

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Алексеева Прохора Анатольевича

«Сканирующие зондовые методы исследования электронных и оптических свойств современных полупроводниковых материалов»,

представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук по специальности

1.3.11 - физика полупроводников

В диссертационной работе исследовались электрические и оптические свойства полупроводниковых нитевидных нанокристаллов (ННК) (GaAs, GaSb, GaP) или, как их еще называют, нанопроводов (НП), выращенных методом молекулярно-пучковой и газофазовой эпитаксии (МПЭ и ГФЭ), и дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) (MoSe_2 , WSe_2 , $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2/\text{WSe}_2$) в виде моно и многослойных флэйков, изготовленных методом механического расщепления. Диссертант взялся за решение сложной проблемы, представляющей интерес как с фундаментальной научной, так и прикладной точек зрения. Целью работы было выявление особенностей в электронных и оптических свойствах полупроводниковых наноструктурированных материалов в реальных условиях воздушной среды, когда необходимо учитывать окислы на поверхности, поверхностные состояния с большой плотностью, области пространственного заряда, зачастую занимающие весь объём, снижение концентрации носителей заряда на много порядков по сравнению с уровнем легирования, пиннинг уровня Ферми. В работе получили развитие методики сканирующей зондовой литографии (СЗЛ), включая механическую, фрикционную и окислительную литографии (м-СЗЛ, ф-СЗЛ, о-СЗЛ), сканирующего лазерного фотоокисления, а также СЗМ-наноманипулирования с флэйками графена и ДПМ. При исследовании перечисленных выше материалов применялся комплексный подход с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ), проводящей атомно-силовой микроскопии (п-АСМ) с прецизионным контролем деформации исследуемых ННК, сканирующей Кельвин-зонд микроскопии (СКЗМ), включая градиентную Кельвин-зонд микроскопию (ГКЗМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом, спектроскопии фотolumинесценции (ФЛ) и комбинационного рассеяния света (КРС). Отметим, что основным используемым в диссертации методом исследования была сканирующая зондовая микроскопия и её разновидности, что отмечено в названии работы.

Актуальность работы подтверждается как большим интересом мирового научного сообщества к исследуемым в диссертации полупроводниковым материалам, так и тем, что в ней используется и развивается метод СЗМ, являющийся одним из основных методов нанотехнологии. Повышенный интерес к перечисленным выше ННК на основе соединений $AIIBV$ обусловлен их уникальными физическими свойствами, открывающими перспективы для создания электроники и оптоэлектроники нового поколения. ННК можно выращивать на стандартных кремниевых подложках, несмотря на различие в параметрах кристаллических решеток. Малая площадь контакта $AIIBV$ ННК с Si подложкой обеспечивает релаксацию механических напряжений без образования дефектов. Это открывает путь к созданию дешевых и эффективных оптоэлектронных схем на базе существующей кремниевой электроники. Особенностью ННК является возникновение в них нетипичной для объемных кристаллов фазы. Например, в GaAs ННК вюрцитная фаза может заменить фазу цинковой обманки, существующую в объемных кристаллах. Это позволяет радикально менять их зонную структуру и оптические свойства, конструируя материалы с заданными параметрами. Другой особенностью ННК является способность выдерживать высокий уровень упругой деформации (до 10%), влияющей, как известно, на зонную структуру полупроводниковых материалов. Этот факт, а также возможность выращивания упорядоченных структур из ННК, открывает интересные направления в дизайне материалов с заданными оптоэлектронными параметрами. Существующий интерес к полупроводниковым ННК связывают с возможностью создания на их основе транзисторов нового типа, высокоэффективных элементов фото-вольтаики и биосенсорики. Интерес к ДПМ обусловлен тем, что энергия связи экситона в монослоях таких материалов достигает 0.5 эВ, что позволяет проводить исследования свойств двумерных систем при комнатных температурах. Объемные многослойные ДПМ и другие ван-дер-ваальсовы материалы обладают рекордными значениями показателя преломления света и гигантской оптической анизотропией, что делает их перспективными кандидатами для применения в области нанофотоники. Из ДПМ можно изготавливать оптические резонаторы и волноводы рекордно малых размеров. Не вызывает сомнения и необходимость развития метода СЗМ для исследования новых материалов. Действительно, хотя метод СЗМ появился в середине 80-х годов прошлого века, он нуждается в модификации, в частности, при его использовании в измерениях вольт-амперных характеристик одиночных ННК, в наноманипулировании или в СЗМ литографии на монослоях ван-дер-ваальсовых материалов.

