

На правах рукописи

ВИНИЧЕНКО АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ВАРИЗОННЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ**

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва, 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: **Васильевский Иван Сергеевич**
кандидат физико-математических наук,
доцент НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: **Ковалев Алексей Николаевич**
доктор физико-математических наук,
профессор НИТУ МИСиС

Кытин Владимир Геннадьевич
кандидат физико-математических наук,
доцент МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Физико-технологический институт
Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится «25» февраля 2015 года в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.130.04 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте:
<http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан «___» января 2015 года.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Чернов И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Квантоворазмерные гетероструктуры АЗВ5 на подложках GaAs в настоящее время являются наиболее широко используемым материалом для изготовления современных приборов сверхвысокочастотной электроники. Несмотря на то, что гетеросистема AlGaInAs используется уже более 30 лет, развитие подходов к инженерии конструкций гетероструктур и технологии их создания актуально и сегодня. Важнейшие тенденции в эволюции СВЧ транзисторов – повышение граничной частоты усиления, снижение шумов, увеличение к.п.д., наноминиатюризация длины затвора, остро ставят необходимость дальнейшей оптимизации гетероструктур, используемых в СВЧ электронике. На этом пути не только выбор состава и толщины слоев, но и применение неоднородных слоев, вариации состава по толщине или использование нановставок и сверхрешеток создает дополнительные степени свободы для инженерии гетероструктур.

Наиболее широко используемой в промышленном производстве приборов СВЧ электроники для создания транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) в диапазонах частот от ~10 ГГц и вплоть до ~60 ГГц является PHEMT (pseudomorphic high electron mobility transistor) гетероструктура с квантовой ямой (КЯ) AlGaAs/InGaAs/(Al)GaAs на подложке GaAs. Исследованиям таких структур посвящено большое количество зарубежных и отечественных работ, и наиболее типичные конструкции PHEMT структуры уже достаточно хорошо проработаны. Из актуальных проблем, ограничивающих применение PHEMT, можно отметить невысокое пробивное напряжение и ограниченную концентрацию электронов в КЯ. Заметную роль в ухудшении параметров при росте концентрации электронов играют эффекты, вызывающие падение подвижности электронов, в том числе за счет ограниченной глубины квантовой ямы.

В качестве одного из дальнейших подходов по совершенствованию PHEMT гетероструктур возможно использование варизонного слоя канала – квантовой ямы InGaAs с изменяющимся профилем состава. Известно, что легирование и заполнение квантовой ямы электронами приводит к появлению изги-

ба дна зоны проводимости в структуре. Сложный профиль потенциала является неотъемлемым свойством легированных гетероструктур, изгиб и наклон дна в квантовой яме являются причиной изменений уровней энергии и формы волновых функций электронов и дырок. Этот фактор влияет на рассеяние электронов в квантовой яме и их подвижность. Использование варизонной КЯ позволяет скомпенсировать изгиб дна квантовой ямы, возникающий в легированной структуре.

Цель и задачи работы

Цель работы: разработка подхода по использованию полупроводниковых слоев переменного состава при формировании квантовой ямы в РНЕМТ гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/(Al)GaAs для улучшения электронных транспортных свойств.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Разработана технология МЛЭ роста для создания варизонных слоев $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ с высоким градиентом состава.
2. Проведено численное моделирование зонной структуры КЯ с варизонным каналом в РНЕМТ гетероструктурах с односторонним и двусторонним δ -легированием для анализа влияния неоднородного профиля КЯ на энергию электронных подзон и профили волновых функций.
3. Проанализированы структурные свойства экспериментальных образцов при помощи рентгеновской дифрактометрии и просвечивающей электронной микроскопии.
4. Исследовано влияние неоднородного профиля КЯ на электронные транспортные свойства и спектры фотолюминесценции (ФЛ) в экспериментальных образцах с односторонним и двусторонним δ -легированием.
5. Проведен анализ и обобщение полученных экспериментальных данных.

Научная новизна работы

1. Разработан метод создания РНЕМТ гетероструктур с переменным профилем состава КЯ, позволяющий получать перепад состава до 1,2 %/нм.

2. Впервые теоретически и экспериментально выявлен механизм влияния профиля дна КЯ на электронные транспортные свойства в 2δ-РНЕМТ гетероструктурах с варизонным каналом.
3. Методом спектроскопии фотолюминесценции выявлены закономерности влияния плавного изменения профиля состава КЯ на сдвиг энергии оптических переходов в КЯ РНЕМТ гетероструктур.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы связана с возможностью реализовать подходы наноинженерии при создании структур с заданными параметрами и исследованием энергетического спектра и явлений переноса электронов в РНЕМТ гетероструктур с переменным профилем состава КЯ $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}/\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}/\text{GaAs}$. В работе применен комплексный подход к разработке и реализации структур такого типа, исследованию их структурных, электронных транспортных и оптических свойств.

