

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный университет»



С. В. Микушев

«07» мая 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» на диссертацию Алексеева Прохора Анатольевича «Сканирующие зондовые методы исследования электронных и оптических свойств современных полупроводниковых материалов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (специальность 1.3.11. Физика полупроводников)

Актуальность работы

В диссертации исследуются актуальные полупроводниковые материалы: поверхность объёмных полупроводников и гетероструктур АЗВ5, нитевидные нанокристаллы (ННК) АЗВ5, ван-дер-ваальсовы материалы (графен, дихалькогениды переходных металлов). Воздействие воздушной атмосферы на поверхность АЗВ5 приводит к образованию поверхностного собственного оксида и росту плотности поверхностных электронных состояний, что ухудшает характеристики полупроводниковых приборов. В случае ННК, с высоким соотношением поверхность/объём влияние воздушной атмосферы является доминирующим и определяет электронные свойства всего ННК. Для создания электронных приборов на основе ННК необходимо развитие методов наномасштабной диагностики и последующего исследования электронных свойств ННК в различных условиях. В ван-дер-ваальсовых материалах, вследствие относительно малого срока их исследования, влияние воздушной атмосферы практически не изучено. Также практически не развиты методы литографии для создания полупроводниковых приборов на их основе. Таким образом, развитие сканирующих зондовых методов для исследования и литографии ННК АЗВ5, а также ван-дер-ваальсовых материалов является актуальным.

Новизна исследования и полученных результатов

Представленные в диссертации результаты являются новыми. Можно выделить следующий результаты, обладающие несомненной новизной:

- Впервые продемонстрировано создание устойчивого электрического контакта к любой заданной точке поверхности вертикального полупроводникового ННК с помощью зонда атомно-силового микроскопа и контролем деформации ННК, что позволяет исследовать электронные и электромеханические явления в ННК..
- Предложено универсальное объяснение природы поверхностных состояний в A3As и A3Sb полупроводниках со слоем естественного оксида, указывающее на сформированный поверхностный (As или Sb) слой как источник поверхностных состояний. Предложено развитие модели эффективной работы выхода, учитывающее электронные свойства слоя в зависимости от его кристаллической структуры и позволяющее объяснить зависимость работы выхода полупроводника от уровня легирования различной степенью экранирования поверхностным слоем.
- Показана возможность формирования кристаллических квази-ван-дер-ваальсовых слоёв Sb и AsSb при локальном фотоокислении поверхности (100) кристаллов GaSb и GaAsSb, соответственно.
- Показана возможность управления спектром фотолюминесценции путём изменения размеров дисковых резонаторов на основе двойных гетероструктур из объёмных дихалькогенидов переходных металлов, в которые внедрены гетерослой.

Достоверность

Выводы о достоверности полученных результатов обоснованы согласованием результатов численного моделирования, и экспериментальных измерений независимыми методами на современном оборудовании.

Представленные в диссертационной работе результаты опубликованы в 53 работах, 52 из которых индексируются в международных базах данных Web of Science и Scopus. Результаты прошли апробацию на множестве международных и всероссийских конференций и семинаров.

Научная и практическая значимость

Можно выделить несколько направлений впервые предложенных и развитых в диссертации, обладающих высокой научной значимостью.

1. Предложены и развиты методы исследования электронных и электромеханических свойств одиночных ННК с помощью проводящей атомно-силовой микроскопии. Разработан метод определения концентрации и подвижности носителей заряда в ННК.
2. Выявлено влияние упругих деформаций на электронные свойства ростового контакта GaAs ННК/ Si подложка.
3. Исследована сложная структура поверхностных оксидов в A3As и A3Sb полупроводниках. На основе полученных экспериментальных данных разработана

улучшенная модель эффективной работы выхода, позволяющая предсказывать положение поверхностного закрепления уровня Ферми на поверхности с собственным оксидом в зависимости от уровня легирования полупроводника.

4. В малослойных структурах из дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) обнаружено комплексное влияние разности работ выхода структуры и проводящей подложки на электронные и оптические свойства ДПМ, а также их химическую стабильность.

Диссертационная работа обладает высокой практической значимостью:

1. Развита метод механической сканирующей зондовой литографии и разработан метод фрикционной сканирующей зондовой литографии для ван-дер-ваальсовых материалов. Продемонстрирована возможность создания нанопотонных структур из широкого класса полупроводниковых материалов данными методами.