Основное содержание работы.

Во **Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель, задачи и научная новизна работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко сформулирована теоретическая и практическая значимость. В **Первой главе** представлен литературный обзор, посвящённый исследуемым в работе полупроводниковым материалам: поверхности объёмных полупроводников и нанопроводам АЗВ5, ван-дер-ваальсовым материалам (ДПМ и графен). Основное внимание уделено электронным и оптическим явлениям, наблюдаемым при стандартных лабораторных условиях в присутствии и слоев воды, адсорбированной на поверхности образцов. Дан краткий анализ некоторых физических проблем, актуальных для исследуемых материалов. Показано определяющее влияние поверхностных электронных состояний на проводимость АЗВ5 ННК вследствие высокого соотношения поверхности/объём. Рассмотрены основные модели, описывающие закрепление уровня Ферми на поверхности полупроводников.

Вторая глава посвящена сканирующим зондовым методам и особенностям их применения в исследованиях полупроводниковых материалов. Здесь представлен как литературный обзор, известных работ, так и оригинальные исследования, раскрывающие особенности применения зондовых методов к полупроводниковым материалам, исследуемым автором диссертации. На примере структур графен/SiC с включениями двуслойного графена продемонстрирована возможность определения участков однослойного и двуслойного графена с использованием комплекса диагностических методов (атомно- силовая микроскопия (АСМ), сканирующая Кельвин-зонд микроскопия (СКЗМ), картирование спектров комбинационного рассеяния света (КРС)). Приведены примеры нанозондов, используемых в СКЗМ и проводящей АСМ, обсуждается их пространственное разрешение. Продемонстрирована возможность измерения вольт-амперной характеристики (ВАХ) одиночного ННК, имеющего малую изгибную жесткость. Показано, как с помощью АСМ зонда можно создать контакт к боковой поверхности вертикального ННК и создавать контролируемую изгибную деформацию ННК. Для создания одноосной деформации сжатия вертикального ННК используется специальный держатель с наклоном образца 20° . Также продемонстрирована возможность создания упругих изгибных деформаций, достигающих 5 % путём изгиба ННК, лежащих на подложке. В результате предложена СЗМ методика исследования электромеханических и оптических явлений в ННК с контролируемой деформацией. В заключительной части главы описана картирование оптических спектров на монослое MoSe₂ и горизонтальных

ННК. Для GaP ННК на подложке Ni/Si выявлены резонансные явления в распределении электромагнитного поля внутри ННК.

В **третьей главе** представлены оригинальные результаты, демонстрирующие развитие методов сканирующей безмасочной литографии (СЗЛ) полупроводниковых материалов. Приведены результаты применения силовой сканирующей зондовой литографии или механической зондовой литографии (м-СЗЛ), локального анодного окисления (ЛАО) или окислительной СЗЛ (o-SPL). Также представлены результаты использования метода сканирующего зондового выравнивания монослоёв ДПМ и сканирующего лазерного фотоокисления поверхности полупроводников. В главе исследованы особенности м-СЗЛ материалов, имеющих широкий диапазон механической твёрдости (от галогенидных перовскитов до GaAs), и материалов с высокой анизотропией твёрдости (ван-дер-ваальсовы материалы (ДПМ) и квази ван-дер-ваальсовы материалы InGaS₃). Достигнуто ~20 нм латеральное разрешение м-СЗЛ для тонких слоёв ДПМ. Для м-СЗЛ флейков слоистых материалов с толщиной, превышающей несколько монослоёв, разработан фрикционный метод (ф-СЗЛ), заключающийся в многократном повторении сканирования по литографическому шаблону. Показано, что ф-СЗЛ позволяет избежать отслоения материала, имеющего место при м-СЗЛ. Показано, что наибольшее удаление материала (глубина и ширина реза) происходит при движении вперёд в направлении, перпендикулярном грани острия с наибольшей площадью. Значительное различие в площади граней, формирующих остриё, приводит к существенной азимутальной неоднородности в удалении материала при круговом движении зонда, которая может быть уменьшена наклоном плоскости образца. С использованием м-СЗЛ и ф-СЗЛ созданы нанопотонных структуры для оптического диапазона: фотонные кристаллы на тонком слое галогенидного перовскита с сильной экситон-поляритонной связью и расщеплением Раби >200 мэВ при комнатной температуре, полосковые волноводы InGaS₃ толщиной 70 нм, пропускающие свет в оптическом диапазоне, дисковые оптические резонаторы из вертикальных гомо- и гетероструктур ДПМ толщиной 70 нм и 50 нм, соответственно, поддерживающие моды шепчущей галереи (МШГ) с оптической добротностью 700. Методом o-СЗЛ создан квазимонослой в многослойном флейке MoSe₂, демонстрирующий интенсивную ФЛ. Формирование квазимонослоя внутри флейка подтверждено низкочастотной КРС спектроскопией.

