

## **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).**

Рецензируемая диссертация посвящена экспериментальному исследованию оптических и электронных свойств полупроводниковых материалов и наноструктур преимущественно методами сканирующей зондовой микроскопии. Несмотря на то, что физика гетероструктур и нитевидных нанокристаллов АЗВ5, графена и дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) уже много лет интенсивно развиваются экспериментаторами и теоретиками во всем мире, интерес к ней продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Научная проблема, решаемая в диссертации, возникла из необходимости исследования электронных свойств вертикальных полупроводниковых нанопроводов (НП). Наиболее адекватными методами решения поставленных задач оказались зондовые, в частности, метод проводящего АСМ. Усовершенствование метода СЗМ позволило выявить особенности контактных и поверхностных явлений в полупроводниках АЗВ5 и установить доминирующую роль поверхностных электронных явлений в АЗАс НП вследствие высокой плотности поверхностных состояний. Применение комбинации методов электронного, структурного и химического анализа позволило выявить универсальную природу поверхностных состояний в арсенидах и антимонидах. Решение этой задачи позволило продвинуться в изучении электромеханических и оптомеханических явлений, а также развить различные способы пассивации поверхности.

Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы, специально посвященные различным процессам в полупроводниковых наноструктурах. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение НП позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для создания принципиально новых типов полупроводниковых приборов и стимулирует развитие новых технологий.

Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно является **актуальной**, а поскольку физико-химические и электронные свойства полупроводниковых наноструктур и, в частности, НП изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из **введения, шести глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований. В **первой главе** представлен литературный обзор, посвященный современным полупроводниковым материалам, исследуемым в работе. Основной упор сделан на электронные и оптические явления, наблюдаемые при исследованиях в комнатных условиях и обусловленные влиянием кислорода и атмосферной воды, поскольку такие явления имеют прямое воздействие на полупроводниковые приборные структуры.

**Первая** глава посвящена сканирующим зондовым методам исследования и особенностям их применения в изучении полупроводниковых материалов. Представлен как литературный обзор, поясняющий базовые принципы отдельных методик, так и оригинальные исследования раскрывающие особенности применения зондовых методов, а также являющиеся усовершенствованием базовых возможностей. Ключевой особенностью проблемы высокой плотности поверхностных состояний в полупроводниках АЗВ5 является её физико-химический характер. Для ее решения необходимо учитывать химические процессы, происходящие при формировании естественного оксида. Эти же процессы необходимо учитывать при исследовании электронных и оптических свойств ДПМ в атмосферных условиях. Приведен обзор электронных и оптических свойств ДПМ выделены их уникальные оптические свойства: высокий показатель преломления, большая энергия связи экситона, а также зависимость зонной структуры от количества слоёв.

**Вторая** глава посвящена сканирующим зондовым методам исследования и особенностям их применения в изучении полупроводниковых материалов, представленных в первой главе. Представлены оригинальные исследования раскрывающие особенности применения зондовых методов, а также являющиеся усовершенствованием базовых возможностей коммерческих микроскопов. Показана возможность роста НП с распределением примеси, соответствующим как биполярному, так и полевому транзистору с управляющим р-п переходом. На

горизонтальных GaAs НП с различным пространственным распределением p-n легирования, показана возможность определения распределения легирующей примеси с суб-100 нм пространственным разрешением. Выявлена возможность управления распределением легирующей примеси в НП с помощью выбора степени разориентации ростовой подложки. Разработана методика по исследованию электронных свойств одиночных вертикальных НП.

**В третьей** главе представлены оригинальные результаты, демонстрирующие развитие методов сканирующей безмасочной литографии современных полупроводниковых материалов. Приведены результаты применения сканирующей зондовой литографии: силовой зондовой литографии или механической зондовой литографии, локального анодного окисления (ЛАО). Представлены результаты использования метода сканирующего зондового выглаживания монослоёв ДПМ. Помимо СЗЛ также представлены результаты сканирующего лазерного фотоокисления поверхности полупроводников. На примере GaAs показано, что удаление материала при движении зонда с нажимом на поверхность зависит от направления движения зонда и формы кончика зонда. Наибольшее удаление материала (глубина и ширина) происходит при движении вперёд в направлении, перпендикулярном грани острия с наибольшей площадью. Полученные результаты демонстрируют потенциальную высокую практическую значимость, поскольку демонстрируют подход к прототипированию нанофотонных структур из современных полупроводниковых материалов произвольного химического состава, для которых методы масочной литографии ещё не разработаны. Созданы графеновые микроленты на которых наблюдался модифицированный спектр терагерцового отклика, по сравнению с исходной поверхностью графена.