Практическая ценность работы связана с тем, что исследованные РНЕМТ гетероструктуры с КЯ $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}/\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$ применяются в качестве базового материала для создания малошумящих и мощных транзисторов СВЧ диапазона. Таким образом, результаты данной диссертационной работы позволяют не только увеличить частотный диапазон работы СВЧ устройств на основе такого типа гетероструктур, но также увеличить их удельную мощность.

В работе разработаны и экспериментально созданы гетероструктуры с переменным профилем состава КЯ, которые могут успешно использоваться в качестве основы для создания СВЧ транзисторов и схем на их основе миллиметрового диапазона длин волн.

Неоднородный профиль состава КЯ позволяет управлять как расстоянием между подзонами размерного квантования, так и разрывом между подзонами электронов и дырок. Эта дополнительная степень свободы может быть полезна для инженерии гетероструктур с управляемой энергией и интенсивностью оптических переходов, что важно для оптоэлектронных приложений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанный метод создания НЕМТ гетероструктур с псевдоморфной КЯ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}/\text{GaAs}$ при пониженной скорости роста: $v_{\text{GaAs}} \sim 6$ нм/мин, позволяющий получать перепад состава до 1,2 %/нм.
2. Обоснованный механизм увеличения электронной подвижности при достижении оптимального профиля состава InAs в КЯ РНЕМТ гетероструктуры с односторонним δ -легированием вследствие уменьшения рассеяния электронов на удаленных ионизированных донорах и шероховатостях гетерограниц за счет увеличения амплитуды волновой функции электронов в центральной области КЯ.
3. Установленную зависимость подвижности и концентрации электронов от профиля состава y_{InAs} в неоднородных КЯ $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ РНЕМТ гетероструктур с двусторонним δ -легированием.
4. Обоснованный механизм увеличения концентрации электронов в подзонах КЯ с оптимальным профилем состава InAs в двусторонне-легированных РНЕМТ гетероструктурах за счет увеличения эффективной глубины КЯ.
5. Обнаруженный эффект смещения положения оптических переходов в варизонных КЯ РНЕМТ гетероструктур, обусловленный управляемым изменением профиля дна КЯ электронов и дырок.

Достоверность научных положений, результатов и выводов

Достоверность научных результатов обусловлена применением общепризнанных современных экспериментальных методов: молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ), метода Ван дер Пау. Полученные результаты работы неоднократно апробированы на международных и Российских конференциях и не противоречат ранее известным физическим принципам.

Личный вклад соискателя

Соискателем был выполнен анализ литературных данных по тематике диссертации, моделирование зонных диаграмм, расчет параметров эпитаксиального роста, комплекс работ по экспериментальному получению гетероструктур методом МЛЭ, измерение электронных транспортных свойств методом Ван дер Пау, анализ измеренных кривых дифракционного отражения, спектров фотolumинесценции и ПЭМ-исследований, а также определение скоростей роста и составов гетероэпитаксиальных слоев выращенных гетероструктур.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на 2-ой, 3-ей и 5-ой Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2012, 2013 и 2014 гг.); XI Российской конференции по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013 г.); 19 International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (St. Petersburg, 2013); Научной сессии МИФИ (Москва, 2008 г.); Научной сессии НИЯУ МИФИ (Москва, 2012, 2013 и 2014 гг.); школе молодых ученых «Физические проблемы нанoeлектроники, нанотехнологии и микросистем» (Москва, 2013 г.); XI Курчатовской молодежной научной школе (Москва, 2013 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликованы 28 работ в научных журналах и сборниках трудов международных и российских конференций, в том числе 5 работ в реферируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 130 страниц, включая 52 рисунка, 3 таблицы и список цитируемой литературы из 107 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранного направления исследования электронного транспорта, структурных и оптических свойств гетерост-

руктур с переменным профилем состава КЯ, сформулирована цель работы и решаемые задачи, указана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения и результаты, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации содержит обзор научно-технической литературы по современному состоянию теоретических и экспериментальных исследований, посвященных конструкции, технологии изготовления, изучению электронных транспортных свойств, а также оптических и структурных характеристик гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с псевдоморфной КЯ. Проанализированы основные результаты исследований направленного изменения энергетического профиля дна КЯ путем использования цифровых сплавов в канале, а также легирования области КЯ или барьерного слоя. Однако во всех случаях наблюдается снижение электронной подвижности за счет введения в активные слои гетероструктуры дополнительных рассеивающих донорных примесей. Рассмотрена взаимосвязь электронно-транспортных свойств РНЕМТ гетероструктур и частотных, шумовых и мощностных характеристик СВЧ транзисторов на их основе.

