертационный совет» - «Информация о защитах».

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А на имя ученого секретаря диссертационного совета АУ 02.01

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.



Ученый секретарь
диссертационного совета АУ 02.01
к.ф.-м.н. Шубина К. Ю.

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы исследования

Стремительное развитие генеративных нейросетей, интернета вещей, инструментов «big data» и других вычислительно ёмких приложений привело к дефициту центров обработки данных (ЦОД) и рекордному росту цен в 2023 году (по данным аналитического центра TD Cowen) [1]. В стремлении за удовлетворением спроса разросшиеся сети ЦОД к 2025 году значительно нагрузили энергетическую инфраструктуру стран, вынуждая подключать вычислительные сервера напрямую к электростанциям, вводить в эксплуатацию новые атомные энергоблоки и развивать технологию модульных ядерных реакторов только для обеспечения нужд ЦОД [2–5]. Несмотря на предпринимаемые меры, потребности в высокопроизводительных вычислениях и обработке колоссальных объемов данных продолжают расти быстрее, чем удаётся решать вопросы энергопотребления и тепловыделения [6].

В течение нескольких десятилетий одной из ключевых стратегий повышения энергоэффективности вычислений на аппаратном уровне являлась миниатюризация компонентов и оптимизация материалов транзисторов с увеличением плотности размещения на интегральных схемах (ИС). Однако с развитием промышленных полупроводниковых технологий и достижением топологической нормы 3 нм (Samsung, 2022 г.) и прогнозируемым достижением 2 нм и менее (TSMC, вторая половина 2025 года) такая стратегия вплотную приближается к технологическим и теоретическим пределам [7–9]. В связи с этим актуальной задачей научного сообщества является поиск альтернативных путей развития вычислительной техники, одним из которых является согласование электронных логических и оптических функциональных блоков на одном кристалле с разработкой вычислительных интегральных фотонных схем (ФИС), потребляющих менее пикоджоуля на бит [10].

При разработке энергоэффективных гибридных ФИС с высокой степенью упаковки встаёт ряд нерешенных технологических проблем, одной из ключевых является разработка компактных, энергоэффективных наноразмерных источ-

ников фотонов, возбуждаемых и управляемых электрическим напряжением с полной совместимостью с материалами и промышленными процессами современных ИС. Дополнительной сложностью является необходимость теплового согласования при интеграции источников рядом с электронными и фотонными компонентами, а также согласование излучения с оптическими модами волноводов, размещенных на чипе [11, 12].

Явление люминесценции при неупругом туннелировании электронов (НТЭ) через субнанометровый диэлектрический барьер в структурах металл-изолялятор-металл (МИМ) и металл-изолятор-полупроводник (МИП) позволяет создавать ультракомпактные некогерентные источники оптического излучения, возбуждаемые электрическим током с предельной степенью пространственной миниатюризации, ограниченной физически допустимым расстоянием между электродами, формирующими туннельный зазор. НТЭ источники потенциально удовлетворяют всем требованиям для ФИС нового поколения: нанометровые размеры, сверхбыстрый отклик, возможность модуляции длины волны излучения с помощью электрического напряжения [13, 14], однако при этом, в доступной для масштабирования архитектуре, источники обладают слишком низкой внешней квантовой эффективностью (ВКЭ) для практической реализации в ФИС [15].

Несмотря на экспериментальную демонстрацию принципиальной возможности достижения высоких уровней ВКЭ в НТЭ источниках фотонов на уровне нескольких процентов, за счёт реализации каскадов резонансного туннелирования электронов и размещения структур низкой размерности, такие решения, как правило, характеризуются низкой воспроизводимостью, высокой технологической сложностью и несовместимостью с современными производственными процессами, поэтому далеки от интеграции в коммерческие устройства [16–18].

В связи с этим особую актуальность приобретает исследование и разработка НТЭ источников с повышенной ВКЭ, сочетающих простоту архитектуры, технологическую совместимость с КМОП материалами и массовыми технологиями изготовления, и возможность инженерии и управления спектральными характеристиками излучения. Настоящая диссертационная работа направлена на решение данной задачи, предлагая исследовать в качестве НТЭ источников фото-

нов два типа структур с туннельным переходом: зонд сканирующего туннельного микроскопа (СТМ)-вакуум-золотые полусферические наноантенны (МИМ НТЭ источник), напечатанные технологией фемтосекундной лазерной печати (см. раздел 3), и СТМ зонд-вакуум-полупроводниковый нановолновод (МИП НТЭ источник) на основе GaP нитевидных нанокристаллов (см. раздел 4-5).

Цель

Целью диссертационной работы является исследование процессов излучения фотонов при неупругом туннелировании электронов и создание наноразмерных источников фотонов видимого и инфракрасного (ИК) спектральных диапазонов из металлических и полупроводниковых материалов, работающих на основе НТЭ эффекта, с перестраиваемой длиной волны излучения или интегрированных в оптический волновод.

Задачи

Для достижения данной цели в рамках диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Развить методику прямых мультиканальных измерений оптического сигнала из области туннельного контакта в СТМ в условиях сверхвысокого вакуума. Создать схему синхронизации сигнала детектора фотонов с СТМ измерениями и разработать специализированный программный пакет автоматизированной обработки мультиканальных данных.
2. Исследовать процессы неупругого туннелирования электронов и рождения фотонов видимого и ИК спектральных диапазонов, индуцированных в туннельном контакте с СТМ зондом, при сканировании массивов плазмонных наноантенн. Создать перестраиваемые источники оптического излучения в видимом и ИК диапазонах на основе массивов плазмонных наноструктур, изготовленных методами фемтосекундной лазерной печати.

3. Выбрать сочетание проводящих СТМ-подложек и методик подготовки образцов, а также определить оптимальные режимы туннельного контакта, обеспечивающие стабильные воспроизводимые СТМ измерения и получение карт светимости туннельного контакта (СТМ-Л) от легированных нитевидных нанокристаллов (ННК) GaP.
4. На основе туннельного контакта с легированными ННК GaP создать и исследовать наноразмерные источники излучения, управляемые электрическими сигналами и интегрированные в оптические полупроводниковые волноводы.

Методы исследования

Для успешного выполнения задач диссертационной работы экспериментальные измерения и анализ данных были выполнены с применением комплекса современных методик исследования морфологии, структурных и оптических свойств наноструктур, включающего:

- Растровую электронную микроскопию (РЭМ) и просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ), обеспечивших детальные изображения морфологии исследуемых образцов и позволивших провести анализ кристаллической структуры и фазового состава ННК с пространственным разрешением до нескольких нанометров.
- Оптическую спектроскопию рассеяния в темном поле и спектроскопию отражения с преобразованием Фурье (FTIR) для анализа собственных и коллективных оптических мод в исследуемых наноструктурах в широком диапазоне частот, охватывающем оптический и ближний ИК спектральные диапазоны, с целью сопоставления и комплексной интерпретации данных спектроскопических, СТМ-Л измерений и результатов численного моделирования.
- Спектроскопию микрофотолюминесценции (мФЛ) и спектроскопию с временным разрешением для исследования локальных спектральных и

временных характеристик оптического отклика полупроводниковых GaP ННК. Методы позволили установить различия в механизмах излучательной рекомбинации между двумя типами легированных ННК GaP:Be и GaP:Si, а также оценить время жизни оптических состояний в исследуемых структурах, что позволило более детально интерпретировать данные СТМ-Л измерений.

- Прямые оптические измерения излучения, возникающего при неупругом туннелировании электронов, возбужденного СТМ зондом (СТМ-Л), синхронизированные с записью СТМ топографии, позволили проводить пространственное картирование распределения локальной плотности оптических состояний (ЛПОС) с субдифракционным пространственным разрешением. Полученные данные СТМ-Л измерений позволили провести анализ корреляций между морфологическими особенностями исследуемых наноструктур и особенностями в пространственных распределениях ЛПОС.
- Для интерпретации экспериментальных данных применялись методы численного моделирования с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics, а также программные пакеты для статистической обработки экспериментальных данных, включая Origin и зарегистрированный программный пакет для ЭВМ (РИД №2024689814). Разработанный программный пакет обеспечивает совместную обработку мультиканальных массивов синхронизированных СТМ измерений со встроенными алгоритмами математической фильтрации и адаптирован для решения задач, поставленных в рамках данной диссертационной работы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Массив золотых параболических полых наноантенн (толщина стенки 30 нм, диаметр 520 нм, высота 265 нм, период массива 1250 нм) выступает в роли широкополосного перестраиваемого источника фотонов с электрическим

возбуждением. В таких плазмонных структурах при неупругом туннелировании электронов возбуждается излучение как в диапазоне (550–850 нм) при напряжениях туннельного контакта 2,2–2,5 В за счет возбуждения локализованных плазмонных резонансов, так и в диапазоне (1650–1870 нм) при напряжениях 0,65–0,75 В за счет возбуждения решеточных резонансов в массиве.

