

Заключение

диссертационного совета Д 520.009.01 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по диссертации Трунькина И.Н. «**Определение атомной структуры гетеросистем на основе A^3B^5 комплексом методов электронной микроскопии**», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертационный совет на основании выполненных соискателем исследований отмечает, что:

1) Разработан комплексный подход к анализу структурных свойств гетеросистем на основе A^3B^5 , включающий оценку напряжений, состава и совершенства гетерограниц различными методами. Комплекс включает в себя:

- высокоразрешающую просвечивающую растровую электронную микроскопию (ПРЭМ) с использованием кольцевого темнопольного высокоуглового детектора рассеянных электронов и корректора сферических аберраций;
- анализ интенсивности сигнала электронов с помощью темнопольных высокоугловых ПРЭМ изображений;
- анализ напряжений в слоях с помощью изображений с атомарным разрешением;
- энергодисперсионный рентгеновский микроанализ (ЭРМ).

2) Показана повышенная концентрация атомов In в области гетерограниц.

3) Определены степень и характер влияния различных факторов на структурные характеристики InGaAs/InAlAs гетеросистем, а именно:

- определены размеры гетеропереходов, размеры неровностей, концентрации дислокаций для гетеросистем, выращенных на точно ориентированных (100) и вицинальных (100+2°) подложках;
- установлено что гетеросистемы, выращенные на подложках (100), имеют меньшие размеры областей перемешивания и неровностей, а также более низкую концентрацию дислокаций, что приводит к росту подвижности электронов в таких гетеросистемах;
- определены параметры гетерограниц, включая размеры неровностей, для нескольких групп образцов, отличающихся разным количеством нановставок InAs, условиями формирования нановставок, присутствием барьерных слоев; эти данные использованы для сравнения с электрофизическими характеристиками;
- показано, что снижение соотношения потоков атомов групп V/III при формировании вставки InAs приводит к существенному повышению структурного качества слоя InAs; такая микроструктура границ характеризуется большей подвижностью электронов;

- показано, что введение нановставок InAs толщиной ~ 1.2 нм в квантовую яму (КЯ) InGaAs и нанобарьеров GaAs толщиной ~ 1 нм по границам КЯ не приводит к появлению структурных дефектов, но сопровождается образованием переходных слоев (In, Ga, Al)As, которые вызывают уменьшение подвижности. Несмотря на структурное совершенство гетерограниц в образцах с двумя нановставками, подвижность электронов падает, что можно объяснить ростом количества гетерограниц.

4) Установлено, что бóльшие размеры гетеропереходов и размеров неровностей негативно влияют на подвижность электронов.

5) Выявлены и исследованы дефекты упаковки с двумя частичными дислокациями Шокли:

- определено положение атомов в бездефектной структуре, внутри дефекта упаковки и в области частичных дислокаций;
- выявлено негативное влияние этих дефектов на качество слоев;
- предложена схема возникновения этих дефектов, контур Бюргера и определена проекция вектора Бюргера.

6) Установлено влияние ориентации подложки, давления As в камере роста, различного легирования Si (однородного по всей толщине пленки или в виде δ -слоев Si) и отжига на структурные особенности низкотемпературного GaAs (LT-GaAs), в том числе: на концентрацию дефектов, объемное распределение, концентрацию и размер преципитатов As.

- установлено соотношение потоков атомов групп V/III, при которых получают наименее дефектные пленки;
- определена зависимость концентрации дефектов в слоях LT-GaAs от ориентации подложки (на подложках GaAs (111)A она значительно выше, чем на подложках GaAs (100));
- выявлено, что отжиг образцов увеличивает размер монокристаллической области LT-GaAs;
- установлено, что преципитаты мышьяка, образуются после отжига только в монокристаллической области, что связано с отсутствием диффузии мышьяка в поры или в области межзеренных границ;
- установлено, что области δ -слоев Si аккумулируют мышьяк, формирующий преципитаты.

7) Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что результаты важны для понимания процессов формирования кристаллической структуры подобных гетеросистем. Определение кристаллической структуры необходимо для описания процессов рассеяния электронов, определяющих подвижность. Разработанный комплекс

методов позволит исследовать гетеросистемы на основе A^3B^5 и другие полупроводниковые гетеросистемы и определять структурные параметры на атомном уровне, связывая их с электрофизическими свойствами.

8) Практическая значимость результатов выражена в большом объеме экспериментальных данных, характеризующих рассмотренные образцы, их структурное качество, размеры слоев, концентрацию дефектов, состояние гетерограниц. Эти сведения позволяют оптимизировать ростовые методики с тем, чтобы получать структуры с необходимыми структурными и электрофизическими характеристиками.

9) Достоверность результатов работы подтверждается тем, что исследования гетеросистем проходили на аттестованном оборудовании известных мировых производителей. Для характеристики структур использовались неоднократно апробированные прецизионные методы исследования просвечивающей/растровой электронной микроскопии (ПЭМ/ПРЭМ).

10) Личный вклад. Большая часть работы на просвечивающем электронном микроскопе по получению изображений в светлопольном и высокоугловом темнопольном ПРЭМ и светлопольном ПЭМ режимах, регистрации электронограмм, проведения ЭРМ были проведены соискателем. Для проведения этих исследований автором были подготовлены все поперечные срезы образцов. Полученные данные были обработаны соискателем с помощью соответствующего программного обеспечения. Эти работы проводились в лаборатории электронной микроскопии НИЦ "Курчатовский институт".

Соискатель принимал участие в сравнительном анализе электрофизических и структурных характеристик объектов исследования с целью выявления корреляции между ними.

Соискатель принимал участие в подготовке шести публикаций к печати, и еще одна статья, посвященная дефектам упаковки, полностью написана им. Также соискатель участвовал в подготовке материалов и представлял результаты научной работы на научных конференциях, школах, симпозиумах и конгрессах.

* * *

Диссертационный совет пришел к выводу, что работа Трунькина И.Н. «Определение атомной структуры гетеросистем на основе A^3B^5 комплексом методов электронной микроскопии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней,

утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09. 2013 г. № 842.

На заседании 21 декабря 2017 г. диссертационный совет принял решение присудить Трунькину Игорю Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 5 докторов наук по специальности диссертации, участвовавших в заседании из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение ученой степени – 16,

против присуждения ученой степени – 0,

недействительных бюллетеней – 0.

Протокол счетной комиссии утвержден единогласно.