Показано, что, используя o-СЗЛ метод, можно определять кристаллографические направления внутри слоя, а также тип упаковки между слоями. Получен рекордно малый латеральный размер окисленной линии ~10 нм. На графене на SiC подложке методом o-

СЗЛ были созданы графеновые микроленты, на которых наблюдался модифицированный спектр ближнепольного терагерцового отклика, с разрешением ~ 10 нм. Используя комбинацию методов (АСМ, СКЗМ, КРС, ФЛ, а также ПЭМ с ЭДС анализом), исследованы процессы фотоокисления поверхности объёмных полупроводников A_3As и A_3Sb и их тройных и четверных твёрдых растворов, а также НК A_3As . Показано, что на границе с полупроводниковым кристаллом образуется сэндвич из аморфного элемента V – группы, покрытого оксидом III – группы. Отмечается, что процессы образования оксида на поверхности A_3As и A_3Sb полупроводников при естественном и фотоокислении имеют одинаковую природу. При этом сформированный слой V-группы является источником центров безызлучательной рекомбинации.

В **четвертой главе** представлены исследования (100) и (110) поверхностей различных A_3As , A_3Sb и A_3P соединений методом СКЗМ, позволившие выявить единый механизм закрепления уровня Ферми на поверхности A_3As и A_3Sb полупроводников со слоем естественного оксида. Показано, что образование слоёв V-группы на поверхности полупроводника при окислении приводит к закреплению уровня Ферми на расстоянии 4.8 ± 0.3 эВ в A_3As и 4.6 ± 0.2 эВ в A_3Sb полупроводниках от уровня вакуума. Для тройных твёрдых растворов A_3AsSb закрепление уровня Ферми происходит в границах, представленных выше значений. Положение закрепления уровня Ферми в основном определяется работой выхода слоя элементов V-группы, что соответствует модели эффективной работы выхода (ЭРВ). При этом работа выхода аморфного слоя на ~ 100 мэВ меньше, чем кристаллического. Предложена улучшенная модель ЭРВ. Произведена оценка поверхностного потенциала слоя V-группы на поверхности полупроводникового кристалла в зависимости от толщины и электронных свойств слоя, а также типа и уровня легирования полупроводника. При уменьшении толщины слоя или при уменьшении плотности его электронных состояний, как и при увеличении уровня легирования полупроводника, происходит снижение экранирования и сдвиг работы выхода структуры относительно работы выхода слоя, что соответствует частичному откреплению уровня Ферми. Измерена работа выхода слаболегированных ZB и WZ GaP ($4.3-4.4$ эВ и 4.2 эВ, соответственно). Двойниковые границы действуют как WZ бислои и дополнительно снижают работу выхода на 80 мэВ. Работа выхода p-GaP и n-GaP составляет 4.3 эВ и $4.0-4.1$ эВ, соответственно. Покрытие ZB-области слоем GaPAs сдвигает работу выхода до 4.75 эВ. Таким образом, показана возможность регулирования работы выхода (110) GaP в диапазоне $4.0-4.75$ эВ. На поверхности скола диода p-GaAs/n-AlGaAs обнаружено локальное увеличение толщины поверхностного оксида при приложении обратного напряжения близкого к пробойному. Образование оксида в области перехода приводило к

увеличению пробойного напряжения структуры на 20%. Показано, что увеличение пробойного напряжения вызвано блокированием канала поверхностной утечки через слой воды, адсорбированной на поверхности, и слой материала V-группы. Отмечается, что исследованные в объёмных полупроводниках поверхностные электронные явления будут еще сильнее влиять на свойства ННК, имеющих высокую долю поверхности по отношению к объёму.

