

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Алексева 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. В работе исследуются современные полупроводниковые наноструктуры A3B5, а также ван-дер-ваальсовы материалы: графен и дихалькогениды переходных металлов. На момент начала представленных исследований A3B5 нанопроводов (НП), в мировой науке стояла задача использования уникальных электронных и оптических свойств нанопроводов, и создания соответствующих приборов и устройств. Влияние воздушной атмосферы на электронные и оптические свойства нанопроводов было слабо изучено. Кроме того, не был разработан доступный метод исследования электронных свойств одиночных НП, растущих на подложке. Решение данных проблем, представленное в диссертации, является актуальным. Влияние воздушной атмосферы на поверхность A3B5 полупроводников активно исследовалось в последние несколько десятилетий, однако отсутствие моделей, удовлетворительно описывающих растущий массив экспериментальных результатов, делает задачу исследования поверхностных электронных состояний на поверхности A3B5 со слоем собственного оксида актуальной.

В последнее десятилетие наблюдается взрывной рост количества публикаций, посвящённых исследованию оптических и электронных свойств ван-дер-ваальсовых материалов. Представленные в диссертационной работе исследования ван-дер-ваальсовых материалов, а также метод создания наноструктур на их основе с помощью зондовой литографии являются актуальными.

Новизна и достоверность. В диссертационной работе продемонстрированы следующие принципиально новые научные результаты:

1. Продемонстрирована возможность создания устойчивого электрического контакта к любой заданной точке поверхности вертикального полупроводникового нанопровода с помощью зонда атомно-силового микроскопа и контролем деформации НП, что позволяет исследовать электронные и электромеханические явления в нанопроводах.
2. Исследована структура собственного оксида НП GaAs в зависимости от интенсивности фотоокисления и кристаллической решётки GaAs. Выявлено формирование поверхностного двойного As и GaO_x слоя, обладающего фотолуминесценцией в области 1.7-1.8 эВ. Увеличение интенсивности фотоокисления приводит к формированию нанокристаллов β-Ga₂O₃ на поверхности ZB областей GaAs и в объёме WZ областей GaAs, а также частичному удалению As.
3. 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.

4. Показана возможность формирования кристаллических квази-ван-дер-ваальсовых слоёв Sb и AsSb при локальном фотоокислении поверхности (100) кристаллов GaSb и GaAsSb, соответственно.

5. Показано комбинированное влияние огранки пирамиды АСМ зонда и анизотропии механических свойств ван-дер-ваальсовых материалов на форму канавки, образующуюся при разрезании материала зондом.

6. Показана возможность управления спектром фотолюминесценции путём изменения размеров дисковых резонаторов на основе двойных гетероструктур из объёмных дихалькогенидов переходных металлов, в которые внедрены гетерослои.

Достоверность представленных в диссертации исследований подтверждается комплексным экспериментальным и теоретическим характером исследования. Экспериментальная часть исследования выполнена на современном исследовательском оборудовании.

Апробация диссертации проведена на десятках международных и всероссийских конференций, в том числе Nanostructures: Physics and Technology, «Нанофизика и наноэлектроника», Российская конференция по физике полупроводников, Nanowires Week, ICMAT (Сингапур), Metanano и др. Результаты работы опубликованы в 53 работах, из них более 20 входит в журналы Q1 международных баз данных Scopus и Web of Science.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Диссертация содержит Введение, Заключение и 6 Глав. Во Введении представлены Цели и задачи исследования, а также представлены защищаемые Научные Положения. В шести главах последовательно представлены результаты исследований, раскрывающие суть диссертации и защищаемых научных положений. Представленные исследования не вызывают сомнений, изложены ясно и последовательно, что обеспечило высокую обоснованность сформулированных научных положений. В Заключении диссертационной работы, а также в конце каждой Главы представлены соответствующие Выводы и Рекомендации, обоснованность которых также не вызывает сомнений.

Научная и практическая значимость.

1. Разработаны методы и подходы по исследованию электронных, электромеханических и оптомеханических свойств одиночных полупроводниковых нанопроводов с применением сканирующего зондового микроскопа. Показано, что подвижность носителей заряда в GaAs нанопроводах, растущих на подложке, на несколько порядков меньше, чем в объёмном материале. Продемонстрирована возможность создания тензорезисторов на базе InGaAs нанопроводов с коэффициентом тензочувствительности достигающим 6500.