Во **второй главе** приведено описание методов создания современных гетероструктур и исследования их оптических, структурных и электрофизических характеристик. Основное внимание уделено процессу молекулярно-лучевой эпитаксии: описана физика поверхностных процессов, принцип работы и блок-схема используемой в работе установки Riber Compact 21-T, приведен расчет основных технологических параметров для роста образцов (зависимость парциальных давлений от температуры для каждого источника, расчет скорости роста двойных и тройных соединений, определение степени легирования слоев гетероструктуры).

Исследуемые образцы РНЕМТ гетероструктур с односторонним и двусторонним δ -легированием были изготовлены в НИЯУ МИФИ на установке Riber Compact 21-T методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках нелегированного GaAs диаметром 2 дюйма с ориентацией (100). Толщина КЯ InGaAs во всех образцах РНЕМТ составляла 11 нм, отличие образцов друг от

друга заключается лишь в профиле состава $y_{\text{InAs}}(z)$ КЯ. Образцы имели одинаковую концентрацию доноров кремния $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, а при двустороннем легировании соотношение кремния в верхнем и нижнем дельта-слоях равнялось четырем. Температура роста слоев AlGaAs составляла 590 °С, слоев GaAs – 600 °С, а слоев InGaAs – 470 °С, содержание AlAs в барьерах $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ равнялось $x = 0,24$ для всех выращенных образцов. Сверхрешетка AlGaAs/GaAs введена с целью подавления возможной сегрегации примесей с подложки в буферный слой GaAs, а также для уменьшения количества дефектов.

Кратко описаны использованные в работе методы исследования свойств полученных гетероструктур. Для исследования электронных транспортных свойств использовался метод Ван дер Пау: при температурах 300 К и 77 К определялись подвижность и концентрация электронов, а также удельное электрическое сопротивление. Для структурной характеристики гетероструктур применялись методы просвечивающей электронной микроскопии (РНЦ «Курчатовский институт») и рентгеновской дифрактометрии вблизи рефлекса (004) в геометрии $\theta/2\theta$ (НИЯУ МИФИ). Из данных измерений определены составы тройных соединений $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, а также толщины слоев. Оптические измерения проводились методом низкотемпературной спектроскопии люминесценции (ИСВЧПЭ РАН) при $T = 77 \text{ К}$.

Описаны методики получения спектров фотолюминесценции (ФЛ) и снимков просвечивающей электронной микроскопии, приведены блок-схемы экспериментальных установок.

Третья глава посвящена расчетному моделированию зонного профиля и электронных волновых функций в РНЕМТ гетероструктурах с однородной и варизонной КЯ как для одностороннего, так и для двустороннего δ -легирования кремнием. Для этого была решена самосогласованная система уравнений Шредингера и Пуассона. Рассчитаны и проанализированы пространственный профиль зоны проводимости $U(z)$, уровни размерного квантования электронов E_i , огибающие волновых функций электронов $\psi_i(z)$, концентрации электронов в подзонах n_i и распределение электронной плотности $n(z)$ при различном профи-

ле состава InAs $y(z)$ в слое $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$ и способе легирования (одностороннее или двустороннее).

В базовой PHEMT гетероструктуре с односторонним легированием и однородным составом $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y = 0,2$, ширина 11 нм) при концентрации электронов $\sim 1,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ показано, что возникает асимметрия зонного профиля и кривизна дна КЯ составляет $\sim 0,085$ эВ. Эффект связан с несимметричным расположением ионизированных доноров относительно КЯ. Профиль дна КЯ можно с хорошей точностью описать как суперпозицию линейной ($\delta E \sim 0,06$ эВ на 11 нм) и параболической компонент. В односторонне легированных структурах кривизна не столь велика, поэтому скомпенсировать данную асимметрию в первом (линейном) приближении можно путем добавления индия в точке высокого потенциала и снижая его содержание в точке с низким потенциалом. Для этого использовалась зависимость глубины дна зоны проводимости в КЯ от содержания InAs, используя взаимосвязь: $\Delta E_c = (0,2668 + 0,4119x + 0,309x^2)$ эВ. При этом для корректного сравнения со свойствами однородной КЯ необходимо сохранить средний состав InAs в КЯ.

На рис. 1 приведен пример расчета профилей зоны проводимости и волновых функций основного состояния в однородной и варизонной КЯ с односторонним легированием, в которой для компенсации выбран линейный профиль состава $y(z) = 0,15 \div 0,25$.

