

ОТЗЫВ

**на автореферат диссертации Соломонова Никиты Александровича
«Исследование эмиссии фотонов из туннельного контакта с оптическими
наноантеннами или полупроводниковыми волноводами при неупругом
туннелировании электронов», представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»**

Актуальность темы. Диссертационная работа Н. А. Соломонова посвящена исследованию эмиссии фотонов при неупругом туннелировании электронов (НТЭ) в туннельных контактах металл–вакуум–металл и металл–вакуум–полупроводник, а также разработке на этой основе наноразмерных электрически возбуждаемых источников фотонов. Задача создания компактных, быстродействующих и совместимых с КМОП-процессами источников излучения для фотонных интегральных схем является одной из ключевых нерешённых проблем интегральной фотоники: существующие лазерные источники на $A^{III}B^V$ материалов занимают на кристалле площади, на порядки превышающие размеры пассивных элементов и требуют сложной гетероинтеграции, тогда как НТЭ-источники обладают предельной миниатюризацией и сверхбыстрым откликом, но ограничены низкой внешней квантовой эффективностью (ВКЭ). Поиск архитектур НТЭ-источников, повышающих ВКЭ при сохранении простоты и масштабируемости изготовления, безусловно актуален как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Содержание и основные результаты работы. Автором развиты методики измерения сканирующей туннельной микроскопией (СТМ) и получения карт светимости туннельного контакта (СТМ-Л) с синхронной регистрацией топографии, туннельного тока и оптического сигнала. На базе данных методик автором получены основные результаты представленной работы:

1. Для массивов полых золотых полусферических наноантенн (диаметр 520 нм, высота 265 нм, толщина стенки 30 нм), изготовленных фемтосекундной лазерной печатью в тонкой золотой плёнке, впервые показано, что при возбуждении неупругим туннелированием электронов они выступают в роли широкополосного источника фотонов с перестройкой спектра напряжением смещения. При 2,2–2,5 В возникает излучение в диапазоне 550–870 нм, связанное с локализованными плазмонными резонансами. А при 0,65–0,75 В возникает излучение в диапазоне 1600–1870 нм, вызванное резонансами массива. Особенности на кривых сканирующей туннельной спектроскопии (СТС) сопоставлены с данными ИК-Фурье спектроскопии, спектроскопии рассеяния в тёмном поле и численного моделирования. Продemonстрировано картирование локальной плотности оптических состояний (ЛПОС) с субдифракционным (~10 нм) разрешением и зарегистрировано усиление сигнала на 10–15 % за счёт ближнепольного взаимодействия двух близкорасположенных наноантенн.

2. Для легированных нитевидных нанокристаллов (ННК) GaP:Be и GaP:Si систематически исследованы методы переноса на пять типов проводящих подложек и режимы СТМ-измерений. Это позволило впервые получить воспроизводимые СТМ- и СТМ-Л-изображения GaP ННК при комнатной температуре в сверхвысоком вакууме без отжига и травления. ННК GaP:Be предложен в качестве нановолновода с монолитно интегрированным электроуправляемым источником фотонов.

Научная новизна, достоверность и апробация. Новизна результатов не вызывает сомнений: впервые проведены СТМ-Л измерения наноантенн, напечатанных фемтосекундным лазером, впервые визуализирована ЛПОС связанной пары плазмонных резонаторов с 10-нм разрешением, впервые установлена корреляция неоднородностей светимости в GaP:Be ННК с вюрцитными вставками. Достоверность обеспечена согласованностью данных независимых методов (СТМ, СТС, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), численного моделирование в COMSOL) и статистической обработкой серий измерений. Результаты опубликованы в 5 статьях в изданиях, индексируемых Scopus/Web of Science, в том числе в The Journal of Physical Chemistry Letters, Advanced Optical Materials и Nanotechnology, доложены на 10 всероссийских и международных конференциях. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Автореферат написан ясным языком, хорошо иллюстрирован и в целом отражает содержание работы. Личный вклад автора представляется определяющим.

Замечания и вопросы. Наряду с положительной оценкой, по автореферату можно сформулировать следующие замечания и вопросы, касающиеся в первую очередь технологичности предложенных решений и проверки воспроизводимости технологии.

1. Ключевым аргументом в пользу выбранных структур является «совместимость с массовыми технологиями изготовления», однако оба исследованных источника изготовлены в конфигурации «СТМ-зонд/вакуумный зазор/образец». Из автореферата неясно, какой видится путь переноса результатов в планарный туннельный контакт с твердотельным диэлектрическим барьером и верхним электродом, и в какой мере характеристики, полученные с зондом СТМ будут сохраняться в новой геометрии. Проводились ли оценки или моделирование планарного варианта?

2. Фемтосекундная лазерная печать наноантенн заявлена как простая и легко масштабируемая технология, но в автореферате не приведены данные о разбросе геометрических параметров (диаметра, высоты, толщины стенки) по массиву и между образцами, а также о доле дефектных наноантенн. Насколько чувствительны положения плазмонных и решёточных резонансов к этому разбросу и на скольких наноантеннах и образцах воспроизведены особенности СТС при 0,66 и 0,75 В, использованные для отождествления решёточных мод?

3. Метод механического переноса ННК («сцарапывание») на Ni-плёнку является центральным технологическим результатом главы 4, однако критерии в таблице 1 носят преимущественно качественный характер. Каково число независимо

подготовленных образцов для каждой ячейки таблицы, какова доля ННК, пригодных для стабильных СТМ-измерений (выход годных) и какова воспроизводимость плотности перенесённых ННК между образцами? Учтено ли влияние естественного окисления Ni на воздухе до загрузки в сверхвысокий вакуум?

4. Образование проводящего слоя на границе Ni–GaP, повышающего адгезию, установлено косвенно по остаточным «отпечаткам» после смещения ННК (рис. 5 г). Проводилась ли прямая характеристика состава этого слоя (например, СЭМ/ПЭМ поперечного сечения)?

5. Отдельные редакционные замечания: на рис. 7 (в, г) ось времени подписана «нм» вместо «нс», а ссылка [13] («The Light at the End of the Tunnel», ACG Case Reports Journal) относится к медицинскому изданию и, по-видимому, попала в список по ошибке.

Приведённые замечания и вопросы носят преимущественно уточняющий и дискуссионный характер, отражают интерес к перспективам практического применения полученных результатов и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение. Судя по автореферату, диссертационная работа Н. А. Соломонова является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором получены новые научные результаты в области физики излучательных процессов при неупругом туннелировании электронов в плазменных и полупроводниковых наноструктурах, имеющие существенное значение для развития элементной базы фотонных интегральных схем. Работа соответствует паспорту специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» и требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, 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».

Родионов Илья Анатольевич
К.т.н., доцент, директор по науке
кластера Квантум Парк
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Бригадирский пер. д 13., стр.4
+7 (499) 263-6531

«___» сентября 2026 г.

Подпись Родионова И.А.
заверяю



ИЗ
ДЕННИ