

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Трунькина Игоря Николаевича «Определение атомной структуры гетеросистем на основе  $A^3B^5$  комплексом методов электронной микроскопии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Гетероструктуры или гетеросистемы на основе полупроводниковых материалов занимают особое место в современной микро- и нано-электронике. В силу своих специфических электрофизических свойств важную роль играют гетеросистемы на основе соединений  $A_3B_5$ , в том числе трех- и четырех компонентные твердые растворы. Например, высокая подвижность электронов в гетеросистемах InGaAs/InAlAs/GaAs открывает возможности производства транзисторов с высокой подвижностью электронов.

Уменьшение активных компонентов микро- и нано-электроники до субмикронных и нано-размеров приводит к новым и иногда специфическим зависимостям процессов, протекающих в них, от геометрических параметров и структурного совершенства. Возникает необходимость контроля структурных свойств гетеропереходов, определения размерных параметров и структурного совершенства слоев, морфологии границ раздела, распределения элементов на атомном уровне. Для решения этих задач наиболее распространенным и наиболее информативным методом является электронная микроскопия (ЭМ). Современная просвечивающая электронная микроскопия и особенно микроскопия высокого разрешения с применением коррекции сферической аберрации – один из основных инструментов исследования структуры границ раздела, так как этот метод позволяет получать информацию с субангстремным разрешением. Просвечивающая растровая электронная микроскопия (ПРЭМ) с коррекцией сферической аберрации в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом дает возможность определения размеров и состава нано-объектов, слоев гетеросистем и нановключений, шероховатости границ на уровне кристаллической решетки.

Широкое применение гетероструктур на основе полупроводниковых материалов и их значимость для различных технических приложений обуславливают необходимость детального изучения их атомарного строения, которое является важным как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Для фундаментальных исследований представляет интерес выявление общих закономерностей влияния наноструктуры гетеросистем в конечном итоге на их свойства.

По этим причинам указанные **тема работы и объявленная цель** по обработке современных методов ЭМ, разработке методов их комплексного применения и определению степени влияния разориентации подложек GaAs на микроструктуру метаморфных наногетеросистем InGaAs/InAlAs (концентрация дислокаций, размеры слоев, шероховатость гетерограниц, микроструктура метморфного буфера), а также характеристика влияния нановставок InAs в гетеросистемах InGaAs/InAlAs, выращенных на подложках InP, на их структурные особенности, включая кристаллическую структуру составной квантовой ямы (КЯ) и интерфейса InP (подложки)/InAlAs(буфера), являются **очень актуальными**. Данная задача принадлежит к фундаментальной научной проблеме изучения связи между структурой и свойствами.

Выполнение настоящей работы позволило развить новый комплексный ЭМ подход и метод визуализации напряжений для изучения гетеросистем на основе  $A^3B^5$  с квантовыми ямами, повысить точность определения структурных параметров гетеросистемы до атомного уровня, оценить влияние заданных ростовых параметров на структурные свойства и установить связь структурных и электрофизических характеристик. Удалось впервые провести сравнение структурных характеристик слоев GaAs, выращенных при низкой температуре на подложках GaAs разной ориентации. Данные гетеросистемы широко используются в качестве материала для производства быстродействующих полевых транзисторов, поэтому представленные в работе результаты важны для понимания физических процессов, происходящих в этих гетеросистемах, что необходимо для решения технологических задач по созданию новых и улучшению существующих приборов на основе гетеросистем InGaAs/InAlAs. Сказанное подчеркивает **большую теоретическую и практическую значимость** диссертации. Результаты важны для понимания физических процессов, происходящих в подобных гетеросистемах, а именно процессов рассеяния электронов, определяющих подвижность, и позволят в ближайшем будущем формировать структуры с лучшими характеристиками.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 126 наименований, общим объемом – 157 страниц,

Во **Введении** обоснованы актуальность темы и выбор объектов исследования, сформулированы цели и задачи, а также основные положения, составляющие научную новизну и практическую значимость диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту. **В первой главе** приведен обзор литературы в области свойств гетеросистем InGaAs/InAlAs/InAlAs и GaAs-LT (низкотемпературного GaAs), включая методы формирования, влияния кристаллической структуры на электрофизические свойства. **Во второй главе** приведено описание образцов и метода молекулярно -лучевой эпитаксии, исполь-