2. Разработана и исследована нитридная химическая пассивация GaAs ННК. Исследовано влияние интенсивного оптического излучения на стабильность пассивирующих покрытий, что важно для создания солнечных элементов.

3. Предложен тензорезистор на основе InGaAs ННК с коэффициентом тензочувствительности достигающим 6500.

Также следует отметить детальные и подробные рекомендации по исследованию полупроводниковых материалов методами сканирующей зондовой микроскопии, представленные в Главе 2.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы Алексева П.А. могут быть использованы при диагностике и разработке электронных полупроводниковых приборов на основе наноструктур АЗВ5. Разработанные методы сканирующей зондовой литографии могут быть использованы для создания элементов нанопотонных схем и светоизлучающих устройств из галогенидных перовскитов и ван-дер-ваальсовых материалов.

Полученные результаты и выводы представляются полезными для образовательного процесса и научных исследований в Академическом университете им. Ж. И. Алфёрова (г. Санкт-Петербург), Университете ИТМО (г. Санкт-Петербург), Санкт-Петербургском электротехническом университете «ЛЭТИ» (г. Санкт-Петербург), Московском физико-техническом институте (г. Москва) и Нижегородском государственном университете (г. Нижний Новгород), а также в организация Российской академии наук: Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), Институте прикладной физики (г. Нижний Новгород).

Также диссертационная работа представляет интерес для организаций, производящих полупроводниковые приборы на основе соединений АЗВ5. К таким организациям относятся ООО «Коннектор Оптикс» (г. Санкт-Петербург), АО «Светлана Рост» (г. Санкт-Петербург) и АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха» (г. Москва).

Замечания по работе

1. В работе используется термин нанопровод (НП), однако в Российской литературе термин нитевидный нанокристалл (ННК) является общеупотребимым.
2. В работе анализируются ВАХ GaAs и GaP ННК, измеренные с помощью проводящей атомно-силовой микроскопии, а также ВАХ, измеренные с помощью контактов к горизонтальному GaP ННК. Почему в диссертации не представлены ВАХ от GaAs ННК, измеренные с помощью контактов, созданных к горизонтальному ННК? При этом, такие ВАХ представлены в работе [A44]. Сравнение ВАХ, полученных двумя методами, позволило бы более однозначно сделать выводы о преимуществах метода проводящей АСМ.
3. На Рисунке 3.13 диссертации представлены расчётный и экспериментальный спектры пропускания InGaS₃ волновода. Оба спектра имеют выраженный шум. Какова причина шума в расчётных спектрах и как он был получен?
4. Диссертация содержит существенное количество синтаксических и стилистических ошибок.

Заключение

Диссертационное исследование Алексева Прохора Анатольевича «Сканирующие зондовые методы исследования электронных и оптических свойств современных полупроводниковых материалов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи. Работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук и рекомендуется к защите по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

Диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям. П.А. Алексеев заслуживает присвоения учёной степени

доктора физико-математических наук по специальности **1.3.11. Физика полупроводников.**

Диссертация Алексева Прохора Анатольевича «Сканирующие зондовые методы исследования электронных и оптических свойств современных полупроводниковых материалов» рассмотрена и обсуждена на совместном научном семинаре кафедры Физики твердого тела и лаборатории Оптики спина имени И.Н. Уральцева Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» 05 мая 2026 г. (в обсуждении приняли участие 19 специалистов, в том числе 11 кандидатов и 8 докторов наук).

Отзыв подготовлен руководителем лаборатории Физики полупроводниковых наноструктур Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», доктором физико-математических наук, профессором кафедры Физики твердого тела Дубровским Владимиром Германовичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на совместном научном семинаре кафедры Физики твердого тела и лаборатории Оптики спина имени И.Н. Уральцев Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», протокол № 44/12/15-02-4 от 05 мая 2026 года.

Заведующий кафедрой Физики твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»,
доктор физико-математических наук

С.Ю. Вербин

Руководитель лаборатории Оптики спина имени И.Н. Уральцева Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»,
доктор физико-математических наук

А.В. Кавокин

Профессор кафедры Физики твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»,
доктор физико-математических наук

В.Г. Дубровский

Личную подпись С.Ю. Вербина, А.В. Кавокина, В.Г. Дубровского заверяю И.О. начальника отдела кадров №3 И.И. Константинова
--



Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Адрес: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7-9.

Телефон (812) 328-97-01

E-mail: spbu@spbu.ru

Web-сайт организации: <https://spbu.ru/>.