

На правах рукописи

УДК 538.9, 539.21

Субботин Илья Александрович

РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА В ИЗУЧЕНИИ
ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОСТРУКТУР

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2007

Работа выполнена в Институте кристаллографии имени А.В. Шубникова
Российской академии наук

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Пашаев Эльхан Мехрали-оглы
кандидат физико-математических наук, доцент,
Зайцев Александр Александрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Асадчиков Виктор Евгеньевич
кандидат физико-математических наук, профессор
Смирнов Игорь Сергеевич

Ведущая организация

Физико-технологический институт РАН

Защита состоится «__» _____ 2007 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д002.114.01 в Институте кристаллографии имени
А.В. Шубникова Российской академии наук по адресу: 119333, г. Москва,
Ленинский пр-т, д. 59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института кристаллографии
имени А.В. Шубникова Российской Академии наук

Автореферат разослан «__» _____ 2007 г

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.114.01
кандидат физико-математических наук

Каневский В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С середины XX века, когда появились способы манипулировать отдельными атомами и молекулами, развитие науки пошло по пути создания новых, специально сконструированных материалов с заданными характеристиками. Такие материалы легли в основу устройств и приборов квантовой электроники, микро-, опто- и нанoeлектроники нового поколения, особенностью которых является использование многослойных гетерокомпозиций с нанометровыми размерами отдельных слоев.

Основным методом получения многослойных структур со сверхтонкими слоями является молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ). Этот метод позволяет слой за слоем, чередуя источники определенного сорта ионов или атомов, строить с атомарным разрешением различные структуры, в том числе, и несуществующие в природе. Как показали первые попытки исследования и практического использования структур с размерами менее 100 нм, поведение таких наноструктур качественно отличается от поведения систем с большими размерами. Уменьшение линейных размеров (хотя бы в одном измерении) кардинально меняет характер квантовых состояний электронов, ярко проявляя свойства, присущие системам пониженной размерности. Вследствие такого уменьшения размеров выращиваемых слоев граница раздела между двумя однородными составляющими имеет атомный масштаб. Эпитаксиальный рост на ориентированной атомно-гладкой поверхности подложки предполагает послойное наращивание полупроводникового соединения, как совпадающего с материалом подложки, так и существенно отличающегося своими характеристиками. Современные технологии роста позволяют создавать структуры с квантовыми точками, которые образуются в кристаллах на принципах самоорганизации, многослойные полупроводниковые гетерокомпозиции (в том числе сверхрешетки) с квантовыми ямами, проволоками и точками.

Однако, несмотря на уникальные возможности МЛЭ в создании структур с резкими границами между слоями, здесь ещё имеется много вопросов. Главная трудность заключается в существовании протяженных переходных областей переменного химического состава. Так, например, размытость гетерограниц влияет на рассеяние носителей заряда в канале, низкое структурное качество – на подвижность носителей и т.д. Необходимо, чтобы размеры переходных областей были сравнимы с постоянной кристаллической решетки.

Дальнейшее углубление знаний о гетероструктурах со сверхтонкими слоями не может быть осуществлено без детального исследования их строения и знания структурных параметров с высоким разрешением по глубине вплоть до отдельных монослоев, другими словами, детальная информация о структуре отдельных слоев и интерфейсов становится одной из наиболее важных предпосылок для дальнейшего прогресса в этой области.

Развитие технологических методов формирования полупроводниковых гетерокомпозиций, и, прежде всего, молекулярно-лучевой эпитаксии, позволило

создавать гетероструктуры с толщиной активной области до одного нанометра. Конструирование новых материалов, совершенствование их структуры и свойств, создание наноматериалов и наносистем на основе молекулярной архитектуры неразрывно связаны с использованием адекватных (атомного разрешения) диагностических средств.

В настоящее время вопрос получения наноконпозиций с заданными параметрами и характеристиками в силу своей актуальности занимает ведущее положение в развитых странах Запада. По существу решение этой задачи является приоритетным в вопросах дальнейшей экономической безопасности страны. О необходимости создания новых материалов и приборов на их основе свидетельствует то, что в последнее десятилетие в мире наблюдается интенсивное развитие в области научных исследований и промышленного освоения новых материалов СВЧ приборов, лазеров, приборов спинтроники и др.

Прогресс в получении высококачественных гетероструктур может быть достигнут путем оптимизации технологии их выращивания, что невозможно без детального изучения структурных характеристик получаемых гетеросистем.

В ряду методов исследования сложных гетероконпозиций с нанометровыми размерами слоёв рентгеновские методы диагностики занимают одно из ведущих мест. В силу информативности и высокой чувствительности к структурным нарушениям рентгеновские методы наиболее пригодны для исследования нарушенных приповерхностных слоев монокристаллов после различных технологических процессов обработки (имплантация, эпитаксия, различного рода травления поверхности и др.). Во-первых, в случае наноструктур и наноматериалов всегда имеется в виду либо системы с малым числом атомов, рассеивающих рентгеновское излучение, либо поверхность, рентгеновский сигнал от которой трудно выделить на фоне сильного рассеяния объемом исследуемого объекта. Во-вторых, выделив это слабое рентгеновское рассеяние от поверхности или наносистемы, необходимо измерить его с достаточной точностью. В то же время применение рентгеновского излучения для анализа наноматериалов и наноструктур связано с решением ряда сложных задач в области физики рассеяния рентгеновских лучей.