зованного для их приготовления. Описаны методы электронной микроскопии для структурных исследований. Приведено описание электронного просвечивающего/растрового микроскопа (ПРЭМ/ПЭМ) с корректором сферической аберрации. Кратко описан метод исследования электрофизических характеристик InGaAs/InAlAs. Квантовые ямы изучались путем измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла при температурах 77 и 300 К. **Третья и четвертая** главы представляют оригинальные результаты исследований диссертанта.

В диссертационной работе получен ряд **важных с научной точки зрения результатов**.

1. В представленной работе для исследования гетеросистем на основе  $A^3B^5$  были использованы методы ПЭМ, ЭРМ (энергодисперсионный рентгеновский микроанализ) и ПРЭМ в светлопольном и темнопольном высокоугловом режиме. Последнее позволило с помощью Z-контраста оценивать элементный состав. Использование ВР ПРЭМ с корректором сферической аберрации пробы дало возможность определить особенности кристаллической структуры гетеросистем с атомным разрешением. Для определения значения напряжений, зависящих от состава слоев, были применены методы цифровой обработки темнопольных ПРЭМ изображений. Развитый в работе комплексный подход позволил на атомном уровне определить размеры переходных слоев и шероховатостей, а также гомогенность состава и дефектность этих структур, которые определяют электрофизические характеристики в гетеросистемах на основе  $A^3B^5$ .

2. Впервые проведенное сопоставление особенностей микроструктуры гетеросистем, сформированных на кристаллографически точно ориентированных и вицинальных подложках, показало, что в гетеросистемах, выращенных на разориентированных подложках, гетерограницы являются более размытыми, имеют больший размер шероховатостей и более высокую концентрацию дефектов в области буферных слоев. Последнее приводит к уменьшению подвижности электронов. Введение нановставок InAs толщиной  $\sim 1.2$  нм в квантовые ямы InGaAs и нанобарьеров GaAs толщиной  $\sim 1$  нм по границам КЯ не приводит к появлению структурных дефектов при использованных технологических режимах эпитаксиального роста. Определены геометрические параметры границ раздела. Найден переходный слой (In, Ga, Al)As со сложным элементным профилем в областях вставок GaAs.

3. Был выявлен дефект упаковки типа внедрения в гетеросистеме InAlAs/InGaAs/InAs с двумя частичными дислокациями Шокли (который не рассматривался ранее). Было зафиксировано негативное влияние этих дефектов на формирование слоев. Определена кристаллическая структура дефекта упаковки и частичных дислокаций.

4. Подробно изучено влияние давления потока  $As_4$  во время роста вставки InAs на структурное качество гетерограниц слоя InAs, в частности на ширину интерфейса и латеральную однородность состава. Снижение соотношения потоков атомов групп V/III при формировании вставки показало существенное улучшение структурного качества слоя InAs и повышение подвижности и концентрации электронов в составной квантовой яме (СКЯ). Повышенные подвижность и концентрация электронов были обнаружены в гетеросистемах InGaAs с СКЯ, содержащих слой InAs толщиной 4 нм в середине КЯ.

5. При исследовании структур GaAs, выращенных при низкой температуре, выявлено влияние: ориентации подложки, давления мышьяка в камере роста, различного легирования Si (однородного по всей толщине пленки или в виде  $\delta$ -слоев Si) и отжига на структурные особенности гетеросистем, а именно: преципитатообразование, их распределение и концентрацию, размер, а также на моно- и поликристалличность пленки GaAs, концентрацию дефектов. Показано, что при пониженном соотношении потоков атомов групп V/III (от 16 до 20) кристаллическое совершенство LT-GaAs слоёв на подложках GaAs выше, чем при более высоких давлениях. Преципитаты мышьяка, образующиеся после отжига, наблюдаются только в монокристаллической области. Обнаружено, что введение  $\delta$ -слоев Si в плёнку GaAs при соотношении потоков атомов групп V/III  $\sim 16$  приводит к возникновению упорядоченности в расположении преципитатов: области  $\delta$ -слоев Si аккумулируют мышьяк, формирующий преципитаты.