**В четвёртой** главе исследовались электронные явления на окисленных поверхностях. Выявлен единый механизм закрепления уровня Ферми на поверхности AlAs и AlSb полупроводников со слоем естественного оксида, соответствующий модели ЭРВ. Сделан вывод о том, что образование слоёв V-группы на поверхности полупроводника при окислении приводит к закреплению уровня Ферми на поверхности. Показано, что при приложении обратного смещения к диодной структуре протекание тока по поверхности может приводить к реакции локального анодного окисления в области выхода на поверхность p-n и гетероперехода. На примере поверхности скола

диода p-GaAs/n-AlGaAs обнаружено локальное увеличение толщины поверхностного оксида при приложении обратного напряжения

В **пятой главе** представлена модель позволяющая воспроизводить экспериментальные ВАХ в зависимости от электронных свойств объёма и поверхности НП, а также контактов к НП. Исследовано влияние различных видов пассивации на электронные и оптические свойства НП GaAs. Определены значения деформационных потенциалов для сдвига фононных мод при изгибе НП GaP. Исследовано влияние внутренних и внешних деформаций на электронные и фотоэлектронные свойства GaAs НП. Эксперименты по одноосному сжатию НП с помощью АСМ кантилевера, подкреплённые численным моделированием показали уменьшение эффективности солнечного элемента зонд - p-GaAs НП - p-Si подложка при одноосном сжатии. Исследована пьезоэлектрическая генерация в GaAs и InP НП. Разработанные экспериментальные и теоретические подходы позволили исследовать особенности легирования GaP НП, выращенных на Si подложках. Показана возможность получения GaP с высокой концентрацией дырок при Be легировании и электронов при легировании Si примесью. Исследованы электронные и оптические явления в ДПМ. Показана стабильность всех пассивирующих покрытий при хранении НП в атмосферных условиях, за исключением сульфидной пассивации. Нитридная (GaN) пассивация увеличивает интенсивность ФЛ в 6 раз.

В **шестой главе** представлены результаты исследований дихалькогенидов переходных металлов. Определена зависимость работы выхода MoSe<sub>2</sub> и WSe<sub>2</sub> в зависимости от количества монослоёв. Интересным отметить, что с увеличением количества слоёв работа выхода нелинейно возрастает на ~150 мэВ для пяти слоёв и выходит на значение объёмного материала. Разработан метод по исследованию локальных оптомеханических свойств ДПМ. Продемонстрированы способы увеличения интенсивности ФЛ объёмных непрямозонных ДПМ и показана возможность усиления непрямозонной ФЛ в многослойных ДПМ. В спектрах ФЛ вблизи краёв микродисков в спектрах экситонной ФЛ изучены узкие спектральные особенности, соответствующие модам шепчущей галереи.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность принципиально новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны инициируют проведение последующих

экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что развитые автором диссертации методики, совокупность полученных с их использованием результатов, а также сделанные на основе этих результатов выводы, значительно расширяют существующие представления оптических и электронных свойствах полупроводниковых материалов и наноструктур и являются новым, существенным вкладом в физику полупроводников. Усовершенствованные и развитые методики проводящего АСМ уже используются во многих лабораториях, а по результатам проводимых исследований созданы предпосылки для разработки оптических устройств. Все это, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