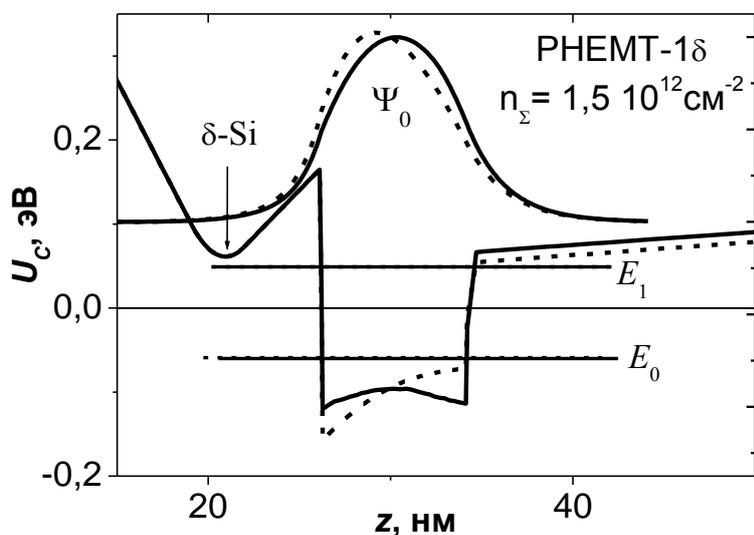


Рис. 1. Зонный профиль и волновая функция основного состояния для однородной КЯ (пунктир) и варизонной КЯ с компенсацией линейного наклона КЯ (сплошная линия).

Варьирование таких параметров, как легирование и ширина КЯ показало, что в тех случаях, когда нижний уровень размерного квантования не пересекает дно КЯ, взаимное расположение уровней подзон практически не изменяется при линейной компенсации наклона. Это означает, что эффективная ширина КЯ остается неизменной. Однако в такой ситуации происходит смещение максимума волновой функции электронов в центр КЯ.

В широкой КЯ при большой концентрации легирующей примеси изменяются уровни энергии подзон и их взаимное расположение. Таким образом, изменение профиля состава ведет к изменению эффективной ширины КЯ, а также к более сильному смещению волновых функций электронов.

Для КЯ с высокой концентрацией электронов в диапазоне $n_s \sim 2 \div 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ принято использовать конструкцию гетероструктуры с двусторонним легированием. Зонный профиль КЯ в этом случае оказывается более симметричен, чем при одностороннем легировании. Однако в подобных структурах вследствие возросшей концентрации электронов в КЯ сильно увеличивается кривизна дна КЯ. При $n_s \sim 2 \div 3,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ параболический барьер в центре КЯ достигает 20÷30 мэВ относительно гетерограниц. На рис. 2, а показан профиль двусторонне-легированной РНЕМТ гетероструктуры с однородной КЯ. Как видно, в такой структуре существует как небольшая асимметрия профиля на границах КЯ, так и параболический барьер. Поднятие дна КЯ в центре вызывает снижение эффективной глубины КЯ, и уширение электронной волновой функции основного состояния. Скомпенсировать это явление можно, увеличив содержание InAs в центре КЯ и уменьшив его вблизи гетерограниц. В качестве практически реализуемого приближения была применена кусочно-линейная аппроксимация из двух участков (шириной по 5,5 нм каждый). Исходя из того, что вариация ширины запрещенной зоны при увеличении содержания состава y_{InAs} составляет $dE_g/dy \sim 6 \text{ мэВ}/\%$, оптимальным для компенсации изгиба и барьера оказывался профиль с содержанием $y = 0,20$ в начале КЯ, $y = 0,25$ в центре и $y = 0,15$ в конце КЯ, при сохранении среднего состава в КЯ $y = 0,2$.