2. Для воспроизводимых СТМ измерений легированных ННК GaP:Si и GaP:Be в условиях сверхвысокого вакуума при комнатной температуре необходимо использовать Ni подложки и метода переноса ННК, основанного на механическом контакте исходной ростовой подложки и подложки для СТМ, что обеспечивается формированием адгезивного слоя между подложкой и ННК. Параметры туннельного контакта: напряжение смещения 7–10 В, туннельный ток не более 400 пА обеспечивает стабильную запись СТМ топографий для более чем 15 последовательных измерений.
3. Легированный ННК GaP:Be (диаметр 110 ± 5 нм, длина $4,5 \pm 0,5$ мкм) выступает в качестве нановолновода с монолитно интегрированным электроуправляемым источником фотонов, за счет того, что в GaP:Be ННК с сфалеритной фазой, обладающей непрямозонной энергетической структурой, формируется прямозонная вставка вюрцитной фазы, оптические переходы в которой могут быть возбуждены при неупругом туннелировании электронов с последующим излучением фотонов непосредственно в ННК.

Научная новизна

Впервые проведены оптические СТМ-Л измерения массивов полых золотых наноантенн, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати. Установлено, что такие плазмонные структуры при возбуждении с помощью неупругого туннелирования электронов выступают в роли широкополосных электрически возбуждаемых источников фотонов с возможностью перестройки спектра излучения посредством регулировки напряжения смещения туннельного контакта в

диапазонах 0,6–0,7 В и 2,2–2,5 В, что обеспечивает излучение в ближнем ИК 1600–1870 нм и в 550–870 нм спектральных диапазонах, соответственно.

Впервые с помощью прямых оптических измерений СТМ-Л визуализировано пространственное изменение ЛПОС с 10-нанометровым разрешением в системе двух близкорасположенных золотых наномантенн: полый полусферы ($d=520$ нм, $h=265$ нм) и наночастицы со средним диаметром 120 нм. Показано, что ближнепольное взаимодействие двух плазмонных резонаторов приводит к повышению оптического сигнала на 10–15% относительно уровня единичной наномантенны и сопровождается заметными изменениями в картинах пространственного распределения ЛПОС. Впервые проведены воспроизводимые СТМ и СТМ-Л измерения GaP ННК при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума без применения методов подготовки, модифицирующих свойства или морфологию поверхности нанокристаллов (высокотемпературных отжиг, химическое и физическое травление).

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 микроФЛ и спектроскопия с временным разрешением. Впервые установлена взаимосвязь между тонкими 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 за счёт наличия дополнительных оптических состояний, ассоциированных с межзонными переходами.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследований, выполненных в рамках данной диссертационной работы, заключается в углублении представлений о механизмах

возбуждения оптических состояний при неупругом туннелировании электронов в массивах плазмонных наноструктурах и полупроводниковых нитевидных нанокристаллах.

В диссертационной работе продемонстрирована возможность пространственного картирования ЛПОС образцов с субдифракционным разрешением путём прямой регистрации люминесценции, индуцированной неупругим туннелированием электронов в рамках методик СТМ-Л и светимости при сканирующей туннельной спектроскопии (СТС-Л). Пространственный анализ ЛПОС на наномасштабе, а также возможность устанавливать взаимосвязь между морфологическими особенностями наноструктур с пространственными распределениями ЛПОС позволяют исследовать электронно-фотонные преобразования в туннельном контакте и представляют собой универсальный инструмент для высокоразрешающей диагностики и оптимизации оптических свойств при разработке наноразмерных источников фотонов для ФИС.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в демонстрации возможности создания наноразмерных источников фотонов с электрическим типом возбуждения и управлением спектральными характеристиками излучения, реализуемых на основе неупругого туннелирования электронов и масштабируемых воспроизводимых технологий создания.

В работе экспериментально реализованы два типа источников оптического излучения, работающих за счет процессов неупругого туннелирования электронов (ЛНТЭ источников): (i) источник на основе массива полых полусферических наноантенн, изготовленных методом фемтосекундной лазерной печати на тонких металлических плёнках, и (ii) источник на основе GaP:Be ННК, в котором увеличение ЛПОС происходит за счёт псевдопрямозонных вставок вюрцитной кристаллической фазы, формирующихся в процессе роста кристалла.

Выбран материал подложек и оптимизированы методы переноса ННК на вспомогательные подложки для проведения воспроизводимых СТМ и СТМ-Л измерений полупроводниковых наноструктур.

Оба типа источников обладают потенциалом для интеграции в архитектуру ФИС и могут быть использованы при разработке оптоэлектронных компонентов нового поколения.

Достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных программных пакетов численного моделирования и проведением измерений с помощью современных экспериментальных методов на высокотехнологичном оборудовании. Надёжность сформулированных выводов подтверждается согласованностью данных, полученных с помощью различных независимых методов исследования: СТМ-Л, СТС-Л, просвечивающей электронной микроскопии, микрофотолюминесцентной (мФЛ) спектроскопии, а также спектроскопии с временным разрешением. Достоверность экспериментальных данных обеспечена статистической обработкой крупных серий многократно воспроизводимых измерений и сопоставлением с результатами численного моделирования. Интерпретация полученных результатов опирается на общепринятые физические модели, а также не противоречит результатам, опубликованным в рецензируемых источниках по смежным направлениям.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 10 всероссийских и международных конференциях:

1. 10th International School and Conference «Saint-Petersburg OPEN 2023», 23–26 мая 2023 г., Санкт-Петербург.
2. 11th International School and Conference «Saint-Petersburg OPEN 2024», 14–17 мая 2024 г., Санкт-Петербург.
3. 12th International School and Conference «Saint-Petersburg OPEN 2025», 20–23 мая 2025 г., Санкт-Петербург.

4. XXVII International Symposium «Nanophysics and Nanoelectronics», 13–16 марта 2023 г., Нижний Новгород.
5. XXVIII International Symposium «Nanophysics and Nanoelectronics», 13–16 марта 2024 г., Нижний Новгород.
6. XXIX International Symposium «Nanophysics and Nanoelectronics», 13–16 марта 2025 г., Нижний Новгород.
7. XXX International Symposium «Nanophysics and Nanoelectronics», 9–13 марта 2026 г., Нижний Новгород.
8. Международная конференция «Физика.СПб–2024», 21–25 октября 2024 г., Санкт-Петербург.
9. 4th Conference «Applications of Scanning Probe Microscopy out of Ambient Conditions», 30 мая – 1 июня 2023 г., Черногоровка.
10. 31st International Conference «Advanced Laser Technologies (ALT 2024)», 23–27 сентября 2024 г., Владивосток.

По результатам проведённых исследований был получен грант от Фонда содействия инновациям в рамках конкурса «УМНИК-Фотоника 2023» (12ГУ-ЭС18/90775 от 18.12.2023).

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в модификации экспериментальных установок для мультиканальных СТМ-Л измерений, а также в выборе и подготовке исследуемых образцов. Ключевые экспериментальные данные, положенные в основу диссертации, были получены лично автором или при его непосредственном участии. Автором выполнена обработка и интерпретация данных мультиканальных и спектроскопических измерений, включая разработку программного пакета для автоматизированной обработки СТМ-Л измерений. Автором и при его участии подготовлены основные публикации по результатам исследования,

включая статьи в рецензируемых научных журналах и доклады на конференциях различного уровня.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 научных публикациях. Из них 5 изданы в международных изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus или Web of Science. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Настоящая диссертационная работа 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 наименование.

Основное содержание работы

Во введении приведен краткий обзор современных тенденций развития вычислительной техники и проблем разработки фотонных интегральных схем. Особое внимание уделено актуальности исследований в области электроуправляемых наноразмерных источников фотонов, проводимых в рамках данной диссертационной работы. В этом разделе обоснованы цели и задачи исследований, обозначены защищаемые положения, а также сформулированы научная новизна и фундаментальная значимость полученных результатов.

В первой главе «Наноразмерные источники фотонов с электрическим возбуждением» представлен литературный обзор существующих решений для создания источников фотонов, интегрируемых на поверхности кристалла. Такие источники должны поддерживать масштабируемые технологии изготовления с высокой воспроизводимостью и быть совместимы с современными материалами и производственными линиями интегральных схем. Помимо этого, они должны обладать следующими ключевыми параметрами: наноразмерными га-

баритами, электрическим типом возбуждения с высокой скоростью отклика и возможностью перестройки спектра излучения в широком диапазоне частот.

В данном разделе подробно описаны современные направления развития источников излучения на кристалле, а также выделены физические и технологические ограничения каждого из подходов. Особое внимание уделено источникам, основанным на неупругом туннелировании электронов – механизме, потенциально удовлетворяющем всем указанным требованиям, однако ограниченном 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 на основе люминесценции при неупругом туннелировании электронов и созданию адаптивных и multifunctional ФИС.