В пятой главе представлены результаты исследований одиночных GaAs, AlAs и GaP ННК методом проводящей-АСМ. Представлены ВАХ для нанопроводов с различными размерами, типом и уровнем легирования, выращенных на различных подложках, а также с различными пассивирующими покрытиями. Для анализа полученных ВАХ разработан набор моделей в программном пакете Silvaco, позволяющих рассчитывать экспериментальные ВАХ при переборе электронных параметров в системе подложка – ННК-зонд. Для сильнолегированных p^+ GaAs НП, выращенных на p - и n -GaAs подложках разработан подход, позволяющий оценить концентрацию основных носителей заряда. Уровни легирования, определённые из анализа ВАХ, согласуются с уровнями, полученными из анализа спектров ФЛ ННК. ВАХ слаболегированных GaAs ННК, выращенных на GaAs подложке, не имеют линейных участков, и их форма имеет степенной вид, соответствующий режиму ограничения тока пространственным зарядом, поскольку область пространственного заряда в этом случае заполняет весь объем ННК.

Исследованы электронные свойства GaAs ННК, выращенных на гибридных подложках графен/SiC методом ПЖК при участии Au катализатора. Показано, что между графеном и ННК формируется барьер Шоттки. Высота барьера соответствует модели эффективной работы выхода для GaAs (~4.9 эВ). Показано, что легирование Si примесью формирует в ННК n -тип проводимости. Экспериментально и с помощью численного моделирования исследован гистерезис на ВАХ, обусловленный накоплением основных зарядов в поверхностном оксиде GaAs ННК. Показано, что накопление основных носителей заряда в области барьера Шоттки в p -GaAs ННК, приводит к уменьшению силы тока вследствие полевого эффекта, а накопление основных носителей заряда в области p - n перехода между высоколегированным GaAs ННК и n -подложкой приводит к увеличению силы тока вследствие увеличения рекомбинационного тока в ННК.

Исследовано влияние внутренних и внешних деформаций на электронные и фотоэлектронные свойства GaAs ННК. Включение деформации ННК в модель через тензорезистивный и пьезоэлектрический эффекты в области ростового контакта обеспечило согласие модельной и экспериментальной ВАХ.

Эксперименты по одноосному сжатию ННК с помощью АСМ кантилевера, подкреплённые численным моделированием, показали уменьшение эффективности солнечного элемента зонд - p-GaAs НП - p-Si подложка при одноосном сжатии. Исследовано проявление модели ЭРВ в электронных свойствах WZ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ННК для образцов с различным $0 \leq x \leq 1$. Изгиб ННК с помощью АСМ зонда приводит к растяжению ННК и смещению дна зоны проводимости вниз относительно неподвижного поверхностного закреплённого уровня Ферми. Это приводит к формированию канала проводимости в областях ННК с $x < 0.9$ и формированию омического контакта с проводящим слоем на ростовой подложке. Таким образом, дифференциальная проводимость ННК при деформации резко увеличивается и коэффициент тензочувствительности при электрическом напряжении 0.5 В достигает рекордных значений ~ 10000 . При анализе ВАХ различных GaAs ННК наилучшее совпадение расчётных и экспериментальных ВАХ наблюдалось только при значениях подвижности основных носителей заряда на несколько порядков меньших соответствующих объёмных значений. Делается вывод о том, что снижение подвижности в GaAs ННК обусловлено влиянием поверхностных состояний и зарядов, захваченных в поверхностном оксиде, и наличием чередования фаз и двойникованием. Анализ ВАХ от ННК с горизонтальными планарными контактами, а также спектров КРС, подтверждает возможность определения концентрации носителей заряда в ННК с ошибкой, не превышающей половину порядка величины. Методами п-АСМ и спектроскопии ФЛ исследована пассивации поверхности ННК. Показано, что интенсивное оптическое излучение приводит к деградации пассивирующих покрытий. Исследованы сдвиги TO и LA+TA фононных линий GaP ННК, подвергнутых $\pm 4\%$ деформации.