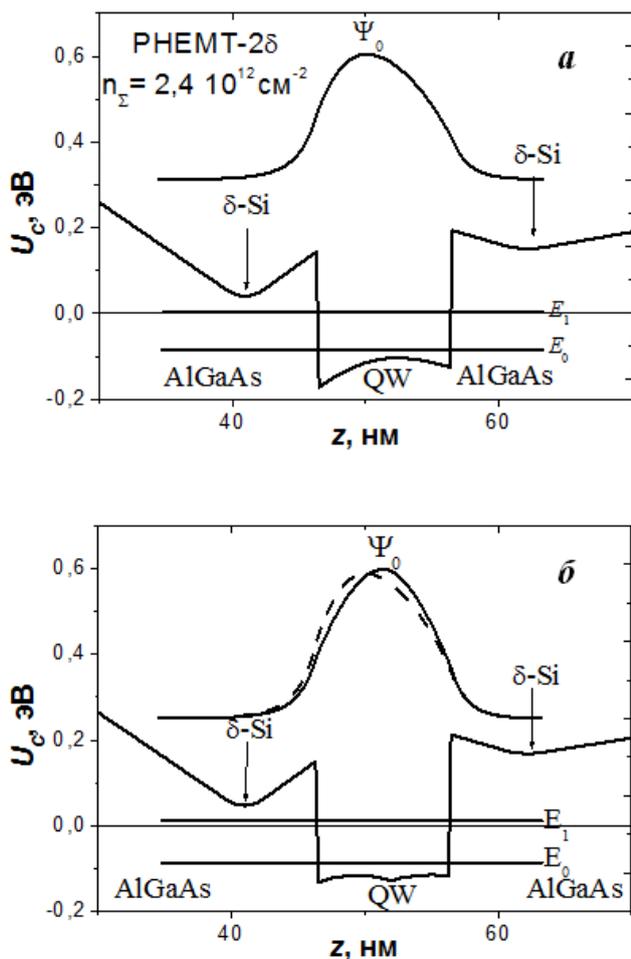


Рис. 2. Зонный профиль и волновая функция основного состояния (сплошная линия) для PHEMT гетероструктуры с двусторонним δ -легированием: а – однородная КЯ; б - варизонной КЯ с компенсацией изгиба дна. На нижнем рисунке штриховой линией для сравнения показана волновая функция основного состояния ψ_0 в однородной КЯ. Концентрация электронов в КЯ $n_s=2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 2, б приведен зонный профиль варизонной КЯ с компенсацией изгиба КЯ. Как видно, достигается более прямоугольный профиль КЯ, а волновая функция Ψ_0 смещается к центру КЯ. Также снижается энергия основного состояния E_0 относительно верхней границы КЯ, что означает увеличение эффективной глубины КЯ. Таким образом, использование варизонного профиля состава КЯ $y_{\text{InAs}}(z)$ позволяет устранить: в первом приближении – наклон, а во втором также и кривизну дна.

В **четвертой главе** представлены технологические аспекты создания PHEMT гетероструктур с однородным и с переменным профилем состава КЯ $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}/\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}/\text{GaAs}$. Приведены результаты оптических, структурных и электронно-транспортных свойств образцов гетероструктур.

В первой части главы проведено исследование особенностей технологии PHEMT гетероструктур с односторонним и двусторонним легированием с варизонным каналом $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$ по конструкциям, рассчитанным в предыдущей

главе. Образцы первого типа имели одностороннее дельта-легирование кремнием, а второго типа – двустороннее. Структурные схемы слоев представлены на рис. 3, а и б, соответственно. При конструировании варизонной структуры изменение состава слоев достигается путем изменения соотношения парциальных давлений потоков компонент, для переменного состава КЯ выбрано изменение потока индия.