Во второй главе «Экспериментальные методы и приборы» подробно описаны особенности измерений излучения из туннельного контакта в условиях сверхвысокого вакуума. В данном разделе приводится описание созданной экспериментальной установки, являющейся модификацией сверхвысоковакуумного СТМ. Данная установка позволяет проводить измерения СТМ-топографии и вольтамперных характеристик туннельного контакта, синхронизированных с регистрацией оптического сигнала (СТМ-Л). Такой подход обеспечивает возможность отделения неупругих процессов туннелирования электронов с излучением фотонов от неупругих неизлучательных процессов и позволяет полноценно охарактеризовать природу электронно-фотонных преобразований, происходящих в туннельном контакте. Более того, СТМ-Л измерения наноструктур позволяют получать распределения ЛПОС с субдифракционным разрешением для оптических состояний, возбуждаемых при неупругом туннелировании электронов в определенных энергетических диапазонах, определяемых напряжением смещения туннельного контакта.

Раздел содержит подробное описание режимов проведения СТМ-Л измерений, а также процесса обработки данных с использованием разработанного в рамках диссертации программного пакета для автоматизированной обработки мультимедийных данных (РИД ЭВМ №2024689814). Рассмотренные методики измерения

позволили получить полный набор согласующихся экспериментальных данных, необходимых для полноценного понимания свойств исследуемых образцов.

В третьей главе «Перестраиваемые источники оптического излучения в видимом и ИК диапазонах на основе массивов плазмонных наноструктур» представлены экспериментальные исследования наноразмерных источников излучения на основе туннельного контакта с массивом тонкостенных полусферических наномантенн, изготовленных в тонкой золотой плёнке с помощью фемтосекундной лазерной печати. Модельное представление структуры образца и РЭМ изображение поверхности представлены на рисунке 1

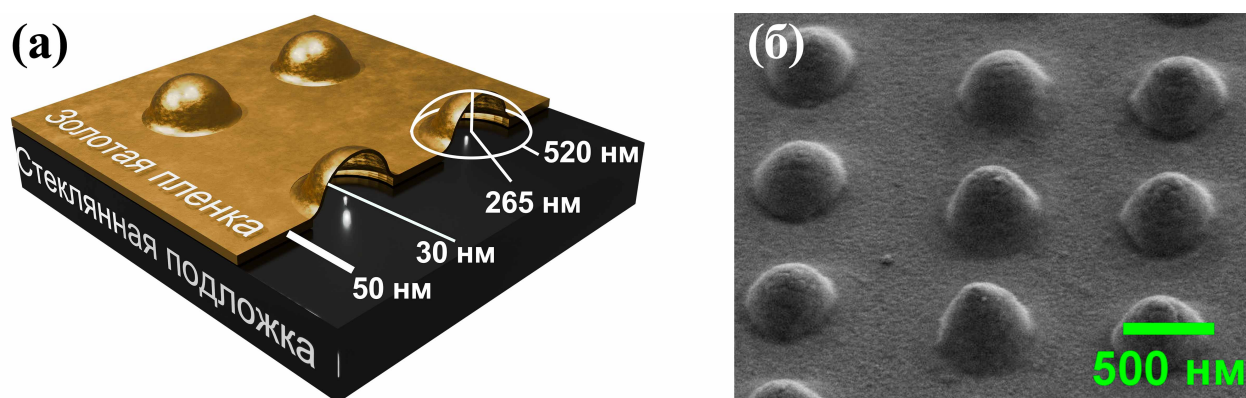


Рисунок 1 — Массив тонкостенных наномантенн, напечатанных фемтосекундной лазерной печатью на золотой плёнке: а) схема образца; б) РЭМ изображение массива наномантенн.

Для всестороннего исследования оптических свойств рассматриваемого источника был проведён сравнительный анализ экспериментальных спектроскопических измерений (ИК Фурье спектроскопия отражения и спектроскопия рассеяния в тёмном поле), результатов численного моделирования и прямых измерений оптического сигнала в рамках СТМ-Л методик. Морфология и геометрические параметры наномантенн были определены с помощью РЭМ и СТМ.

Прямые мультиманальные оптические СТМ-Л измерения позволили напрямую зарегистрировать люминесценцию из туннельного контакта, а также получить туннельные вольтамперные характеристики (СТС), отражающие энергетический спектр состояний, возбуждаемых неупругим туннелированием электронов в определенном энергетическом диапазоне. Результаты спектроскопических и СТС измерений приведены на рисунке 2.

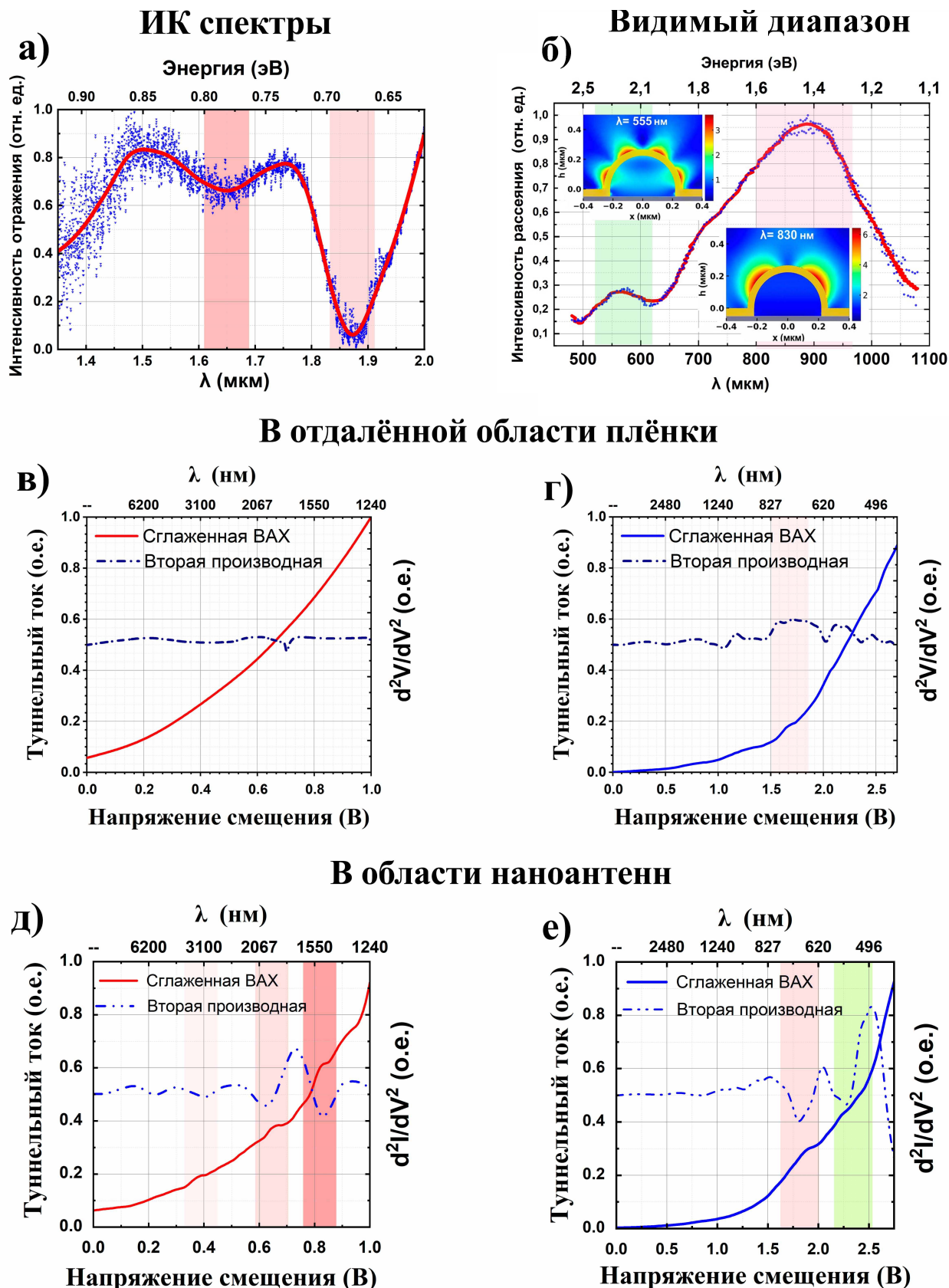


Рисунок 2 — Оптические свойства массивов золотых нанопленок: (а) ИК-Фурье спектр отражения; (б) спектр рассеяния в тёмном поле (на вставках численные результаты моделирования для соответствующих частот); (в) и (г) СТС-Л в ИК и в видимом диапазоне на золотой плёнке в отдалении от структур; (д) и (е) СТС-Л в ИК и в видимом диапазоне в области нанопленки.