В представленной работе методы рентгеновской диагностики (рентгеновской дифрактометрии в различных схемах дифракции и рентгеновской рефлектометрии) были применены для изучения структурного совершенства полупроводниковых материалов и гетероконпозиций. Достоинствами этих методов являются как их неразрушающий характер, так и высокое пространственное разрешение, а также возможность изучения особенностей структуры с масштабами порядка длины волны рентгеновского излучения. При этом комбинирование различных экспериментальных методик позволяет получать более детальную информацию об исследуемой структуре.

Основной целью работы являлось изучение особенностей формирования полупроводниковых низкоразмерных гетероструктур и определение их структурных параметров методами рентгеновской диагностики для установления

связи условий роста гетероструктур на электрофизические характеристики и параметры создаваемых на их основе приборов, разработка новых методик обсчета экспериментальных кривых дифракционного отражения и рентгеновской рефлектометрии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Проведение анализа возможностей современных методов рентгеновской диагностики для решения широкого круга задач в области нанотехнологии.
- Разработка новой методики обсчета кривых дифракционного отражения от исследуемых гетеросистем с целью определения наиболее достоверной модели структуры и получения дополнительной информации.
- Проведение рентгенодиагностических исследований гетеросистем $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{IV}$ и $A^{II}B^{VI}$ с целью установления связи структурных параметров с их электрофизическими характеристиками и оптимизации технологии роста.
- Рентгенодиагностические исследования материалов спинтроники (разбавленных магнитных полупроводников) для проведения комплексного анализа с целью установления корреляция их структурных, магнитных, электрофизических и оптических свойств.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, а также разработанные методы анализа. В частности, методы одновременного обсчета экспериментальных данных рентгеновской дифрактометрии от нескольких кристаллографических плоскостей, а также совместный анализ данных рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Методами прецизионной рентгеновской дифрактометрии и высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии определены структурные параметры сверхрешеток Si/SiGe и CdSe/ZnSe, используемых в качестве активной области полупроводниковых лазеров. Показано, что проведение комплексного анализа позволяет получать достоверные результаты, служащие основой для улучшения структурных и электрофизических характеристик этих материалов. В частности, эти исследования позволили определить эллипсоидальную форму выращенных квантовых точек CdSe в матрице ZnSe.
- Проведение рентгенодиагностических исследований на всех этапах роста позволило установить оптимальные технологические параметры для получения высококачественных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках InP, предназначенных для изготовления СВЧ приборов.
- Проведены комплексные исследования структурных, магнитных и электрофизических свойств квантовых ям GaAs/Ga_{1-x}In_xAs/GaAs со слоем Mn толщиной 0.5-1.8 Мл, отделенным от квантовой ямы спейсером толщиной

3 нм. Впервые результаты магнитных и электрофизических свойств таких систем проанализированы на основе тщательного исследования их реальной структуры методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии. Восстановлены реальные профили распределения структурных параметров не только квантовых ям, но и очень тонких слоев Mn. Установлено, что распределение атомов Mn неоднородно как в плоскости структуры, так и в направлении ее роста, что позволило проанализировать особенности магнитных и транспортных свойств исследованных структур в рамках модели, основанной на представлении о разбиении объема образца на области ферромагнитного упорядочения и парамагнитные области.

- Методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии изучено строение псевдоморфной гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$. Использование методики одновременного анализа кривых дифракционного отражения от кристаллографических плоскостей (004) и (113) позволило установить размытие гетерограниц квантовой ямы InGaAs и спейсерного слоя AlGaAs. Показано, что электрофизические характеристики этих материалов непосредственно связаны со структурным качеством наноразмерных эпитаксиальных слоёв и состояния интерфейсов в этих структурах.

Достоверность научных результатов и выводов подтверждена их соответствием общепринятым теоретическим и экспериментальным фактам, согласием эксперимента с теорией, обеспечена публикациями и обсуждениями на российских и международных научных конференциях.

Практическая значимость

Примененный метод одновременного анализа кривых дифракционного отражения от нескольких кристаллографических плоскостей и данных рентгеновской рефлектометрии позволил не только уточнить структурные характеристики исследуемых гетерокомпозиций, но и получить дополнительную информацию об анизотропии распределения хаотических смещений атомов в плоскости слоев и перпендикулярно им. Этот подход может быть использован в дальнейшем путем одновременного анализа данных рентгеновской дифрактометрии в различных схемах дифракции и рентгеновской рефлектометрии.

Оптимизирована технология получения высококачественных гетероструктур на базе InGaAs/InAlAs на подложках InP, предназначенных для изготовления СВЧ приборов. Параметры двумерного электронного газа в таких гетероструктурах, измеренные при температурах 77К и 300К, не уступают мировому уровню и являются пригодными для изготовления транзисторов и интегральных усилителей, работающих на частотах 40 ГГц и более.

Результаты определения параметров слоев и гетерограниц в структурах с квантовыми ямами, квантовыми точками и сверхрешетками позволили оптимизировать технологические процессы роста сложных многослойных

гетерокомпозиций, пригодных для создания на их основе приборов с заданными характеристиками или же скорректировать характеристики уже готовых приборов.

Впервые результаты магнитных и электрофизических свойств разбавленных магнитных полупроводников проанализированы на основе тщательного исследования их реальной структуры методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, что позволило проанализировать особенности магнитных и транспортных свойств исследованных структур в рамках модели, основанной на представлении о разбиении объема образца на области ферромагнитного упорядочения и парамагнитные области.