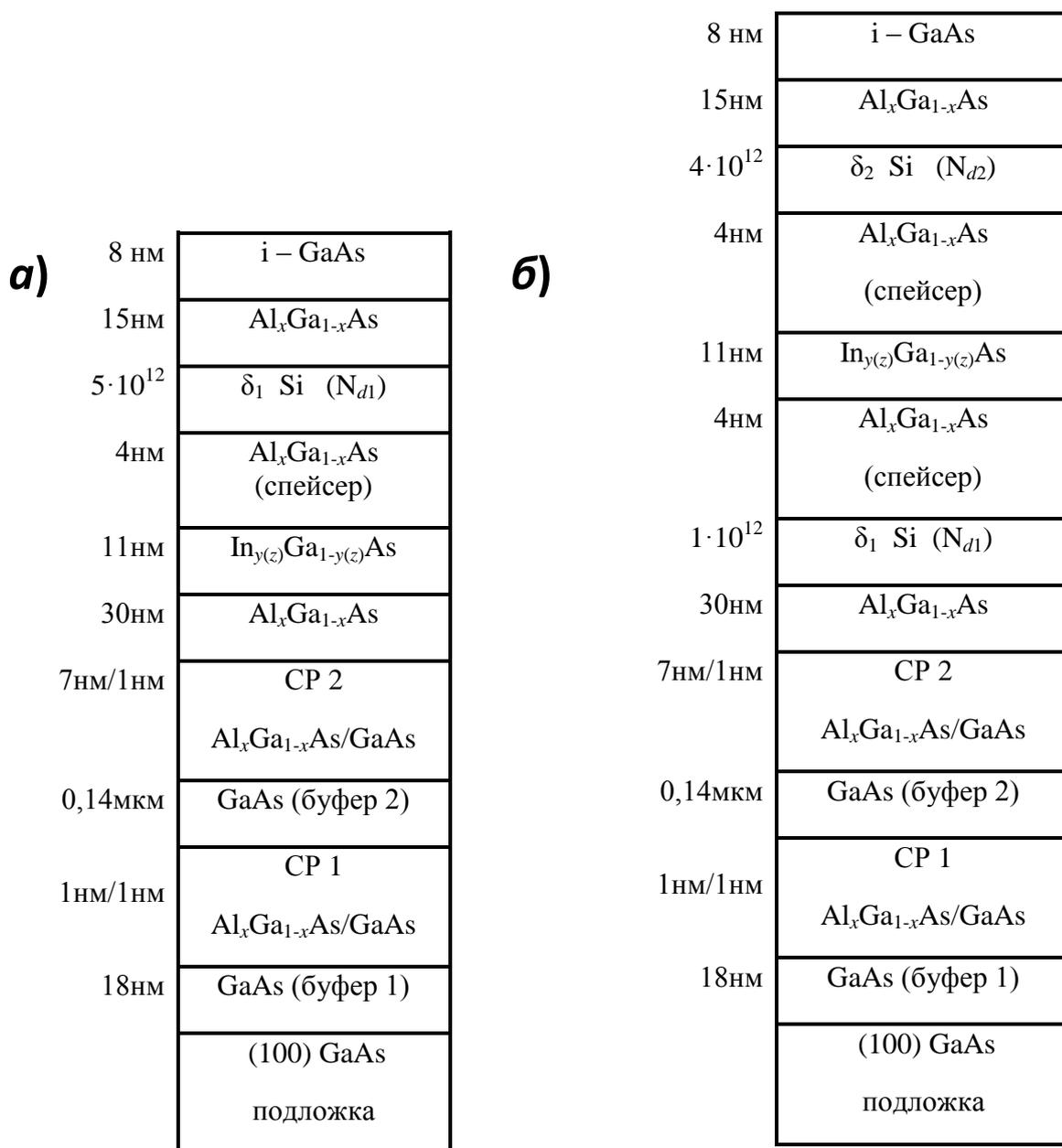


Рис. 3. Схема P-HEMT гетероструктуры с односторонним (а) и двусторонним (б) дельта легированием.

В данной работе перепад состава, требуемый для компенсации изгиба зон, в слое InGaAs составлял до 13%, что эквивалентно $g_c \sim 1,2\%$ InAs/нм. Столь высокий градиент состава невозможно надежно реализовать по стандартной схеме МЛЭ, поскольку для характерной скорости роста $v_{\text{GaAs}} \sim 13\div 14$ нм/мин скорость изменения температуры источника In оказывалась слишком большой (~ 60 °C/мин). Поэтому было проведено масштабирование скорости роста и времени роста слоев при условии сохранения состава и толщины слоев структуры. Образцы были выращены при скорости роста 6 нм/мин (по GaAs). Поскольку время роста КЯ толщиной 11 нм со скоростью роста 9,2 нм/мин по GaAs составила всего 72 с, потоки In и Ga изменялись одновременно по линейному закону. Для этого были проведены тщательные градуировки зависимости давления потока от температуры источников Ga и In, написана программа регулирования температуры каждого источника во времени и опробована кинетика изменения потоков индия и галлия. Учитывался также эффект запаздывания молекулярных потоков по времени, вызванный инерцией источников.

Для каждого типа образцов была изготовлена опорная РНЕМТ структура с однородным составом КЯ. Основные изменяющиеся параметры выращенных структур – профиль состава КЯ и способ легирования – представлены в табл. 1. Толщина барьера AlGaAs между δ -Si и поверхностью для структур составила 15 нм, толщина канала 11 нм, толщины спейсеров 5 нм и общая концентрация доноров кремния для всех структур равнялась $5 \cdot 10^{12}$ см⁻². Состав квантовой ямы $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$ в исследуемых образцах представлен в табл. 1. Далее были выращены структуры с двусторонним дельта-легированием. Было выбрано три значения градиента состава, позволяющие скомпенсировать наклон дна КЯ по отношению к расчетному значению: частично, полностью и с избытком, при сохранении среднего состава y_{InAs} в КЯ. Для проверки точности воспроизведения слоев гетероструктуры при масштабировании скорости роста были выращены 2 образца с однородной КЯ при нормальной (13 нм/мин, № 47) и пониженной (6 нм/мин, № 183) скоростях.

Таблица 1. Параметры слоев выращенных гетероструктур.

№	Профиль состава КЯ $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$		
	Состав в начале, %	Состав в середине, %	Состав в конце, %
1δ РНЕМТ гетероструктуры			
183	20	20	20
184	15	20	25
2δ РНЕМТ гетероструктуры			
74	20	20	20
75	20	25	15
89	20	22	15
90	20	28	15

Во второй части главы приведены результаты исследования образцов гетероструктур при помощи просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Характерное изображение активных слоев в образце № 75 в темном поле представлено на рис. 4.