В **шестой главе** исследованы электронные и оптические явления в ДПМ. Определена зависимость работы выхода от количества монослоёв в MoSe_2 и WSe_2 . С увеличением количества слоёв работа выхода нелинейно возрастает и выходит в насыщение в объёмном материале (на ~ 250 мэВ больше чем в монослое). Исследование MoSe_2 на различных подложках (однослойный и двухслойный графен, Ni, Au, SiO_2) показало, что в зависимости от разницы между работой выхода ДПМ и подложки может формироваться энергетический барьер, высота которого определяет электронные, фотоэлектронные и фотохимические процессы в ДПМ. При увеличении разности работ выхода, в области барьера происходит увеличение вероятности диссоциации экситонов, сформированных при оптическом возбуждении ДПМ, что приводит к снижению интенсивности экситонной ФЛ. В частности, при контакте MoSe_2 с однослойным графеном, интенсивность ФЛ на порядок меньше, чем при контакте с двухслойным графеном, вследствие увеличения разности работ выхода с монослойным графеном на ~ 100 мэВ. При

наличии плёнки воды на поверхности MoSe_2 диссоциация экситонов в области барьера между ДПМ и подложкой приводит к фоторазложению воды и окислению ДПМ. Данный процесс аналогичен ЛАО, когда источником носителей заряда является не СЗМ зонд с приложенным электрическим потенциалом, а внешнее освещение, приводящее к фотогенерации. Поскольку оксиды MoSe_2 водорастворимы, то длительное хранение ДПМ в атмосферных условиях на подложке с большой разностью работ выхода (~ 200 мэВ MoSe_2/Ni) приводит при освещении к структурной деградации флэйка. Для предотвращения структурной деградации ДПМ разность работ выхода должна быть минимизирована. Разработан метод исследования локальных оптомеханических свойств ДПМ, заключающийся в перенесении флэйка на мягкую полимерную подложку и его локальной деформации (до 1%) с помощью СЗМ зонда, с одновременным картированием спектров ФЛ.

Продемонстрированы способы увеличения интенсивности ФЛ объёмных не прямозонных ДПМ и показана возможность усиления не прямозонной ФЛ в многослойных ДПМ. На примере MoSe_2 толщиной 70 нм продемонстрировано увеличение интенсивности ФЛ при создании микродиска диаметром 2.2 мкм. Методом ФЛ спектроскопии с временным разрешением установлено, что основным механизмом увеличения интенсивности ФЛ в микродисковых резонаторах является эффекта Парселла. Исследование температурной зависимости ФЛ микродисков подтвердило наличие не прямозонной ФЛ.

Для преодоления негативного эффекта поглощения света в многослойных ДПМ предложена двойная гетероструктура, состоящая из широкозонных обкладок из многослойного WS_2 , выполняющих роль оптического резонатора, между которыми помещён относительно узкозонный монослой MoSe_2 с интенсивной экситонной ФЛ. Из такой гетероструктуры методом ф-СЗЛ вырезались микродиски диаметром 2-4 мкм. Обнаружено (4-10) кратное увеличение интенсивности ФЛ экситонов MoSe_2 в микродисках по сравнению с ФЛ исходной гетероструктуры. При измерении спектров ФЛ вблизи краёв микродисков проявлялись узкие спектральные особенности, соответствующие модам шепчущей галереи (МШГ). Спектральное положение МШГ определялось размерами микродисков. Наибольшая добротность (700) наблюдалась в микродиске диаметром 2.35 мкм. Дальнейшее увеличение интенсивности накачки при измерениях ФЛ приводило к необратимому повреждению микродисков, вследствие слабого теплоотвода в SiO_2 подложку.

Диссертация содержит 333 страницы текста, включая 139 рисунков и 6 таблиц. Каждая из глав заканчивается четко сформулированными выводами. Диссертация содержит 6 всесторонне обоснованных научных положений. В конце текста имеется общее

заклучение и список цитируемой литературы, содержащий 405 наименований.

Среди результатов, обладающих **научной новизной** следует отметить:

- разработку методики исследования электронных и электромеханических явлений в ННК с контролем деформации ННК;
- обнаружение поверхностного двойного As и GaO_x слоя, обладающего фотолюминесценцией в области 1.7-1.8 эВ, и нанокристаллов β-Ga₂O₃ на поверхности ZB областей GaAs и в объёме WZ областей GaAs при увеличении интенсивности фотоокисления;
- выяснение природы поверхностных состояний в A3As и A3Sb полупроводниках со слоем естественного оксида;
- развитие модели эффективной работы выхода, учитывающей электронные свойства поверхностного слоя, зависящие от его кристаллической структуры;
- исследование влияния локального фотоокисления поверхности (100) кристаллов GaSb и GaAsSb на формирование кристаллических квази-ван-дер-ваальсовых слоёв Sb и AsSb, соответственно;
- выяснение факторов, влияющих на параметры механической СЗЛ в ван-дер-ваальсовых материалах;
- управление спектром фотолюминесценции дисковых микрорезонаторов на основе двойных гетероструктур из объёмных дихалькогенидов переходных металлов с внедренными гетерослоями.