Положения, выносимые на защиту

- Усовершенствованная методика одновременного анализа кривых дифракционного отражения от различных кристаллографических плоскостей и совместного анализа данных рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, позволяющая не только повысить достоверность информации о реальной структуре исследуемых образцов, но и получать дополнительную информацию об анизотропии распределения хаотических смещений атомов в плоскости слоев и перпендикулярно им, а также надёжно определить параметры ультратонких слоёв.
- Оптимизированная технология роста структур InGaAs/InAlAs на подложках InP, дающая возможность получать высококачественные гетеросистемы, предназначенные для создания СВЧ-приборов.
- Модель структур разбавленных магнитных полупроводников, основанная на представлении о разбиении 2D канала на ферромагнитные и парамагнитные области вследствие неоднородного распределения магнитных ионов для объяснения обнаруженных особенностей данных структурных и электрофизических исследований материалов спинтроники.
- Методика совместного анализа данных рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии, позволяющая установить распределение Mn в структуре РМП, а также определить параметры ультра-тонких слоев марганца.

Личный вклад автора

Автором проведены рентгенодифракционные и рефлектометрические измерения различных полупроводниковых наноразмерных гетероструктур ($A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{IV}$ и $A^{II}B^{VI}$).

Автор участвовал в отработке технологии получения высококачественных гетеросистем InGaAs/InAlAs на подложках InP. Непосредственно сразу после их выращивания, автором проводилась рентгеновская диагностика полученных образцов, по результатам которой проводилась коррекция условий роста.

С участием автора была разработана и опробована методика одновременного анализа кривых дифракционного отражения от различных кристаллографических плоскостей. Усовершенствованная методика позволила не только повысить

достоверность модели структуры, но и получить дополнительную количественную информацию об анизотропии хаотических смещений атомов в плоскости слоев и перпендикулярно им.

Проведенные автором рентгеновские измерения разбавленных магнитных полупроводников (РМП) позволили проанализировать их магнитные, электрофизические и транспортные свойства и установить их связь со структурными параметрами. Проведенный комплексный анализ РМП может рассматриваться как методика анализа магнитных материалов.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на XI и XII национальных конференциях по росту кристаллов (НКРК), Москва 2004, 2006; II Украинской научной конференции по физике полупроводников, Черновцы, Украина 2004; Международной научной конференции «Тонкие плёнки и наноструктуры», Москва 2004; V Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (РСНЭ), Москва 2005; International Conference «Micro- and nanoelectronics» ICMNE'05, Звенигород 2005; International Symposium on Compound Semiconductors, Фрайбург, Германия, 2005; 12th International conference on II-VI compounds, Варшава, Польша, 2005; International Conference «Crystal Materials 2005», Харьков, Украина, 2005; International Workshop on Semiconductor Nanocrystals, Будапешт, Венгрия, 2005; International Workshop on Nanostructured Materials, Анталия, Турция, 2006, 8th International Conference on Expert Evaluation and Control of Compound Semiconductor Materials and Technologies, Кадис, Испания, 2006; Конференции «Нанозлектроника-2007», Нижний Новгород, 2007.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах, 5 статей в трудах конференций, а также 14 тезисов докладов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 136 страниц, 52 рисунка и 12 таблиц, а также список цитируемой литературы из 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко обосновывается актуальность темы исследования, научная новизна представленных результатов, формулируется основная цель работы.

Первая глава состоит из трех разделов, в которых представлен обзор приборов квантовой электроники, микро, опто- и наноэлектроники на низкоразмерных гетероструктурах, проведен анализ методов получения многослойных наноконпозиций и их диагностики. Особое место в этой главе занимает анализ рентгеновских методов диагностики, которые благодаря своей высокой чувствительности, информативности и неразрушающему характеру широко используются для изучения структурных характеристик наноразмерных тонких пленок и многослойных структур.

Для получения таких объектов используют чаще всего механизмы эпитаксиального роста материала пленки на соответствующей монокристаллической подложке. Наибольшее распространение получил метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющий формировать совершенные монокристаллические слои различных материалов в условиях сверхвысокого вакуума. Этот метод успешно применяется для выращивания тонких пленок полупроводников, металлов, диэлектриков, магнитных материалов, высокотемпературных сверхпроводников и многих других веществ.

Все большее распространение для выращивания полупроводниковых сверхрешеток приобретает также технология роста из газовой фазы с использованием металлоорганических соединений (МОСVD). В этом методе также используется процесс эпитаксиального роста материалов на нагретой подложке при термическом разложении металлорганических соединений.

Как показано в этой главе, в последние годы было продемонстрировано много интересных возможностей применения наноразмерных гетероструктур в различных полупроводниковых приборах, таких как различного рода транзисторы (в том числе транзисторы с высокой подвижностью электронов), светоизлучающие диоды и лазеры, фотоприемники, пассивные оптические элементы, приборы и устройства спинтроники и др.

В свете вышеизложенного обосновывается применение рентгеновских методов диагностики материалов микро- и наноэлектроники.

Во *второй главе* диссертации описаны экспериментальные методики, используемые в данной работе – высокоразрешающая рентгеновская дифрактометрия и прецизионная рентгеновская рефлектометрия. Полностью описана методика получения кривых дифракционного отражения (КДО) и кривых рентгеновской рефлектометрии (КРР) и их теоретической обработки. Интегральная интенсивность отражения в точке θ_i определяется выражением:

$$I^{(n)}(\theta_i, \mathbf{p}) = I^{(D)}(\theta_i, \mathbf{p}_D) + I^{(d)}(\theta_i, \mathbf{B}), \quad (1)$$

где первый член в правой части описывает чисто дифракционное рассеяние, $\mathbf{p}_D = \{l_1, \dots, l_K, a_1, \dots, a_K, f_1, \dots, f_K\}$, K – число слоев в модели структуры. Особенностью используемой в данной работе методики анализа КДО является учет диффузного рассеяния (второй член в (1)), обусловленного несколькими причинами: во-первых, это тепловое диффузное рассеяние и рассеяние на дефектах кристаллической решетки, как подложки, так и выращенной гетероструктуры; во-вторых, рассеяние на шероховатостях границ. Диффузное рассеяние от