2. Разработаны методы сканирующей зондовой литографии по созданию наноструктур из ван-дер-ваальсовых материалов с латеральным разрешением до 20 нм. Продемонстрирован способ очистки поверхности и интерфейсов ван-дер-ваальсовых гетероструктур с помощью сканирующего зондового выглаживания. Продемонстрирована возможность создания областей квазинезависимых монослоёв дихалькогенидов переходных металлов в многослойных флейках методом локального анодного окисления.
3. Выявлен значимый вклад упругих деформаций, возникающих при росте нанопроводов GaAs на подложке Si в электронные и оптоэлектронные процессы.
4. Определена зависимость работы выхода MoSe_2 от количества монослоёв в кристалле. Выявлена взаимосвязь разности работ выхода между MoSe_2 и проводящей подложкой, и интенсивностью экситонной фотолюминесценции, а также структурной фотодеградацией MoSe_2 в атмосферных условиях. При увеличении разности работ выхода происходит снижение интенсивности фотолюминесценции с увеличением скорости фотоокисления MoSe_2 при наличии на поверхности плёнки воды.
5. Усовершенствована модель эффективной работы выхода, позволяющая определить положение закрепления уровня Ферми на поверхности A_3As и A_3Sb полупроводников со слоем естественного оксида, а также предсказывающая высоту барьера Шоттки при создании электрического контакта.
6. Исследованы различные виды пассивации поверхности GaAs нанопроводов. Определена стабильность пассивирующих покрытий в атмосферных условиях и при интенсивном оптическом воздействии.

Замечания.

1. В Главе 4.1, посвященной закреплению уровня Ферми на поверхности полупроводников A_{III}As и A_{III}Sb не приводятся зонные диаграммы, показывающие изгиб зон вблизи поверхности. Между тем, их представление позволило бы точнее понять эффекты накопления заряда и изгиба зон в приповерхностном слое.
2. При развитии усовершенствованной модели работы выхода в главе 4.2.1 автор использует моделирование в пакете Silvaco Atlas, где для описания равновесной зонной диаграммы добавляет к объемному полупроводнику тонкий поверхностный слой кристаллического или аморфного строения. При этом выбор между кристаллическостью и аморфностью является типом подгоночного параметра, равно как и концентрация носителей в приповерхностном слое. В предположении о большой концентрации носителей в аморфных As и Sb естественно получается результат о том, что объемный полупроводник «заэкранирован» поверхностью. И работа выхода, естественно, определяется поверхностным слоем. Неясно в этом случае, в чем состоит ценность выполненного моделирования. Фактически, заложенные в модель начальные данные дали очевидный результат.
3. Представляется странным, что на протяжении всех глав, развивающих теорию поверхностных состояний, автор не указывает, являются ли эти состояния донорными или акцепторными (или в каком диапазоне энергий они являются донорными, а в каком -

акцепторными). Вероятно, некое предположение о зарядовом типе состояний используется в выполненном моделировании, но его важно было бы конкретизировать в диссертации.

4. В разделе 6.3.1, на рисунке 6.17 показано сравнение измеренной фотолюминесценции из микродискового резонатора на основе MoSe_2 с результатом модельного расчета спектра рассеяния при определенном угле падения и определенной числовой апертуре сбора излучения. Теория недостаточно хорошо воспроизводит эксперимент – форма и положение пиков в теории и эксперименте сильно отличаются. Между тем, существуют достоверные численные методы для подтверждения Парселловской природы усиления фотолюминесценции. Методы основаны на расчете собственных мод резонатора с последующим подсчетом локальной плотности оптических состояний – меры эффекта Парселла. Предположительно, использование такого численного метода позволит сразу описать интенсивность люминесценции на рис. 6.17 а.

Указанные замечания не умаляют общего высокого уровня работы и не подвергают сомнению основные защищаемые положения.

Диссертационная работа П.А. Алексева является законченным и оригинальным исследованием. На основании выполненных исследований разработаны научные положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям. П.А. Алексеев безусловно заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности **1.3.11 – физика полупроводников.**

Отзыв составил

Свинцов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,

заведующий лабораторией оптоэлектроники двумерных материалов

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

www.mipt.ru

e-mail svintcov.da@mipt.ru, телефон +79267108491

05 мая 2026 г.

Подпись Свинцова Д.А. заверил



ВЕРЯЮ
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УЧЕНОГО СОВЕТА ФТИ
ЕГ ЕВСЕЕВ