На СТС кривых в зоне наноантенн и в отдаленных участках золотой поверхности отчётливо выделяются особенности при напряжениях смещения 1,5–1,7 В (отмечены красными зонами). Особенности в этом диапазоне соответствуют характерным каналам неупругого туннелирования в пленках золота. Также в видимом диапазоне для наноантенны наблюдаются дополнительные особенности при 2,25–2,5 В, что эквивалентно излучению 495–550 нм (область выделена зеленым цветом). Повышенный оптический сигнал в данном диапазоне может быть ассоциирован с неупругим туннелированием электронов с возбуждением дополнительных локализованных оптических состояний, возникающих за счёт резонансных оптических свойств наноантенн, что подтверждается результатами измерений спектров рассеяния в темном поле и численного моделирования для поперечных плазмонных мод 4-го и 2-го порядков.

Также в области наноантенн на СТС кривых наблюдаются отчётливые особенности при напряжениях 0,66 В и 0,75 В, что эквивалентно излучению с длинами волн 1,87 мкм и 1,65 мкм, соответственно. Такие особенности хорошо согласуются со спектральным положением коллективных мод, выявленных с помощью ИК-Фурье спектроскопии.

СТМ-Л измерения показали усиление оптического сигнала в области наноантенн при напряжениях смещений, соответствующих указанным особенностям (в видимом диапазоне). На рисунке 3 приведены карты пространственного распределения ЛПОС, полученные в рамках СТМ-Л измерений при напряжении 2,5 В и туннельном токе 1 нА, а также кривая СТС-Л измерений (СТС измерения, синхронизированные с регистрацией излучения) в широком диапазоне напряжений.

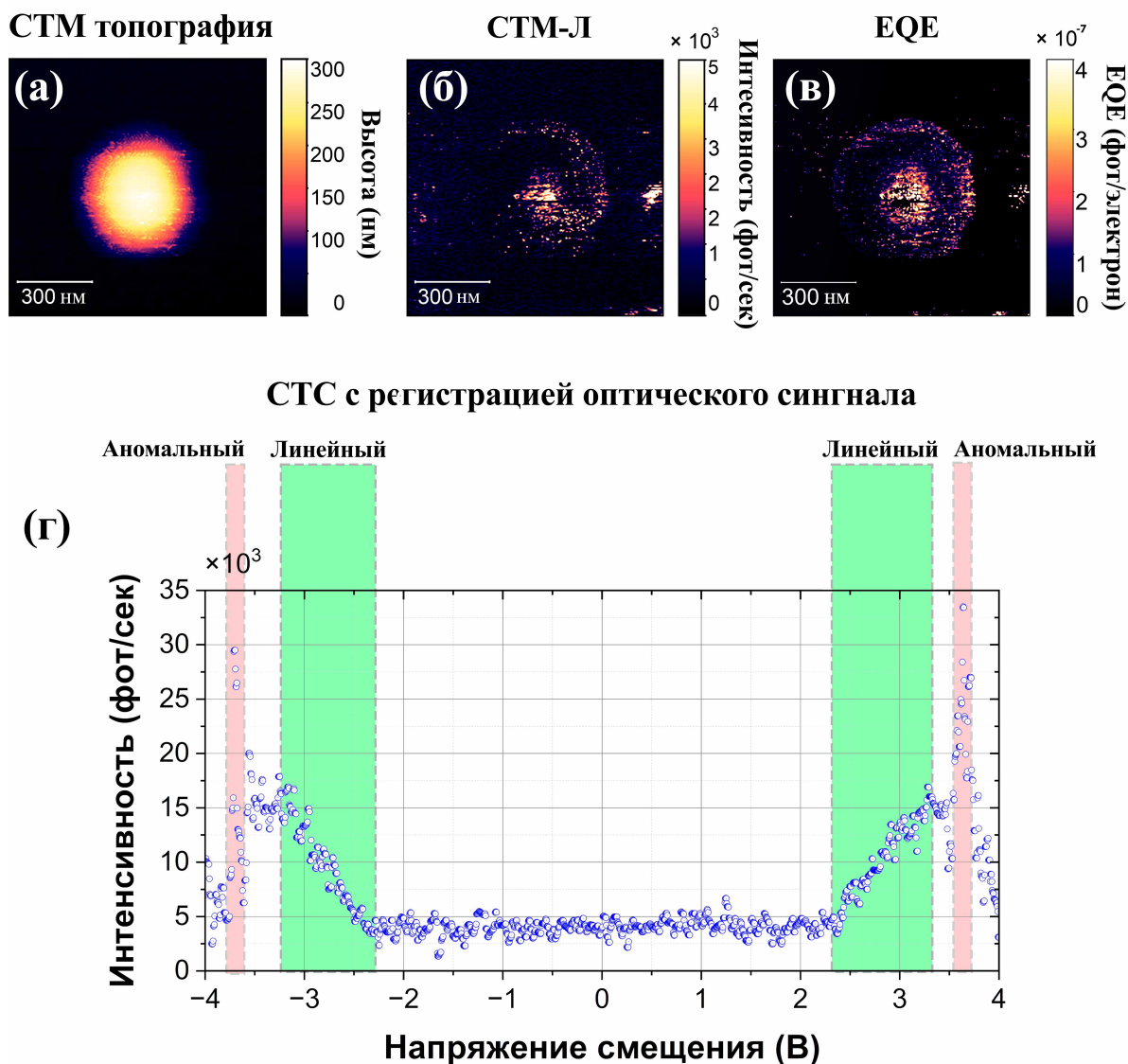


Рисунок 3 — Мультиканальные СТМ-Л карты в области наноантенны: (а) СТМ топография; (б) пространственное распределение регистрируемого оптического сигнала (ЛПОС); (в) приведенная карта внешней квантовой эффективности (СТМ-Л, разделенная на карту туннельного тока); (г) СТС данные

Помимо области с линейным ростом интенсивности излучения до 8000 фот/с при повышении напряжения с 2,2 В до 2,7 В (см. рисунок 3 (г), зеленая рамка) была обнаружена серия максимумов регистрируемого оптического сигнала в узких диапазонах напряжений при 3 В, 3,4 В и 3,6 В, выделены в красные рамки на рисунке 3 (г). В пиковых значениях при данных напряжениях смещения интенсивность оптического сигнала могла превышать уровень 30000 фот/с.

Полученные результаты демонстрируют значительное усиление люминесценции в туннельном контакте за счёт введения наноантенн, изготовленных

с помощью простой и легко масштабируемой технологии, и могут быть востребованы при разработке и улучшении наноразмерных источников фотонов с электрическим типом возбуждения для ФИС.

В данном разделе также была продемонстрирована возможность картирования люминесценции с записью пространственных распределений ЛПОС с субдифракционным разрешением (см. рисунок 3 (б-в)), что является одним из ключевых результатов диссертационной работы и способствует развитию инструментов визуализации ЛПОС, обеспечивая более глубокое понимание фундаментальных механизмов возбуждения и релаксации оптических состояний в наноструктурах.

В четвертой главе «СТМ-Л источники излучения, интегрированные в оптический волновод на основе $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ нитевидных нанокристаллов» представлен детальный анализ ключевых факторов, ограничивающих проведение воспроизводимых СТМ и СТМ-Л измерений нитевидных нанокристаллов (ННК) фосфида галлия (GaP). В разделе представлены результаты оптимизации техник подготовки ННК образцов и режимов СТМ измерений, которые позволили достичь воспроизводимого получения высококачественных топографических изображений GaP ННК р- и n-типа проводимости (легированных Be и Si, соответственно) при комнатной температуре в условиях сверхвысокого вакуума.

Воспроизводимые СТМ-измерения требуют высокой электропроводности исследуемых нанообъектов, а также стабильного туннельного контакта с их поверхностью. В то же время полупроводниковые ННК GaP покрыты слабопроводящими поверхностными оксидными слоями, что в сочетании со сравнительно низкой электропроводностью (по сравнению с типичными объектами для СТМ-исследований и объемными GaP кристаллами) значительно усложняет СТМ измерения и приводит к проявлению многочисленных артефактов при СТМ исследованиях. Данные ограничения особенно критичны при измерении СТС, поскольку запись туннельных спектров является особенно чувствительной к стабильности туннельного контакта и точному контролю его параметров.

С целью оптимизации процесса подготовки образцов были исследованы сочетания двух методик переноса GaP ННК n- и p-типов с Si ростовой подложки

(вертикальный рост кристаллов) на пять различных видов проводящих поверхностей, широко используемых в СТМ. В качестве подложек были изучены высокоориентированный пиролитический графит (HOPG), чистый монокристаллический кремний, а также кремний, покрытый тонкими металлическими плёнками из никеля, золота и оксида индия-олова (ITO). Схематические иллюстрации методик переноса и РЭМ изображения исследуемых GaP ННК приведены на рисунке 4.