Полученные в диссертационном исследовании результаты имеют как фундаментальную научную (теоретическую), так и прикладную (практическую) значимость.

Теоретическая значимость:

- разработаны и апробированы методы и подходы, обеспечивающие исследование электронных, оптоэлектронных, электромеханических и оптомеханических свойств одиночных ННК;
- показано, уменьшение на несколько порядков подвижности носителей заряда в GaAs ННК, выращенных на подложке, по сравнению с подвижностью в объёмном материале;
- разработаны и апробированы методы сканирующей зондовой литографии на ван-дер-ваальсовых материалах, обеспечивающие пространственное разрешение до 20 нм;
- показано, что с использованием метода локального анодного окисления в многослойных флейках дихалькогенидов переходных металлов возможно создание областей с квазинезависимыми монослоями;

- выявлен значимый вклад упругих деформаций, возникающих при росте GaAs ННК на Si подложке, в электронные и оптоэлектронные процессы;
- определена зависимость работы выхода MoSe₂ от количества монослоёв в кристалле, и выявлено влияние разности работ выхода между MoSe₂ и проводящей подложкой на интенсивность экситонной фотолюминесценции;
- усовершенствована модель эффективной работы выхода, позволяющая определить положение закрепления уровня Ферми на поверхности A₃As и A₃Sb полупроводников со слоем естественного оксида и предсказывать высоту барьера Шоттки при создании электрического контакта.

Практическая значимость:

- продемонстрирована возможность создания тензорезисторов на базе InGaAs ННК с коэффициентом тензочувствительности достигающим 650;
- исследованы различные виды пассивации поверхности GaAs ННК, и определена стабильность пассивирующих покрытий в атмосферных условиях и при интенсивном оптическом воздействии;
- предложен и апробирован способ очистки поверхности и интерфейсов ван-дер-ваальсовых гетероструктур с помощью выглаживания поверхности зондом СЗМ;
- установлено, что при увеличении разности работ выхода между MoSe₂ и проводящей подложкой при атмосферных условиях в присутствии адсорбированных на поверхности слоёв воды возникает структурная фотодеградация MoSe₂ и снижение интенсивности фотолюминесценции с увеличением скорости фотоокисления MoSe₂.

Достоверность представленных результатов обосновывается использованием современного оборудования, тестовых калибровочных образцов, комплекса независимых методов исследования, а также согласованием экспериментальных результатов с результатами модельных расчетов.

Апробация работы. Результаты работ, вошедших в диссертацию, докладывались автором на следующих мероприятиях: конкурсы научных работ Отделения физики твёрдого тела (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) - 2016, 2019, 2022, 2023. Конкурсы научных работ ФТИ им. Иоффе – 2022, 2023. Низкоразмерный семинар ФТИ им. А.Ф. Иоффе – 2016, 2024, 2025. Чайный семинар ФТИ им. А.Ф. Иоффе – 2019, 2023. Наноструктуры: Физика и технология – 2013, 2015, 2017, 2018. Российская конференция по физике полупроводников – 2015, 2017, 2019, 2022, 2024. Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» - 2022, 2025. ФизикА.СПБ – 2012. Nanogenerators and Piezotronics – 2016, Рим. EMN: Nanowires – 2016, Амстердам. Nanowires Week – 2017, Лунд. E-MRS Spring meeting – 2020, Страсбург. ICMAT – 2019, 2023, Сингапур. Metanano – 2018, 2019,

При изучении диссертации возникли **вопросы и замечания**.

