

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Трунькина И.Н. «Определение атомной структуры гетеросистем на основе A^3B^5 комплексом методов электронной микроскопии», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Трунькина И.Н. посвящена электронно-микроскопическим исследованиям атомной структуры полупроводниковых гетеросистем на основе материалов A^3B^5 , в частности, гетеросистем InGaAs/InAlAs с нановставками InAs и, так называемого, низкотемпературного (low temperature grown - LT) LT-GaAs, выращенного на подложке GaAs при сравнительно низких, менее 400°C , температурах. Она состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы из 126 наименований. Ее содержание изложено на 157 страницах, включая 60 рисунков и 18 таблиц.

Во введении диссертации обоснована актуальность выполненного исследования структуры полупроводниковых материалов на основе соединений A^3B^5 . Они играют особую роль в современной микро- и наноэлектронике, поскольку их электрофизические и оптические характеристики обеспечивают создание приборов, находящих самое широкое применение в современных научно-технических приложениях. Рассмотренные в диссертационной работе гетеросистемы InGaAs/InAlAs, выращенные на подложках GaAs и InP, позволяют создавать транзисторы с высокой подвижностью электронов, которые обладают быстродействием более 600 ГГц и поэтому являются перспективными для создания приборов сверхвысокочастотной наноэлектроники. Низкотемпературный LT-GaAs, структурные особенности которого также изучались в работе, характеризуется малым временем жизни неравновесных носителей заряда и, как следствие, большим электрическим сопротивлением. Он может использоваться в качестве материала для производства фотопроводящих антенн, способных генерировать и/или детектировать сигналы в диапазоне 1.0–5.0 ТГц, а также для создания быстродействующих оптических коммутаторов.

Для детального изучения структуры гетеросистем InGaAs/InAlAs и LT-GaAs, определяющей их электрофизические свойства, необходимо применение самых современных методов просвечивающей электронной микроскопии. Возможности этих методов в последнее время существенно расширились благодаря созданию приборов с коррекцией аберраций объективной линзы, обеспечивающих субангстремное разрешение.

Просвечивающая растровая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом и методами анализа изображений позволяют прецизионно анализировать атомарную структуру и состав нановключений и слоев полупроводниковых гетеросистем, изучать шероховатость границ между ними с высоким пространственным разрешением.

Первая глава посвящена обзору литературных данных по тематике диссертации. В ней приведены сведения о гетеросистемах на основе InGaAs/InAlAs, низкотемпературном LT-GaAs, выращенном на подложке GaAs, о методах формирования и исследования полупроводниковых гетероструктур, возникающих в них тетрагональных искажениях. Подробно рассмотрены электронно-микроскопические методы, включая растровую электронную микроскопию, высокоразрешающую электронную микроскопию и просвечивающую растровую электронную микроскопию, а также электронную микроскопию с дифракционным контрастом. В главе приводятся сведения о методе «геометрической фазы», используемом для количественного анализа полей деформаций, способах подготовки электронно-микроскопических образцов, описывается зависимость электрофизических характеристик гетеросистем от их структурных особенностей.

Во второй главе представлены параметры технологических процессов, использованных для выращивания многослойных гетеросистем методом молекулярно-лучевой эпитаксии, и данные о составе и толщине слоев, электрофизических характеристиках. В ней приводятся сведения об установке «ЦНА-21», на которой формировались исследованные гетеросистемы, оборудовании для приготовления электронно-микроскопических образцов и электронном микроскопе TITAN 80-300 TEM/STEM (FEI, USA), оснащенном корректором сферической абберации падающего пучка электронов.

Третья глава посвящена структурным исследованиям гетеросистем InGaAs/InAlAs с нановставками InAs с применением комплекса электронно-микроскопических методов. Основным из них является темнопольная высокоразрешающая просвечивающая растровая электронная микроскопия, которая позволяет получать изображения, чувствительные к атомному номеру рассеивающих колонок атомов (Z -контраст). Для оценки элементного состава слоев использовался энергодисперсионный рентгеновский микроанализ, для выявления напряжений – метод «геометрической фазы».

Исследования выполнялись для 4-х групп образцов, представляющих собой многослойные структуры:

- гетеросистемы с метаморфным буфером $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ и квантовой ямой $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.64}\text{Al}_{0.36}\text{As}$, выращенные на точно ориентированной (001) и разориентированной на 2° (100) полуизолирующих подложках GaAs;
- гетеросистемы с нановставками InAs различной толщины в слое InGaAs, выращенные при различных температурах на подложке InP;
- гетеросистемы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, содержащие тонкие вставки InAs и барьерные слои GaAs в слое InGaAs и выращенные на подложке InP;
- гетеросистемы с вставками InAs и без них, выращенные при разных давлениях на подложке InP.

Для указанных образцов определялись толщины слоев, протяженность переходных областей между ними, анализировалась их латеральная неоднородность и совершенство структуры, выявлялись дефекты и тетрагональные искажения кристаллической решетки. Полученные данные сопоставлялись с электрофизическими характеристиками гетеросистем, а толщины слоев сравнивались с их номинальными значениями, задаваемыми при формировании гетеросистем.