гетероструктур, зависящее от набора параметров \mathbf{B} , $\mathbf{p}=\{\mathbf{p}_D, \mathbf{B}\}$ – вектор всех искомых параметров, в отличие от дифракционного, не является когерентным. Поэтому угловая зависимость диффузного рассеяния не имеет осциллирующего характера, так что его можно аппроксимировать кусочно-гладкой функцией типа [1]

$$I^{(d)}(\theta_i, \mathbf{B}) = B_j + (B_{j+1} - B_j) \frac{\theta_i - \tilde{\theta}_j}{\tilde{\theta}_{j+1} - \tilde{\theta}_j}, \quad (2)$$

где $\theta_i \in (\tilde{\theta}_j, \tilde{\theta}_{j+1})$, а угловые интервалы $(\tilde{\theta}_j, \tilde{\theta}_{j+1})$, на которых функция $I^{(d)}$ непрерывную производную

Для анализа кривых рефлектометрии в данной методике было использовано аналогичное (1) выражение, описывающее интегральную интенсивность отражения под малым углом θ_i :

$$I^{(n)}(\theta_i, \mathbf{p}) = I^{(R)}(\theta_i, \mathbf{p}_R) + I^{(d)}(\theta_i, \mathbf{B}), \quad (3)$$

где первый член в правой части описывает чисто зеркальное отражение, а второй – диффузное рассеяние. В отличие от интенсивности дифракционного рассеяния интенсивность зеркального отражения определяется не сверткой кривых отражения от образца и кристалла монохроматора, а усреднением коэффициента отражения от исследуемого образца по системе щелей в экспериментальной схеме:

$$I^{(R)}(\theta_i, \mathbf{p}_R) = \frac{I_0}{A_S} \int_S P_S(\theta_i, \theta) P_{Rs}(\theta_i - \theta, \mathbf{p}_D) d\theta, \quad (4)$$

где $A_S = \int_S P_S^{(0)}(\theta) d\theta$ – интегральный коэффициент отражения в отсутствие образца,

$P_S(\theta_i, \theta)$ – функция плотности распределения интенсивности излучения по углу θ с учетом геометрических эффектов, распределения по длинам волн и свертки с кривой отражения от кристалла монохроматора,

$$P_{Rs}(\theta, \mathbf{p}_R) = |R_K(\theta, \mathbf{p}_R)|^2 - \quad (5)$$

коэффициент отражения от исследуемого образца, а расчет амплитуды отражения от K слоев $R_K(\theta, \mathbf{p}_R)$, как функции параметров \mathbf{p}_R ведется с помощью рекуррентных соотношений, впервые введенных Парратом [2].

Рентгенодифракционные методы в различных геометриях успешно применяются для исследования кристаллических объектов: совершенных монокристаллов, подвергнутых ионной имплантации, травлению, искаженных кристаллов, эпитаксиальных структур и сверхрешеток. Анализ экспериментальных данных позволяет получить информацию о структуре: кристаллическое качество, профили и тензоры напряжения в деформированных объектах, толщины нарушенных или выращенных слоев, морфологию границ раздела и поверхности, основные характеристики искусственно созданных периодических структур.

Методы рентгеновской рефлектометрии, основанные на эффекте полного внешнего отражения рентгеновских лучей, используются для эффективного

анализа приповерхностных областей не только кристаллических, но и аморфных, а также органических объектов. Эта методика чрезвычайно чувствительна к изменению электронной плотности в исследуемых структурах и позволяют извлекать следующую информацию: толщины кристаллических и аморфных слоев, профиль изменения плотности по глубине образца, шероховатости поверхности и межслойных границ, наличие корреляции в шероховатостях на различных интерфейсах (наследование шероховатостей), а также анализ периодических структур.

Третья глава содержит результаты экспериментальных исследований и их обсуждения. Глава состоит из четырех разделов. Первый раздел посвящен изучению особенностей формирования полупроводниковых гетероструктур $A^{III}B^V$, отработке технологии получения высококачественных гетероструктур на основе InP. Во втором разделе приводятся результаты исследований гетеросистем, предназначенных для создания полупроводниковых лазеров. Третий раздел посвящен изучению разбавленных магнитных полупроводников, составляющих основу приборов спинтроники. Отработке и усовершенствованию методики одновременного анализа кривых дифракционного отражения от нескольких плоскостей низкоразмерных многослойных гетерокомпозиций посвящен четвертый раздел. В начале каждого раздела приводится небольшой литературный обзор, в котором отражена проблематика изучения рассматриваемых гетероструктур, а также их применение в приборах микро- и нанoeлектроники.

В **первом разделе** представлена отработка технологии получения высококачественных гетероструктур InGaAs/InAlAs, выращенных на подложках InP. Использование InP подложек позволяет повысить содержание In в твердых растворах InGaAs и InAlAs до 70%, что приводит к увеличению значений подвижности и дрейфовой скорости электронов. Это делает приборы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на InP наиболее быстрыми из всех известных на сегодняшний день.