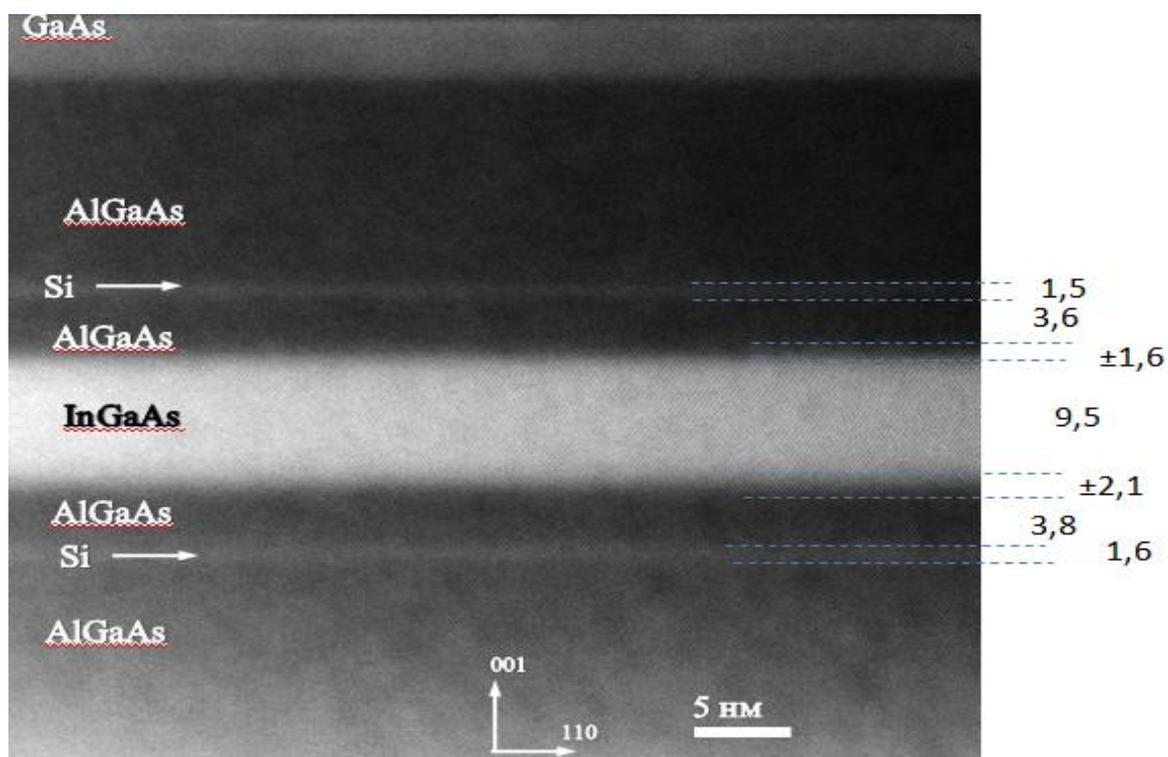


Рис.4. Темнопольное электронно-микроскопическое изображение поперечных срезов слоев РНЕМТ гетероструктуры с оптимальным профилем состава (№ 75) варизонной КЯ. Толщины слоев приведены справа в нм.

В силу большой разницы в составах слоев наблюдается сильный Z-контраст. Отчетливо видны сформированные слои гетероструктуры, размытие гетерограниц не превышает 2,1 нм. Слои, имеющие более высокое содержание тяжелых элементов, а это в рассматриваемых образцах – In, выглядят светлее. Точные измерения толщины были сделаны непосредственно по изображениям кристаллической решетки соответствующих слоев гетероструктур путем подсчета количества кристаллических плоскостей. Сравнительные результаты измерений толщин слоев для образца № 74 с однородной и варизонной КЯ № 75 представлены в табл. 2. Измеренные значения толщин слоев хорошо согласуются с технологическими и отличаются от образца к образцу не более чем на 7 %. Дефектов и дислокаций на ПЭМ изображениях не наблюдалось, что свидетельствует о высоком структурном совершенстве изготовленных образцов, в т.ч. с высоким градиентом состава в канале InGaAs.

Таблица 2. Толщины слоев в образцах, определенные методом ПЭМ.

Наименование слоя	Технологические параметры, 10^{-1} нм	Толщина для образца № 74, 10^{-1} нм	Толщина для образца № 75, 10^{-1} нм
GaAs	80	75 ± 10	70 ± 10
AlGaAs	150	220 ± 40	230 ± 40
δ -Si			
AlGaAs	40		
InGaAs	110	110 ± 5	115 ± 5

В третьей части главы проведено сравнение образцов методом двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии с высоким угловым разрешением, а также определение состава и толщины слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Были измерены кривые дифракционного отражения (КДО) вблизи рефлекса (004) от образцов. Сравнение данных КДО образцов № 183 и № 47, приведенных на рис. 5, показало хорошее соответствие толщины и состава слоев структуры при снижении скоро-

сти роста, что подтверждает корректность проделанного масштабирования скорости МЛЭ роста.