Представленные в диссертационной работе результаты являются **вполне обоснованными, достоверными и надежными**, поскольку получены с использованием комплексов современных методов структурного исследования, выполнены на современном аттестованном оборудовании известных мировых производителей. Для характеристики структур использовались неоднократно апробированные прецизионные методы исследования просвечивающей/растровой электронной микроскопии (ПЭМ/ПРЭМ).

Изложенные результаты диссертационной работы соответствуют специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния, основой которой является теоретическое и экспериментальное исследование природы кристаллических и аморфных, неорганических и органических веществ в твердом и жидком состояниях и изменение их физических свойств при различных внешних воздействиях. Выполненные электронно-микроскопические исследования являются актуальными и представляют интерес для научного направления - индустрия наносистем и материалов.

**Есть несколько замечаний.**

1. Получен большой объем важной структурной информации на высоком уровне с помощью современного прецизионного оборудования. Об этом свиде-

тельствует качество полученных ЭМ-изображений, в том числе и с помощью темнопольной растровой ПЭМ. Другими словами есть прекрасный материал для проведения углубленного теоретического анализа с привлечением современных методов моделирования. В то же время в работе это хоть и встречается, но явно в недостаточной степени. Хотя для объяснения связи структуры со свойствами без анализа данных с помощью моделирования невозможно обойтись.

2. В работе получено много результатов, которые должны в значительной степени обогатить технологов, занимающихся получением гетероструктур, используемых в современной нано- и микро-электронике. Хотелось бы видеть сформулированные на базе полученных структурных данных рекомендации по улучшению методов синтеза указанных структур.

3. Есть замечания по форме. Встречается достаточно много опечаток и неудачных выражений. Например: на стр. 42 ("*... корректора сферической аберрации, встраиваемого параллельно объективной линзе и обеспечивает дополнительное расхождение неосевых лучей.....*"), или на той же стр. ("*Электроны, проходя через линзу, попадают под действие силы Лоренца, для электронов, проходящих через центр, из-за симметрии эта сила равна нулю, но силы возрастают с радиусом  $r$* "). Выводы в диссертациях принято выделять отдельно, нумеруя их по порядку. У автора есть только одно общее заключение. Не расшифрованы некоторые аббревиатуры (например: ФЕТ, ВКД). Не удалось найти рисунка с номером 1.7.2.5.2. Автор, повторяя принятое в некоторых зарубежных статьях выражение, говорит, что "*Z- контраст связан с Резерфордским рассеянием*". Хотя оно, как известно, определяется пропорциональностью интенсивности 4-ой степени атомного заряда. В случае высокоуглового рассеяния в режиме ПРЭМ интенсивность пропорционально 2-ой степени, а это соответствует тепловому диффузному рассеянию. Правда, эта неточность никак не влияет на интерпретацию автором его результатов.

Сказанные выше замечания несколько не снижают общий высокий научный уровень проведенного исследования. Основные научные результаты работы изложены в 7 статьях, опубликованных в журналах, включенных ВАК РФ в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и доложены на 10 российских и международных конференциях. Автореферат, так же как и статьи, адекватно отражают содержание диссертации.

Учитывая вышесказанное, следует утверждать, что диссертационная работа «Определение атомной структуры гетеросистем на основе  $A^3B^5$  комплексом методов электронной микроскопии», отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации

от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Трунькин Игорь Николаевич заслуживает искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

**Официальный оппонент:**

Заведующий отделом электронной кристаллографии Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН)

д.ф.-м.н.

Шифр специальности: 01.04.18

Тел.: 8(499) 135-10-20

E-mail: [avilovanatoly@mail.ru](mailto:avilovanatoly@mail.ru)

Авилов Анатолий Сергеевич



119333, Москва, Ленинский проспект, 59

Подпись Авилова А.С. заверяю:

Ученый секретарь ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН

к.ф.-м.н.



Просекков П.А.