Приведён полный технологический маршрут, начинающийся с выбора подложек для выращивания гетероструктур. Показано, что состав и параметры слоёв итоговых гетерокомпозиций соответствуют заданным технологическим параметрам. Характеристики двумерного электронного газа в этих образцах не уступают мировому уровню и такие гетероструктуры можно использовать для изготовления высокоскоростных транзисторов и интегральных усилителей, работающих на частотах 40 ГГц и более. На подложках InP по отработанной технологии роста могут быть изготовлены n-p-n – p-n-p двухтактные усилители, которые имеют большую линейность и улучшенный по сравнению с обычными усилителями КПД. Технология n-p-n – p-n-p также может быть использована для проектирования СВЧ операционных усилителей, применяемых в различных модулях систем связи.

Второй раздел посвящен гетероструктурам, представляющих основу для создания новых приборов и устройств – квантово-каскадных лазеров и лазеров синего-зеленого диапазона, актуальных в последнее время. Объектами исследования

были сверхрешетки $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и структуры с квантовыми точками CdSe-ZnSe , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs и Si-Ge . Анализ полученных КДО и КРР от этих структур позволил определить их реальные структурные параметры. Показано, что в процессе роста гетероструктуры Si-SiGe толщины слоев Si увеличиваются, а слоев SiGe - уменьшаются, в то время как средний период сверхрешетки остается практически неизменным. Предложена эллипсоидальная модель квантовых точек CdSe , расположенных по обеим сторонам границ раздела CdSe и ZnSe (рис. 1), которая была успешно подтверждена данными просвечивающей электронной микроскопии. Показана возможность получения полупроводниковых структур $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ на специально подготовленных подложках Si-Ge . Результаты проведенных исследований позволили оптимизировать технологию получения высококачественных гетероструктур квантовой электроники.

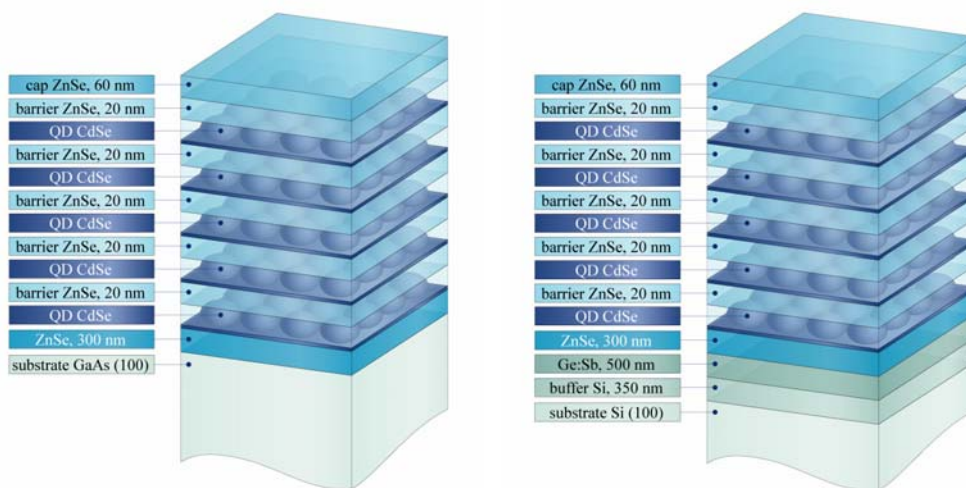


Рис. 1. Модель структуры с кв. точками CdSe-ZnSe на подложках GaAs и Si .

В третьем разделе приводятся результаты комплексного исследования разбавленных магнитных полупроводников (РМП) $\text{GaAs}/\delta\text{-Mn}/\text{GaAs}/(\text{In,Ga})\text{As}/\text{GaAs}$, представляющие собой базу для создания спинтронных устройств.

Образцы были выращены по методу МОС-гидридной эпитаксии и представляли собой квантовую яму $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ шириной $d \approx 10$ нм в матрице GaAs . Со стороны буфера было произведено дельта-легирование углеродом для создания p -типа проводимости в квантовой яме. Дельта слой Mn создавался лазерным испарением мишени и был отделен от квантовой ямы спейсером GaAs шириной около 3 нм. Наличие оптимальной толщины спейсера около 3 нм связано с ненулевой толщиной слоя Mn , поскольку при толщине спейсер-слоя менее 3 нм происходит резкое изменение энергии активации проводимости. Это связано с тем, что с уменьшением толщины спейсера атомы Mn попадают в объем квантовой ямы, что приводит к изменению энергии акцепторных уровней, связанных с Mn .

Было исследовано три образца, демонстрирующие два возможных типа температурной зависимости проводимости: квазиметаллический (образец **A**), соответствующий слабой неактивационной зависимости проводимости от температуры, характерной для сильноупорядоченных металлических образцов, и полупроводниковый (образец **B**) характер, соответствующий экспоненциальному спаду проводимости при стремлении температуры к нулю. Образец **C**, не содержащий магнитных атомов, в котором вместо δ -слоя марганца был выращен δ -слой углерода, являлся тестовым образцом и приведен для сравнения.

Структурные характеристики РМП были исследованы методами высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии (рис. 2) и прецизионной рентгеновской рефлектометрии (рис. 3). Восстановлены реальные профили исследованных гетероструктур (рис. 4).