1. В работе описан режим статической силовой литографии ДПМ. Исследовался ли автором режим прерывистой динамической силовой литографии?
2. В расчетах деформации ННК GaAs используется модуль Юнга. Измерялся ли модуль Юнга именно ННК? Отличается ли его значение от значения для объемного материала?
3. Каковы физико-химические причины обнаруженного перехода от анизотропного к изотропному окислению ДПМ в режиме о- СЗЛ?
4. Основные экспериментальные результаты получены в диссертации с использованием методов сканирующей Кельвин-зонд микроскопии и токопроводящей атомно-силовой микроскопии. Автор довольно подробно описывает особенности и детали этих методик. Однако, при описании проводящей АСМ автор забывает подчеркнуть важность поддержания одинаковой площади контакта ННК с зондом при измерениях тока на разных ННК, что осуществляется через поддержание одинаковой силы прижима. Обсуждая режим СКЗМ, автор не приводит принципиальных электрических или блок схем, а использует только текстовое описание. При этом, он сообщает, что контроллер Р10 предоставил ему для измерений А. В. Анкудинов. На наш взгляд, такую «интимную» подробность можно было привести в разделе «Благодарности», а здесь важнее было привести электрические схемы, по которым было бы легче разобраться, например, в методике градиентной СКЗМ, использующей два синхродетектора.
5. Для калибровки метода СКЗМ при измерениях работы выхода при атмосферном давлении в качестве тестового образца использовался скол высокоориентированного пиролитического графита (ВОПГ). Известно, что образцы ВОПГ могут иметь разное качество, например, иметь разный размер и угол разориентации монокристаллических зерен, пустоты в объеме образца, разную концентрацию примесей, различную объемную плотность. На воздухе на поверхности скола графита конденсируется вода и органические примеси. Эти адсорбаты, а также скопления дислокаций на границах зерен, могут влиять на величину работы выхода. Автор полагает, что в его экспериментах работа выхода поверхности ВОПГ на воздухе равнялась 4,48 эВ. На чем основывается такое утверждение, и как оно проверялось экспериментально? Измерялся ли разброс значений работы выхода ВОПГ в разных точках на поверхности одного образца. Какой разброс в значениях работы выхода наблюдался при

измерениях на разных образцах и при разной влажности и температуре? Как известно, работу выхода также можно измерять и с помощью СТМ. Почему работа выхода, измеренная с помощью СТМ, сильно зависит от чистоты поверхности и дает правильные значения только на очищенных поверхностях в сверхвысоком вакууме, а метод Кельвин зонд микроскопии, по существу, тоже измеряющий работу выхода, работает при атмосферном давлении?

6. В параграфе 2.2.3 правильно рассчитано время стабилизации амплитуды колебаний зонда АСМ (60 мсек) при добротности и резонансной частоте кантилевера 20 000 и 100кГц, соответственно, и 500 точках измерения в строке, но допущена ошибка в расчете частоты строчной развертки. Вместо приведенного значения 0,3 Гц, должно быть - 0,03 Гц
7. В параграфе 5.1.1. на стр. 204 автор пишет, что не смог полностью измерить ВАХ GaAs Н Н К, т. к. ток превышал максимальное значение 1000нА, заложенное в параметры используемого им прибора. Вообще говоря, с таким объяснением трудно согласиться. Можно было бы принять подобные оправдания, если бы сигнал был бы слишком мал, например, по сравнению с шумами.
8. Текст диссертации содержит большое количество сокращений. Однако, в диссертации отсутствует список всех сокращений с расшифровками, что затрудняет чтение.
9. В тексте диссертации, к сожалению, встречаются стилистические огрехи. Например, на стр. 34 читаем: «Объяснить данный эксперимент с помощью модели Шоттки-Мотта является затруднительным». На стр. 50: «Помимо получения топографии поверхности, в данной диссертации обратная связь также используется в сканирующей Кельвин зонд микроскопии (СКЗМ), где обратная связь подаёт постоянное напряжение зонд, являющееся поверхностным потенциалом поверхности». На стр. 304: «Определена зависимость работы выхода MoSe₂ и WSe₂ в зависимости от количества монослоёв». Автор упоминает «стандартный» и «менее современный» зондовые микроскопы и пирамиду цилиндрической формы. Что это за приборы и что это за геометрическая форма?
10. Также встречаются ошибки в пунктуации. Например, на стр.37 не хватает 4-х запятых, а одна запятая лишняя. На стр. 50 отсутствуют 4 запятые, а на стр. 284 пропущены 3 запятые.

Высказанные замечания не влияют на основные результаты и защищаемые положения.

На основании изучения текста диссертации и сопутствующих публикаций считаю, что диссертация полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а её автор, Алексеев Прохор Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

Голубок Александр Олегович

доктор физико-математических наук,

главный научный сотрудник

лаборатории Сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института аналитического приборостроения Российской академии наук

198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 31-33, лит. А.

e-mail: aogolubok@mail.ru

тел: +7921 964 27

4 мая 2026г.

*Подпись глав. науч. сотрудника
Голубка А.О. удостоверяю.
Гас-к ор. Иванове*