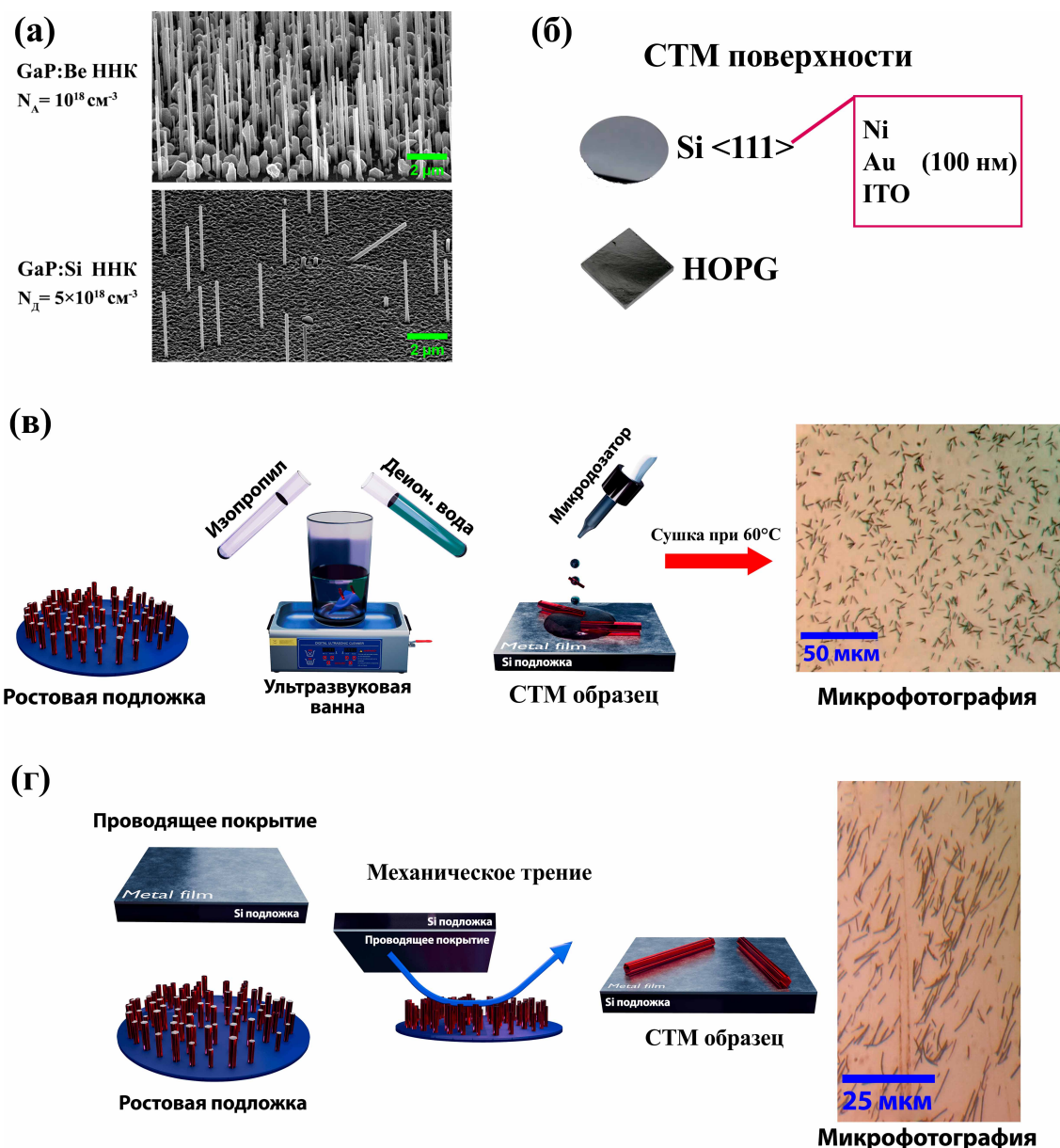


Рисунок 4 — Анализируемые методы переноса: (а, б) Типичные РЭМ изображения массивов, легированных GaP ННК и перечень используемых подложек; (в) схема метода ультразвуковой обработки; (г) схематическое изображение метода сцарапывания

Использовались три критерия качественной оценки при систематизации результатов подготовки образцов: поверхностная плотность перенесенных ННК, степень сегментации кристаллов (или степень слипания и агломерации нанокристаллов) и общая чистота поверхности (количество «мусорных» объектов на 10 неповрежденных ННК). В таблице 1 используются цвет и тип шрифта для выделения значений параметров в зависимости от их соответствия требованиям для СТМ измерений: зеленый цвет соответствует наилучшим значениям, желтый – средним, а красный указывает на значительное ограничение СТМ измерений.

Таблица 1 — Критерии оценки подготовленных СТМ образцов с ННК

Критерий отбора	СТМ подложки												НОРГ		
	Подложка кремния														
	Кремний			Золотая плёнка			Никелевая плёнка			ITO плёнка					
	Ц	У		Ц	У		Ц	У		Ц	У		Ц	У	
		ИПА	ДВ		ИПА	ДВ		ИПА	ДВ		ИПА	ДВ		ИПА	ДВ
Плотность (мкм ⁻²)	1,3	0,34	0,92	1,33	0,56	0,6	1,36	0,4	1,1	0,26	0,56	0,54	0,12*	0,32	
Сегмент./загрязн. (о.е.)	6	2,7	3,24	7,2	8,2	6	>20	3	3,06	5,7	9,5	2,7	<2,5	3,06	
Чистота (о.е.)	5	>10	<1	6	6	3	8	>10*	2	4*	>10*	4	>10	<1	

Примечание. Ц – царапание, У – ультразвук, ИПА – изопропанол, ДВ – деионизированная вода.

На основании критериев оценки была отобрана серия подложек для дальнейшей оптимизации СТМ режимов, включающая в себя образцы, сочетающие металлические плёнки и метод сцарапывания, обозначенный как (С). Исключением являются сочетание ИТО-С, поскольку такие образцы повреждаются в процессе переноса, как и образцы сочетания НОРГ-С, поскольку трение, вызванное сдвигом, приводит в основном к удалению верхних слоев графита. Также для СТМ исследований были отобраны образцы, на которых ННК были перенесены методом капельного литья. Из этой серии были исключены сочетания, в которых в качестве жидкости-носителя использовался IPA, а также образцы с чистым Si и НОРГ, поскольку из-за низкой смачиваемости поверхности при сушке перенесенных капель коллоида большая часть ННК вместе с «мусорными» объектами смещались к краям капель.

Оптимизация параметров СТМ-измерений для отобранных образцов проводилась для напряжений смещения в диапазоне от 0,5 В до 10 В с шагом 0,5 В, и

туннельного тока в диапазоне от 100 пА до 1500 пА с шагом 100 пА. Критерием выбора подложки была способность воспроизводимо получать топографию ННК в течение более чем 15 повторений, не вызывая их перемещения или проявления артефактов сканирования.

Проведенная оптимизация параметров не выявила удовлетворительных СТМ режимов для стабильной визуализации топографии ННК на подложках НОРГ или чистого кремния. Из-за слабой адгезии ННК к плоской, химически инертной поверхности НОРГ взаимодействие Pt/Ir-зонда с ННК давало лишь серию «ярких» пикселей вдоль линии сканирования для любой комбинации токов и напряжений. Оптимальные диапазоны параметров СТМ измерений были найдены для образца с ННК, перенесенными методом сцарапывания на подложку с плёнкой Ni. Было установлено, что оптимальные параметры для получения СТМ-изображений высокого разрешения для обоих типов исследуемых GaP ННК находятся в диапазоне напряжений 7–10 В, а ток туннелирования не превышает 400 пА. Использование оптимальных параметров записи позволило получить серию из более чем 15 последовательных сканов при скоростях сканирования 500–1500 нм/с с практически идентичной топографией. Типичные СТМ изображения, полученные в оптимальном режиме представлены на рисунке 5.