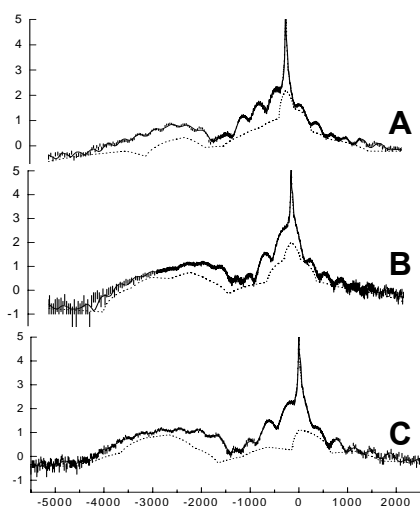


Рис. 2. КДО от исследуемых образцов

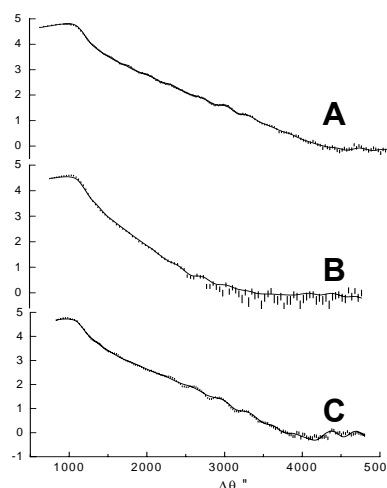


Рис. 3. КРР от исследуемых образцов

В случае наличия на поверхности подложки тонкого слоя с отличающимся параметром кристаллической решетки, форма КДО обусловлена главным образом когерентным сдвигом относительно подложки атомных плоскостей верхнего, достаточно толстого слоя GaAs за счет находящейся между ними тонкой квантовой ямы. Наличие такого сдвига приводит к появлению дополнительной разности фаз между амплитудами рассеяния рентгеновских лучей от верхнего слоя и от подложки [3]

$$\Phi_{layer} = K_h \frac{\Delta a_{\perp}}{a} L_{layer}, \quad (6)$$

где K_h – модуль вектора обратной решетки для выбранного отражения h , $\Delta a_{\perp}/a$ – относительное изменение параметра кристаллической решетки в перпендикулярном отражающим плоскостям направлении, L_{layer} – толщина слоя.

При этом, параметры $\Delta a_{\perp}/a$ и L самой квантовой ямы определяются достаточно хорошо в силу наличия на КДО широкого брэгговского пика от этого слоя. Однако очень тонкие слои Mn и границы раздела дают вклад в КДО только в

виде фазы типа (6), так что параметры $\Delta a_{\perp}/a$ и L для этих слоев сильно коррелируют, и одновременно их определить нельзя. В частности, все три КДО на рис. 2 одинаково хорошо могут быть описаны не только в рамках результирующих моделей структур, показанных на рис. 4 (отражающих, в частности, диффузию атомов Mn в спейсер-слой), но и в рамках моделей, когда атомы Mn сосредоточены в очень узком δ -слое, как это и было заложено в технологии (например, рис. 5). Для устранения подобной неоднозначности необходимо привлекать дополнительные методы структурной диагностики.

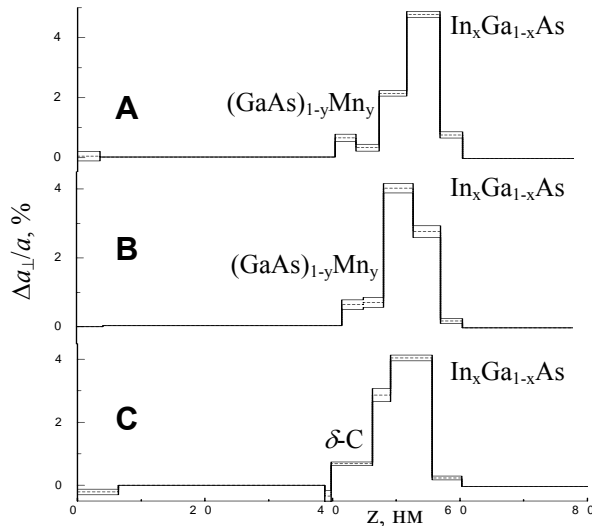


Рис. 4. Профили распределения относительного изменения параметра решетки по глубине исследованных гетероструктур

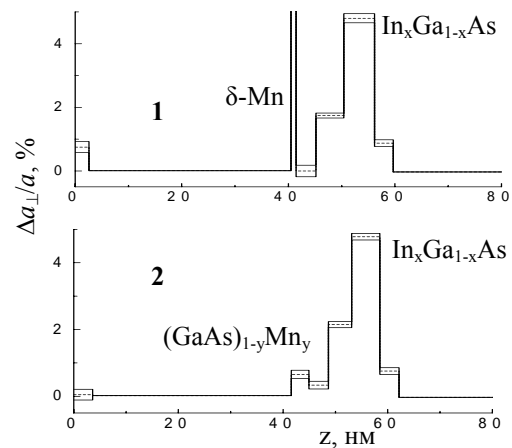


Рис. 5. Профили распределения изменения параметра решетки по глубине исследуемого образца **A** в моделях **1** ($\chi^2=1.56$) и **2** ($\chi^2=1.60$)

Специфика исследованных структур заключается в том, что относительная разность электронных плотностей матрицы GaAs и квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ составляет доли процента, тогда как электронная плотность GaAs приблизительно в два раза отличается от соответствующего значения для Mn. Именно это обстоятельство и позволяет извлекать более детальную информацию о структуре δ -слоев в исследованных образцах методом рентгеновской рефлектометрии, поскольку амплитуда зеркального отражения определяется главным образом распределением электронной плотности по глубине исследуемой структуры.

Осцилляции на хвостах кривых рефлектометрии (рис. 3) обусловлены все тем же когерентным сдвигом относительно подложки атомных плоскостей верхнего слоя GaAs за счет находящегося между ними δ -слоя Mn. Однако, в отличие от КДО, амплитуда осцилляций пропорциональна разности электронных плотностей GaAs и Mn [4], а соответствующие биения модулированы синусоидой с плавно меняющейся фазой

$$\Phi_{Mn}(\theta) = 2\pi \frac{l_{Mn}}{\lambda} \theta. \quad (7)$$

Именно эти обстоятельства и снимают фазовую проблему (6) для очень тонких слоев.