**1.** Основное замечание касается развития модели эффективной работы выхода (ЭРВ), а также универсальной модели поверхностных состояний, связанных с образованием слоя элемента V-группы на границе с кристаллом при окислении поверхности. В диссертационной работе энергетическое положение закрепления уровня Ферми на поверхности определялось из измерения разности работ выхода и, в конечном итоге, соответствовало работе выхода изучаемого образца. Для полупроводниковых материалов, изучаемых сколом на воздухе, очевидно, процесс окисления идет во времени, что приводит к изменению работы выхода. При этом в изменение работы выхода вносят два параметра: изгиб зон, формирующийся в результате захвата заряда на поверхностные состояния (ПС) – макродиполь, и сродство к электрону, изменение которого происходит вследствие формирования «микро»диполей. Закрепление уровня Ферми относительно краев зон (проводимости и валентной) происходит мгновенно в условиях проведения эксперимента, тогда как формирование дипольного слоя с последующим гетеропереходом может длиться часы, сутки и года. Последнее означает, что работа выхода на поверхности образца может изменяться в течение долгого времени, тогда как положение уровня Ферми на поверхности (интерфейсе) относительно краев зон закреплено и не меняется со временем. И этому в диссертации есть прямое подтверждение на странице 168: «В большинстве случаев абсолютные значения работы выхода составляли  $\sim 4.8$  эВ для АЗAs, однако в некоторые экспериментальные сессии они могли составлять 4.5 эВ и даже 4.3 эВ.»

Из ранних работ по изучению границы раздела полупроводников АЗВ5 с собственными оксидами известно, что оксиды пятой группы (мышьяка) являются

нестабильными и происходит их постепенное превращение с образованием V элемента (мышьяка) на границе раздела. Соответственно возникают вопросы к скорости формирования слоя элементов пятой группы, толщине, однородности этого слоя и соотношением с измеряемой работой выхода. Также, в связи с этим вопрос, можно ли использовать абсолютные значения работ выхода элементарных соединений пятой группы, если толщины этих слоев составляют несколько ангстрем?

Таким образом, в модели эффективной работы выхода, хотелось бы понять роль изгиба зон в определении положения закрепления уровня Ферми на поверхности и электронного средства в определении работы выхода в зависимости от электронных и структурных свойств кристалла, а также параметров поверхностного слоя V-группы.

**2.** Согласно одному из утверждений вывода 2: «Данная модель может быть применена и в других материалах (ДПМ) при условии химической модификации поверхности или интерфейса в области контакта.» - Универсальность модели ЭРВ для соединений III-V связывается с образованием слоя элемента V-группы на границе. В чём, в таком случае, проявляется универсальность для ДПМ материалов?

Текст диссертации написан ясным языком, однако местами имеется злоупотребление неудачными формулировками.

«Таким образом, в случае близкого расположения работы выхода слоя V-группы и дна зоны проводимости или потолка валентной зоны в полупроводнике, на поверхности может возникать канал проводимости и будет формироваться омический контакт с низким сопротивлением.»

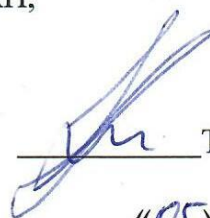
«Аморфные As и Sb являются полупроводниками с существенной шириной запрещенной зоны... В модели аморфные As и Sb также рассматриваются как полуметаллические...»

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация П. А. Алексеева представляет собой полное и квалифицированно выполненное исследование в важной и актуальной области физики твердого тела. Принимая во внимание, что основные результаты диссертации являются принципиально новыми, данную работу можно охарактеризовать как существенный вклад в развитие физики полупроводников. **Достоверность и обоснованность** результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых образцов, согласием теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов

исследований различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в 53 статьях в реферируемых научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях, хорошо известны специалистам. Автореферат правильно передает содержание диссертации. По содержанию, объему, новизне, научной и практической значимости результатов, полученных в работе, диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям. Прохор Анатолевич Алексеев заслуживает присвоения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности **1.3.11 – физика полупроводников.**

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук (01.04.10 – физика полупроводников), профессор РАН, заведующий лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,



Терещенко Олег Евгеньевич

«05» мая 2026 г.

Тел. (383) 330-78-83, e-mail: teresh@isp.nsc.ru

630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН) Терещенко Олега Евгеньевича удостоверяю



Ученый секретарь ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.



Аржанникова София Андреевна