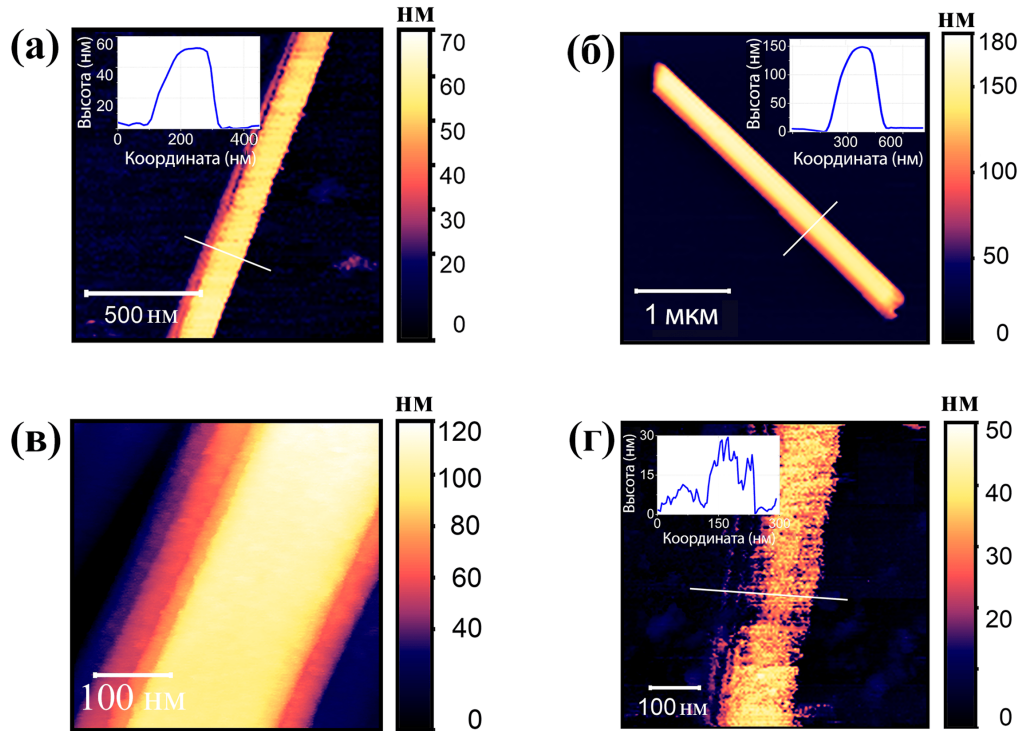


Рисунок 5 — СТМ-изображения, полученные при оптимальных настройках сканирования (7 В, 300 пА) на поверхности Ni: а) GaP:Be и б) GaP:Si ННК; в) сегмент GaP:Si с высоким разрешением г) отпечаток на подложке Ni после смещения GaP ННК

При повышенных напряжениях система обратной связи СТМ автоматически увеличивает расстояние между зондом и поверхностью образца, что приводит к снижению локального градиента электростатического поля вблизи поверхности. Это особенно критично при исследовании GaP ННК, покрытых слабопроводящими оксидными оболочками, которые подвержены воздействию поляризационных сил, возникающих при приближении зонда. В таких условиях вероятность механического отрыва ННК от подложки существенно уменьшается, обеспечивая более стабильный туннельный контакт.

Для подложек, покрытых тонкой пленкой никеля, характерно формирование проводящего слоя на границе раздела Ni–GaP, дополнительно повышающего адгезию. Это было подтверждено наличием остаточных следов, наблюдаемых на СТМ-изображениях на месте ННК после их смещения в другую область (см. рисунок 5 г). В ходе серии СТМ измерений наблюдалось множество таких следов для ННК GaP:Be и GaP:Si.

Результаты данного раздела заложили основу для дальнейших СТМ-Л измерений GaP ННК и способствуют развитию методик подготовки и исследований слабопроводящих полупроводниковых нанообъектов в СТМ.

В пятой главе «Источники излучения с электрическим управлением, интегрированные в полупроводниковые оптические нановолноводы» представлено экспериментальное исследование процессов генерации излучения, индуцированного неупругим туннелированием электронов в туннельном контакте между зондом СТМ и полупроводниковыми ННК GaP двух типов проводимости: р-типа (легирование атомами Be) и n-типа (легирование атомами Si).

При подготовке образцов и СТМ измерениях использовались оптимизированные подходы и параметры исследования, полученные в ходе предшествующих экспериментов (см. главу 4 данной работы). Проведённые СТМ-Л измерения ННК выявили принципиальные различия в областях излучения и пространственном распределении локальной плотности оптических состояний между ННК с различным типом легирования.

Для ННК GaP:Be наблюдается выраженная пространственная локализация ЛПОС, сосредоточенная преимущественно у одного из краёв кристалла. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), подобное распределение связано с наличием в структуре ННК сегментов гексагональной кристаллической фазы (вюрцит), формирующихся в ходе роста в объёме основной кубической решётки (сфалерит). Такие вюрцитные кристаллические вставки обладают псевдопрямоzonной электронной структурой и могут рассматриваться как монолитно интегрированные наноразмерные источники фотонов с межзонной электролюминесценцией, возбуждаемой неупругим туннелированием электронов.

В свою очередь для ННК GaP:Si характерно равномерное распределение оптического сигнала вдоль всей длины кристалла. Такая люминесценция обусловлена переходами с участием примесных уровней, ассоциированных с легирующими атомами кремния. Результаты СТМ-Л измерений и схематическая иллюстрация двух механизмов люминесценции приведены на рисунке 6.

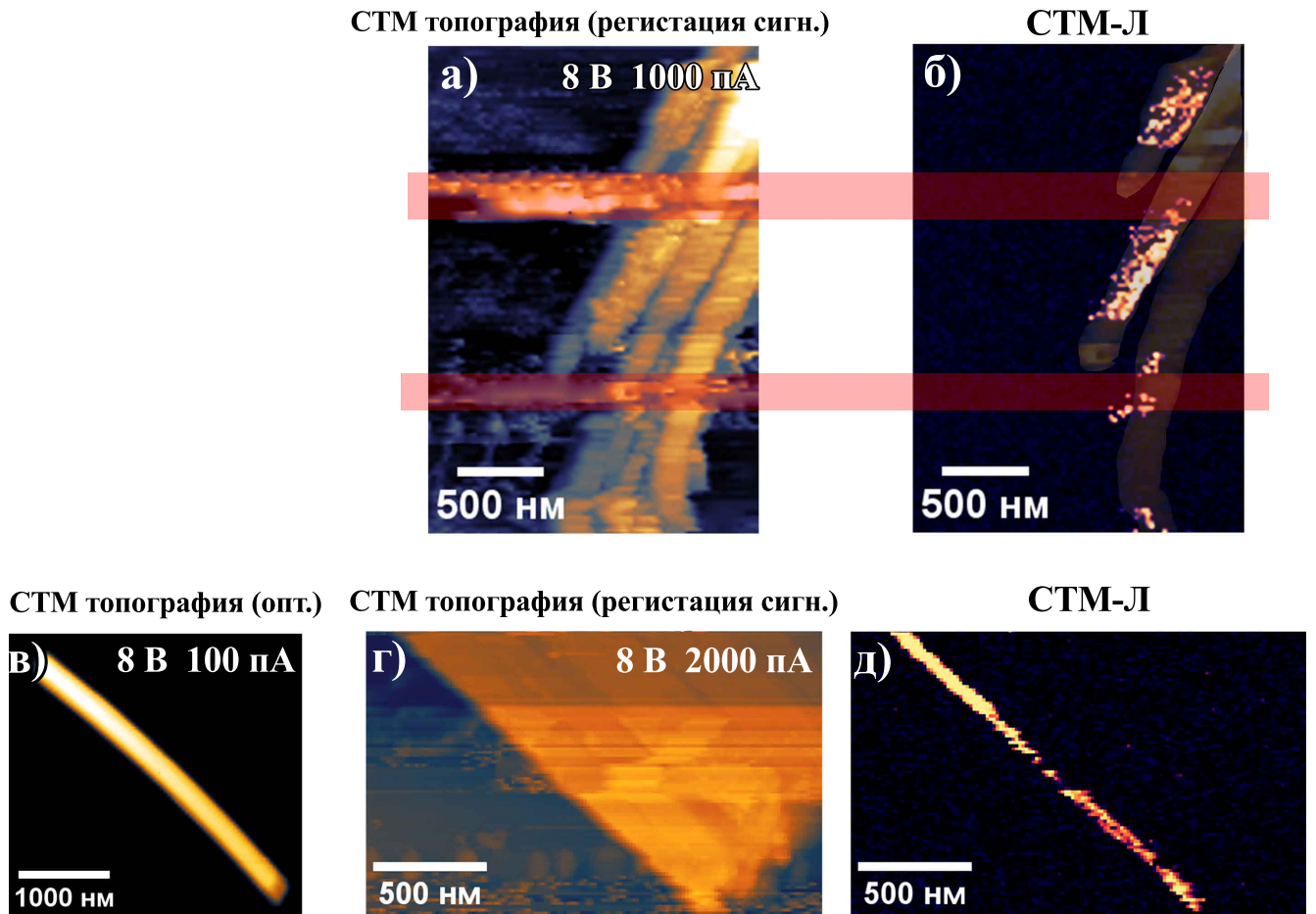


Рисунок 6 — СТМ-Л измерения одиночных (а, б) ННК GaP:Be: (а) СТМ топография в режиме регистрации оптического сигнала ($V = 8$ В, $I_{set} = 1000$ пА); (б) СТМ-Л карта. Красные зоны отмечают область нестабильного туннельного контакта; (в-д) ННК GaP:Si: (в) СТМ топография в оптимальном режиме сканирования ($V = 8$ В, $I_{set} = 100$ пА); (г) СТМ топография того же ННК в режиме регистрации оптического сигнала ($V = 8$ В, $I_{set} = 2000$ пА); (д) СТМ-Л

Для подтверждения гипотез о механизмах оптических переходов в GaP:Be и GaP:Si ННК были проведены измерения спектров микрофотолюминесценции (микроФЛ) и измерения времени жизни возбуждённых состояний с использованием импульсного пикосекундного лазера. Фотолюминесценция структур возбуждалась лазерным излучением с длинами волн 488 нм и 515 нм. Полученные спектры и временные зависимости позволяют выявить различия в механизмах генерации излучения между двумя типами исследуемых ННК. Результаты измерений приведены на рисунке 7.