Совместный анализ данных прецизионной рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии позволил надежно восстановить реальные профили распределения структурных параметров не только квантовых ям, но и очень тонких слоев Mn. Именно это обстоятельство и позволило понять нетривиальные транспортные и магнитные свойства исследованных гетерокомпозиций. Предложена модель поведения Mn в структуре РМП, согласно которой атомы Mn отсутствуют в объеме квантовой ямы. При этом, проводимость и эффект Холла таких структур, определяемые транспортом дырок по квантовой яме, демонстрируют свойства присущие ферромагнитным системам, которые свидетельствуют о наличии спиновой поляризации носителей в квантовой яме.

Развитие метода рентгеновской дифрактометрии представлено в **четвертом разделе** диссертации. В данном разделе представлена усовершенствованная методика одновременного анализа кривых дифракционного отражения, полученных от различных кристаллографических плоскостей. Впервые, данная методика была опробована на простых структурах в работе [5]. В настоящей работе усовершенствованная методика одновременного анализа, была применена для сложной многослойной псевдоморфной гетероструктуры AlGaAs/InGaAs/GaAs.

КДО от разных кристаллографических плоскостей несут информацию об одной и той же структуре. И для устранения различия параметров структуры, полученных из раздельного анализа, необходимо проводить одновременный анализ этих КДО. В этом случае при подгонке нескольких КДО варьируются те же параметры, что в случае раздельного обсчета КДО: толщины слоев l_j и искажения кристаллической решетки $\Delta a_{j\perp}/a_j$. Но в отличие от раздельного анализа, статистические факторы Дебая-Валлера для разных отражений будут по-разному геометрически связаны с одним и тем же распределением хаотических смещений атомов из регулярных позиций. Например, в простейшем случае изотропного распределения хаотических смещений u степень аморфизации j -го слоя для i -го отражения будет определяться выражением:

$$f_{ij} = \exp(-K_i^2 \bar{u}_j^2), \quad (8)$$

где K_i – модуль вектора обратной решетки, соответствующего i -му отражению, а

$$\bar{u}_j = \sqrt{\langle u^2 \rangle_j} - \quad (9)$$

среднеквадратичное смещение атомов из регулярной позиции. В такой ситуации естественно выбрать в качестве параметров многослойной гетероструктуры не степень аморфизации j -го слоя f_j , а соответствующие значения \bar{u}_j . Помимо этого при обработке методики одновременного анализа варьировались также параметры диффузного рассеяния, индивидуальные для каждого отражения.

Для планарных систем, которыми являются многослойные гетероструктуры, предположение об изотропном распределении хаотических смещений атомов от

регулярных позиций не столь очевидно, поскольку смещения атомов в плоскости слоев и в направлении роста гетероструктуры могут существенно различаться. В этом случае вместо среднеквадратичного смещения атомов \bar{u}_j можно ввести среднеквадратичные смещения атомов из регулярной позиции в плоскости слоев $\bar{u}_{j\parallel} = \sqrt{\langle u_{\parallel}^2 \rangle_j}$ и в направлении роста $\bar{u}_{j\perp} = \sqrt{\langle u_{\perp}^2 \rangle_j}$. Тогда степень аморфизации j -го слоя для i -го отражения будет определяться следующим выражением:

$$f_{ij} = \exp\left(-K_{i\perp}^2 \bar{u}_{j\perp}^2 - K_{i\parallel}^2 \bar{u}_{j\parallel}^2\right), \quad (10)$$

где $K_{i\parallel}$ и $K_{i\perp}$ – проекции вектора обратной решетки, соответствующего i -му отражению, на плоскость слоев и направление роста, соответственно. В такой ситуации естественно увеличивается количество внутренних параметров, характеризующих многослойную гетероструктуру.

В итоге была отработана методика одновременного анализа кривых дифракционного отражения от нескольких кристаллографических плоскостей, позволяющая не только получить более достоверную модель структуры, но и количественно оценить анизотропию хаотических смещений атомов из регулярных позиций в слоях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты и выводы, полученные при выполнении настоящей работы, заключаются в следующем:

1. Оптимизирована методика обсчета кривых дифракционного отражения. Показано, что одновременный анализ кривых дифракционного отражения от нескольких кристаллографических плоскостей позволяет не только повысить достоверность модели структуры, но и получить дополнительную информацию об анизотропии распределения хаотических смещений атомов в плоскости слоев и перпендикулярно им.
2. Показано, что совместный анализ экспериментальных данных рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии позволяет получить всестороннюю и достоверную информацию о параметрах и качестве исследуемых сложных многослойных гетероструктур.
3. Методами прецизионной двухкristальной рентгеновской дифрактометрии и высокоразрешающей рентгеновской рефлектометрии исследованы сверхрешетки ZnSe-CdSe и Si-Si_{1-x}Ge_x с целью определения их структурных параметров. Показано, что их совместный анализ позволяет выбрать наиболее достоверную модель исследуемой структуры. В результате проведенного анализа была оптимизирована технология получения этих гетероструктур.
4. Определены структурные параметры сложных псевдоморфных гетерокомпозиций InGaAs/GaAlAs на подложках GaAs, предназначенных для создания СВЧ – транзисторов. Корректировка технологии роста таких гетероструктур с учетом полученных рентгенодиагностических