В четвертой главе представлены результаты исследований структуры слоев LT-GaAs, выращенных на подложках GaAs с ориентациями поверхности (100) и (111)A при низких температурах. Такие слои формировались при различных отношениях потоков мышьяка и галлия (γ) без их легирования, с однородным легированием кремнием, а также с созданием трех эквидистантных δ -слоев кремния. Выявлено влияние параметра γ и толщины слоя на его кристаллическую структуру, установлены условия роста, при которых он становится поликристаллическим, рассмотрено влияние отжига на формирование преципитатов мышьяка. С использованием данных энергодисперсионного рентгеновского микроанализа продемонстрировано, что между зернами поликристаллической структуры могут образовываться поры. На основе анализа изображений выявлено, что преципитаты мышьяка, формирующиеся после отжига в монокристаллической части нелегированных слоев, имеют размер около 10 нм и концентрацию, равную $(4-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для подложек GaAs (100), и не более $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для подложек GaAs (111)A. В случае GaAs (111)A они могут полностью отсутствовать, что может быть обусловлено большей дефектностью LT-GaAs слоев, растущих на таких подложках. Рассмотрены закономерности образования преципитатов в LT-GaAs пленках, в которых при их выращивании создавались δ -слои кремния.

Характеризуя диссертационную работу в целом, следует отметить, что она представляет собой выполненное на актуальную тему, законченное исследование, в котором с использованием самого современного оборудования экспериментально изучен

значительный объем образцов, представляющих интерес для современных приборных приложений. В диссертации получены новые результаты о структуре гетеросистем InGaAs/InAlAs с нановставками InAs и выращенных при низких температурах слоев LT-GaAs на подложках GaAs с ориентациями поверхности (100) и (111)A. Отметим основные из них.

1. Выполнено сравнение особенностей микроструктуры гетеросистем, сформированных на кристаллографически точно ориентированных и вицинальных подложках и показано, что в гетеросистемах, выращенных на разориентированных подложках, гетерограницы более размыты, в них больше размер шероховатостей гетерограниц и выше концентрация дефектов в области буферных слоев.

2. Показано, что введение нановставок InAs толщиной около 1.2 нм в квантовые ямы InGaAs и нанобарьеров GaAs толщиной около 1 нм по границам КЯ не приводит к появлению структурных дефектов при использованных технологических режимах эпитаксиального роста. Определены характеристики границ раздела: их протяженность и размеры областей перемешивания гетеросистем, в областях вставок GaAs обнаружен переходный слой (In, Ga, Al)As со сложным элементным профилем.

3. В гетеросистеме InAlAs/InGaAs/InAs выявлены дефекты упаковки типа внедрения с двумя частичными дислокациями Шокли и определена их кристаллическая структура, а также установлено негативное влияние этих дефектов на формирование слоев.

4. Обнаружено, что в пленках арсенида галлия, выращенного при низких температурах на подложках GaAs (100) с формированием трех эквидистантных δ -слоев Si при соотношении потоков атомов элементов групп V/III близком к 16 возникает упорядоченность в расположении преципитатов мышьяка с их аккумуляцией в окрестности δ -слоев Si.

Экспериментальные и расчетные результаты диссертационной работы получены при непосредственном участии ее автора. Экспериментальные исследования выполнялись с применением хорошо апробированных и обладающих высокой степенью достоверности методов просвечивающей электронной микроскопии. Основные результаты и научные выводы основываются на взаимодополняющих экспериментальных данных.

Основные научные положения и результаты диссертации опубликованы в 17 работах, включая 10 тезисов докладов на различных конференциях и симпозиумах и 7 статей в рецензируемых журналах, в том числе в 2 зарубежных, которые входят в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и реферируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

В диссертационной работе имеется ряд недочетов, перечисленных ниже.

1. В диссертации не проводится моделирование изображений изучаемых гетеросистем, расчетные изображения, представленные в начале 3-ей главы, имеют иллюстративный характер.

2. В диссертационной работе отсутствуют описание критериев, на основе которых получены численные значения толщин слоев многослойных гетеросистем, протяженности приграничных областей, а также оценки латеральной однородности этих слоев. Вместе с тем, следует отметить, что, например, толщины слоев, найденные из экспериментальных изображений и представленные в таблице 3.3.2.1, удовлетворительно согласуются с номинальными значениями, которые задавались при формировании гетеросистемы.

3. Хотя диссертация неплохо оформлена и достаточно ясно изложена, в ее тексте встречаются стилистические и грамматические погрешности (стр. 9, 14, 17 и др.).

Отмеченные недостатки не влияют на значимость полученных в диссертационной работе результатов и ее общую положительную оценку. Текст автореферата отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Грунькина И.Н. полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, и ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей физики,
начальник лаборатории электронной микроскопии

Н.И. Боргардт

Подпись Николая Ивановича Боргардта заверяю,
ученый секретарь МИЭТ,
кандидат технических наук, профессор



Н.М. Ларионов

Сведения о месте работы оппонента:

124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Заведующий кафедрой общей физики, начальник лаборатории электронной микроскопии

Телефон: (499) 720-85-58

Электронная почта: borgardt@miee.ru