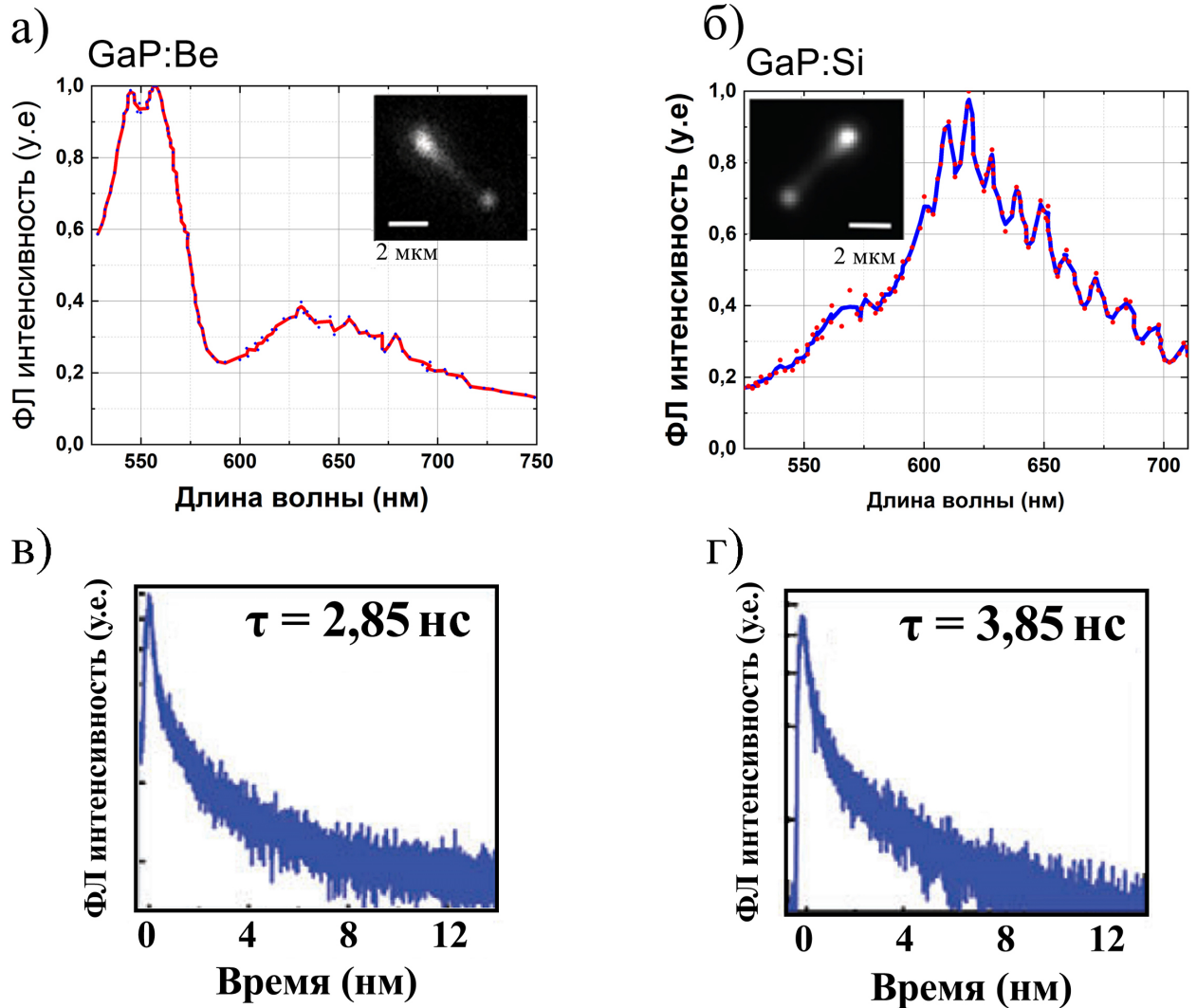


Рисунок 7 — Спектры мФЛ: (а) GaP:Be ННК; (б) GaP:Si ННК; на вставках показаны карты ФЛ при фокусировке возбуждающего излучения (длина волны 488 нм) на торец ННК. Размерные метки для оптических изображений составляют 2 мкм; Спектры с временным разрешением (в) GaP:Be ННК, (г) GaP:Si ННК.

Заметно существенное отличие спектров ФЛ-отклика и временных характеристик для ННК GaP:Si и GaP:Be. В спектрах ФЛ ННК GaP:Si, независимо от длины волны возбуждающего излучения не наблюдается коротковолнового пика, соответствующего прямозонной рекомбинации, характерной для вюрцитной фазы (рисунок 7 б). Вместо этого регистрируется широкий спектральный максимум при 630 нм, что, согласно литературным данным, может быть связано с рекомбинацией через глубокие акцепторные уровни, ассоциированные с легирующими атомами кремния [19].

По результатам спектральных ФЛ измерений GaP:Be ННК отчётливо выделяются два максимума в диапазонах 540—550 нм и 610—620 нм. Первый максимум в коротковолновой области (540—550 нм), согласно литературным данным, может быть интерпретирован как результат межзонной излучательной рекомбинации в сегментах вюрцитной фазы с псевдопрямозонной зонной структурой [20, 21]. Второй максимум, наблюдаемый в длинноволновой области (610—620 нм), может быть обусловлен переходами с участием глубоких примесных уровней, формируемых легирующими атомами бериллия.

Дополнительную информацию о природе наблюдаемой фотолюминесценции позволили получить измерения временных характеристик возбуждённых состояний. Время жизни ФЛ, измеренное для ННК GaP:Be составило 2,85 нс, возбуждение производилось в диапазоне, соответствующем переходам с участием примесных уровней бериллия. Согласно литературным данным [22], характерное время жизни излучательных переходов в стабилизированной вюрцитной фазе GaP составляет около 0,8 нс, а время жизни непрямозонной ФЛ в GaP со структурой сфалерита составляет около 254 нс. Для ННК GaP:Si зарегистрированное время жизни ФЛ составило 3,85 нс, что сопоставимо с временными характеристиками примесных переходов в GaP:Be и подтверждает примесную природу наблюдаемого излучения.

Заключение

В ходе выполнения целей диссертационной работы были проведены исследования процессов излучения фотонов при неупругом туннелировании электронов в структурах двух типов:

1. Металл-вакуум-металл (МИМ): туннельный контакт между СТМ зондом и полыми золотыми наноантеннами, изготовленными методом фемтосекундной лазерной печати, поддерживающей интеграцию в современные промышленные линии. Источник фотонов исследован в двух материальных конфигурациях PtIr/вакуум/Au и W/вакуум/Au. Структура рассматривается в качестве наноразмерного широкополосного электроуправляемого источника фотонов, для интеграции в архитектуру ФИС новых поколений.
2. Металл-вакуум-полупроводник (МИП): туннельный контакт между СТМ зондом и полупроводниковыми нановолноводами на основе GaP ННК с двумя типами легирующих атомов Si (n-тип) и Be (p-тип). Структура рассматривается в качестве наноразмерного электроуправляемого источника фотонов, монолитно интегрированного в полупроводниковый нановолновод. Волноводная сборка «источник излучения-нановолновод» на основе GaP ННК впоследствии может быть перенесена на ФИС и согласована с волноводами чипа.

В результате проведения исследований получены следующие основные результаты:

Установлено, что массивы полых золотых плазмонных наноантенн с периодом 1,5 мкм (параметры наноантенны: высота $h = 265$ нм, диаметр $d = 520$ нм, толщина стенки 30 нм), изготовленные фемтосекундной лазерной печатью, при возбуждении с помощью неупругого туннелирования электронов выступают в роли широкополосных электрически возбуждаемых источников фотонов с возможностью перестройки спектра излучения посредством регулировки напряжения смещения туннельного контакта. Установлено, что излучение такого источника возбуждается при напряжениях 2,2–2,5 В в диапазоне 550–870 нм и

при напряжениях 0,65–0,75 В в диапазоне 1600–1870 нм. Интенсивность оптического сигнала в видимом диапазоне достигает значений 8000 фот/с в областях расположения наномантенн, максимальные значения интенсивности люминесценции наблюдаются при напряжениях 2,5–2,7 В.