результатов позволила создать твердотельные приборы с заданными характеристиками

5. Установлены оптимальные параметры роста для получения высококачественных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках InP, Получаемые гетероструктуры пригодны для создания на их основе транзисторов и интегральных усилителей, работающих на частотах 40 ГГц и более.
6. Определены структурные характеристики разбавленных магнитных полупроводников. Предложена процедура анализа транспортных, магнитных и электрофизических свойств, основанная на их структурной диагностике.
7. Предложена модель поведения Mn в структуре РМП, согласно которой атомы Mn отсутствуют в объеме квантовой ямы. При этом, проводимость и эффект Холла таких структур, определяемые транспортом дырок по квантовой яме, демонстрируют свойства присущие ферромагнитным системам, которые свидетельствуют о наличии спиновой поляризации носителей в квантовой яме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. M.A. Chuev, A.M. Afanas'ev, R.M. Imamov, E.Kh. Mukhamedzhanov, E.M. Pashaev, S.N. Yakunin. Structural diagnostics of "quantum" layers by X-ray diffraction and standing waves. Proceedings of SPIE. Micro- and Nanoelectronics. 2004. V 5401. № 543
2. Parratt L.G. Surface studies of solids by total reflection of x-rays. Phys. Rev. 1954. V. 95. № 2. P. 359-369
3. Афанасьев А.М., Чуев М.А., Имамов Р.М. и др. Двухкристальная рентгеновская дифрактометрия в роли метода стоячих рентгеновских волн. Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74. № 10. С. 560
4. Чуев М.А., Субботин И.А., Пашаев Э.М. и др. Фазовые соотношения в анализе кривых рентгеновской рефлектометрии от сверхрешеток. Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85. № 1. С. 21.
5. Чуев М.А., Ломов А.А., Имамов Р.М. Одновременный анализ кривых двухкристальной рентгеновской дифрактометрии от семейства кристаллографических плоскостей. Кристаллография. 2006. Т. 51. № 2. С. 208.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Имамов Р. М., Мокеров В. Г., Пашаев Э. М., Субботин И. А., Федоров Ю. В. Исследование структурных свойств гетеросистем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ на подложках InP. Кристаллография. 2005. Том 50. № 2. С. 356-362
2. Якунин С.Н., Пашаев Э.М., Зайцев А.А., Субботин И.А., Рзаев М.М., Имамов Р.М. Структура сверхрешеток $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ по данным рентгеновских методов диагностики. Микроэлектроника. 2005. Том 34. № 4. С. 291-300
3. Murvetali M. Rzaev, Igor P. Kazakov, Vladimir I. Kozlovski, Yan K. Skasyrsky, Evgeny E. Onishchenko, Friedrich Schäffler, Gunter Hesser, Elkhani M. Pashaev,

- Iliia A. Soubbotin. Growth, structural and optical studies of CdSe/ZnSe nanostructures grown by MBE on GaAs and Si substrates. *Physica Status Solidi (c)*. 2006. V. 3. No. 3. P. 536-539
4. Чуев М.А., Субботин И.А., Пашаев Э.М., Квардаков В.В., Аронзон Б.А. Фазовые соотношения в анализе кривых рентгеновской рефлектометрии от несовершенных сверхрешеток. *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т. 85. Вып. 1. С. 21-26
 5. Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Мокеров В.Г., Черечукин А.А., Имамов Р.М., Пашаев Э.М. Влияние температуры роста спейсерного слоя на электрофизические и структурные свойства РНЕМТ структур. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. № 4. С. 50-55
 6. Субботин И.А., Чуев М.А., Пашаев Э.М., Галиев Г.Б., Имамов Р.М. Рентгеновская диагностика псевдоморфной AlGaAs/InGaAs/GaAs композиции. *Кристаллография*. 2007. Т. 52. № 4. С. 638-644
 7. Зайцев А.А., Субботин И.А., Пашаев Э.М., Якунин С.Н., Рзаев М.М., Имамов Р.М. Исследование реальной структуры гетеросистем Si/Si_{1-x}Ge_x методами рентгеновской диагностики. *Материалы Международной научной конференции «Тонкие плёнки и наноструктуры»*. 2004. Плёнки - 2004. Часть 1. С. 49-57.
 8. Pashaev E., Imamov R., Kanevsky V., Subbotin I. Study of Structural Properties of Multilayer Heterosystems by X-Ray diagnostic methods. *Proceedings of the first International Workshop on Semiconductor Nanocrystals. SEMINANO'2005*. 2005. Budapest. V.1. P.107-110
 9. Пашаев Э.М., Субботин И.А., Чуев М.А., Аронзон Б.А., Квардаков В.В., Лихачев И.А., Голованов А.Е. Рентгенодифракционные исследования материалов спинтроники. *Труды конференции «Нанофизика и нанoeлектроника-2007»*. Март 10 – 14. Нижний Новгород. С. 245-246
 10. М.А. Чуев, И.А. Субботин, Э.М. Пашаев, В.В. Квардаков, Б.А. Аронзон, А.Е. Голованов, П.Г. Медведев, В.В. Подольский. Структурные характеристики магнитных дискретных сплавов по данным рентгеновской рефлектометрии. *Труды конференции «Нанофизика и нанoeлектроника-2007»*. Март 10 – 14. Нижний Новгород. С. 247-248
 11. Аронзон Б.А., Рыльков В. В., Панков М.А., Пашаев Э.М., Чуев М.А., Субботин И.А., Звонков Б.Н., Данилов Ю.А., M. Goiran. Магнитотранспорт и магнитные свойства квантовых ям GaAs/InGaAs/GaAs с δ – легированным слоем Mn в GaAs. *Труды конференции «Нанофизика и нанoeлектроника-2007»*. Март 10 – 14. Нижний Новгород. С. 154-157