С помощью прямых оптических измерений СТМ-Л визуализировано пространственное изменение ЛПОС с 10-нанометровым разрешением в системе двух близкорасположенных золотых наномантенн: полой полусферы ($d = 520$ нм, $h = 265$ нм) и наночастицы со средним диаметром 120 нм. Показано, что ближне-польное взаимодействие двух плазмонных резонаторов приводит к повышению оптического сигнала на 10–15% относительно уровня единичной наномантенны и сопровождается заметными изменениями в картинах пространственного распределения ЛПОС.

Оптимизированы методики подготовки образцов и режимы сканирующей туннельной микроскопии для исследования легированных нитевидных нанокристаллов GaP в условиях сверхвысокого вакуума при комнатной температуре без применения методов подготовки, модифицирующих свойства или морфологию поверхности нанокристаллов (высокотемпературных отжиг, химическое и физическое травление). Установлено, что воспроизводимые СТМ-измерения GaP:Be и GaP:Si ННК обеспечиваются при механическом переносе нанокристаллов на подложку с плёнкой Ni. Оптимальные параметры получения СТМ-изображений высокого разрешения находятся в диапазоне напряжений 7–10 В при токе туннелирования не более 400 пА. При этих условиях получены серии из более чем 15 последовательных сканов при скоростях сканирования 500–1500 нм/с.

Экспериментально 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 микроФЛ и спектроскопия с временным

разрешением. Установлена взаимосвязь между тонкими 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 за счёт наличия дополнительных оптических состояний, ассоциированных с прямыми межзонными переходами.

Результаты, полученные в ходе исследований, выполненных в рамках диссертационной работы, могут представлять интерес при разработке наноразмерных источников излучения для ФИС новых поколений и создания и оптимизации параметров гибридных оптоэлектронных платформ на основе ННК, управляемых электрическим током.

Список публикаций по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 научных публикациях в международных изданиях, индексируемых в базе цитирования Scopus или Web of Science:

1. Lebedev D. V., Solomonov N. A., et al. Femtosecond laser-printed gold nanoantennas for electrically driven and bias-tuned nanoscale light sources operating in visible and infrared spectral ranges // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2023. Vol. 14, No. 22. P. 5134–5140. DOI: 10.1021/acs.jpcllett.3c00650.
2. Lebedev D. V., Solomonov N. A., et al. Electrically-driven light source embedded in a GaP nanowaveguide for visible-range photonics on chip // *Advanced Optical Materials*. 2024. Vol. 12, No. 25. Article 2400581. DOI: 10.1002/adom.202400581.
3. Solomonov N. A., Lebedev D. V., et al. NW-based sample preparation for ultrahigh vacuum STM imaging // *Nanotechnology*. 2025. Vol. 36, No. 19. Article 195701. DOI: 10.1088/1361-6528/adc698.
4. Solomonov N. A., et al. Luminescence enhancement in inelastic tunnelling of electrons by changing the geometry of the tunnelling contact // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2024. Vol. 17, No. 3.2. P. 236–240. DOI: 10.18721/JPM.173.247.
5. Solomonov N. A., et al. STM visualization of local density of optical states of gold nanoantennas with sub-diffraction resolution // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2025. Vol. 83, No. 3.2. P. 96–100. DOI: 10.18721/JPM.183.218.

Список литературы

1. *Moss Sebastian*. TD Cowen: Record year expected as US data center leases hit 2.1GW in 90 days due to AI boom, Data Centre Dynamics Ltd. — 2023. — URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/td-cowen-ai-demand-caused-21gw-of-us-data-center-leases-in-90-days-record-year-expected/> (online; accessed: 2025-01-17).
2. *Kearney L*. U.S. regulators mull issues around siting data centers, power plants // *Reuters*. — 2024. — URL: <https://www.reuters.com/world/us/us-regulators-mull-issues-around-siting-data-centers-power-plants-2024-11-01/> (online; accessed: 2025-01-17).
3. *Supra JD*. FERC's rejection of data center cost allocation proposal. — 2025. — URL: <https://www.jdsupra.com/legalnews/ferc-s-rejection-of-data-center-co-6989548/> (online; accessed: 2025-06-01).
4. *Kearney L*. Three Mile Island nuclear plant gears up for Big Tech re-boot // *Reuters*. — 2024. — URL: <https://www.reuters.com/business/energy/three-mile-island-nuclear-plant-gears-up-big-tech-reboot-2024-10-22/> (online; accessed: 2025-01-17).
5. Are nuclear power and SMRs the solution to data center energy woes? — 2024. — URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/nuclear-power-smr-us/> (online; accessed: 2025-01-18).
6. *А. Козлов*. Google запускает цепную реакцию: малые модульные реакторы и дата-центры. — 2025. — URL: <https://expert.ru/tekhnologii/google-zapuskaet-tsepnuyu-reaktsiyu/> (дата обращения: 2025-05-17).
7. *Salahuddin S., Ni K., Datta S*. The era of hyper-scaling in electronics // *Nature Electronics*. — 2018. — Vol. 1, no. 8. — Pp. 442–450.
8. *Samsung Electronics*. Samsung Begins Chip Production Using 3nm Process Technology With GAA Architecture. — 2022. — URL: <https://news.samsung.c>

om/global/samsung-begins-chip-production-using-3nm-process-technology-with-gaa-architecture (online; accessed: 2025-01-17).

9. *Anthony Sebastian*. TSMC's 2nm nodes get NanoFlex, N2P loses backside power delivery. — 2024. — URL: <https://www.tomshardware.com/tech-industry/tsmc-s-2nm-nodes-get-nanoflex-n2p-loses-backside-power-delivery> (online; accessed: 2025-01-17).
10. Hybrid and heterogeneous photonic integration / Paramjeet Kaur, Andreas Boes, Guanghui Ren et al. // *APL Photonics*. — 2021. — . — Vol. 6, no. 6.
11. Hybrid integrated quantum photonic circuits / A. W. Elshaari, W. H. P. Pernice, K. Srinivasan et al. // *Nature Photonics*. — 2020. — Vol. 14. — Pp. 285–298.
12. *Soref Richard*. The Past, Present, and Future of Silicon Photonics // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* — 2006. — . — Vol. 12, no. 6. — Pp. 1678–1687.
13. *Mando Rufaat et al.* The Light at the End of the Tunnel // *ACG Case Reports Journal*. — 2019. — . — Vol. 6, no. 7. — P. e00113.
14. *Shafir Dror et al.* Resolving the time when an electron exits a tunnelling barrier // *Nature*. — 2012. — . — Vol. 485. — Pp. 343–346.
15. *Muniain Unai et al.* Unified Treatment of Light Emission by Inelastic Tunneling: Interaction of Electrons and Photons beyond the Gap // *Physical Review X*. — 2024. — . — Vol. 14, no. 2. — P. 021017.
16. *Qian Haoliang et al.* Highly-efficient electrically-driven localized surface plasmon source enabled by resonant inelastic electron tunneling // *Nature Communications*. — 2021. — . — Vol. 12, no. 3111. — P. 3111.
17. *Zhang Yiyun et al.* Resonant inelastic tunneling using multiple metallic quantum wells // *Nanophotonics*. — 2023. — . — Vol. 12, no. 16. — Pp. 3313–3321.
18. *Kuzmina Anna et al.* Resonant Light Emission from Graphene/Hexagonal Boron Nitride/Graphene Tunnel Junctions // *Nano Letters*. — 2021. — . — Vol. 21, no. 19. — Pp. 8332–8339.

19. *Lorenz M. R. et al.* Luminescence from GaP containing Silicon // *J. Appl. Phys.* — 1967. — . — Vol. 38, no. 1. — Pp. 61–63.
20. *da Silva Bruno C. et al.* Optical Absorption Exhibits Pseudo-Direct Band Gap of Wurtzite Gallium Phosphide // *Sci. Rep.* — 2020. — . — Vol. 10, no. 7904. — P. 7904.
21. *Glas Frank et al.* Why Does Wurtzite Form in Nanowires of III-V Zinc Blende Semiconductors? // *Phys. Rev. Lett.* — 2007. — . — Vol. 99, no. 14. — P. 146101.
22. *Dean P. J., Ilegems M.* The optical properties of Be-, Mg- and Zn-diffused gallium phosphide // *Journal of Luminescence.* — 1971. — Vol. 4, no. 3. — Pp. 201–230.