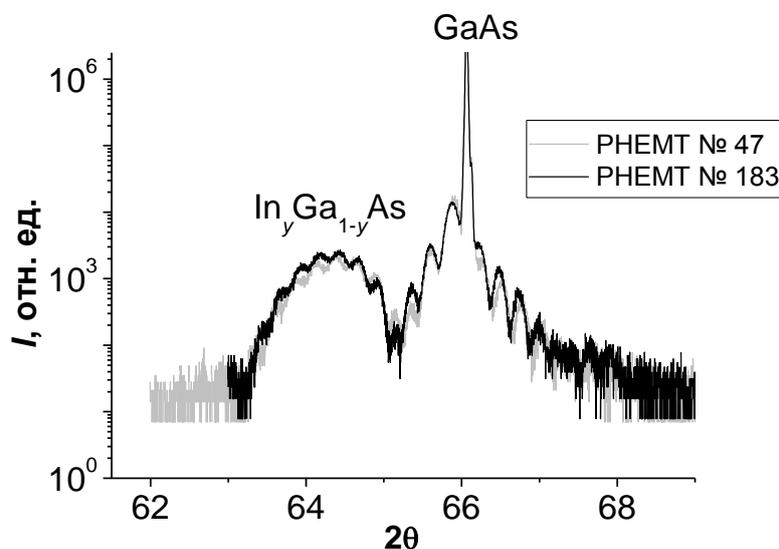


Рис. 5. Кривые дифракционного отражения (004) от образцов с обычной (№ 47) и пониженной (№ 183) скоростью роста.

Тонкая структура дифракционной кривой вблизи угла $2\theta \sim 64,4^\circ$ отвечает отражению от слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$. Хорошее соответствие кривых, а именно – совпадение угла дифракции в максимуме рассматриваемого пика и узлов слева и справа от пика означают совпадение состава слоя для образцов № 47 и № 183, а также толщины КЯ в данных образцах. Кроме того, наличие большого числа периодов толщинных осцилляций, отвечающих слою AlGaAs , показывают высокое структурное совершенство и малое размытие гетерограниц в обоих образцах.

Данные КДО от варизонного образца № 75 и сравнение с опорным образцом № 74 с однородным составом $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ приведены на рис. 6. Видно, что структура дифракционных максимумов в области углов $2\theta = 62,7 \div 65,0^\circ$, соответствующая отражению от слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, у данных образцов имеет небольшое отличие, однако, средний состав для обоих образцов совпадает. В структурах с неоднородным составом $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ изменение поперечного параметра решетки вдоль слоя псевдоморфно деформированного InGaAs не проявляется в качестве отдельной особенности на дифрактограмме, а возникает пик, соответ-

ствующий усредненному составу слоя, так как это наблюдается и для КДО образцов с короткопериодными сверхрешетками.

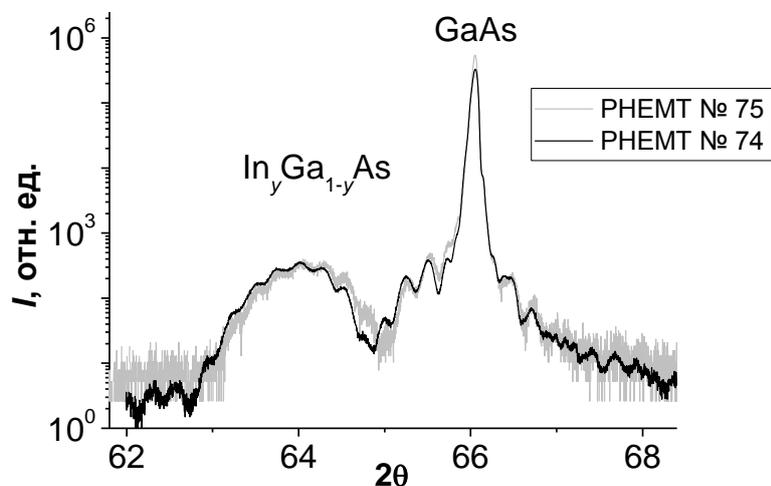


Рис 6. Кривые дифракционного отражения (004) от образцов с однородным (№ 74) составом квантовой ямы и варизонной (№ 75) квантовой ямой.

Следует отметить, что в КДО образца с варизонной квантовой ямой сохраняются толщинные осцилляции, свидетельствующие о хорошей морфологии слоя и границ раздела. Результаты измерений толщин слоев хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при помощи ПЭМ.

В четвертой и пятой частях главы проводилось исследование параметров электронного транспорта в образцах. Измерения показали, что все варизонные образцы имеют достаточно высокие значения подвижности электронов, сравнимые с данными для опорных структур, имеющих однородную по составу КЯ. Результаты измерений для двух температур приведены в табл. 3.

В образце с односторонним легированием подвижность электронов в варизонной КЯ оказалась выше, чем в образце с однородной КЯ, причем это увеличение более заметно при низкой температуре ~ 77 К. Согласно моделированию зонного профиля для односторонне-легированных структур это может быть обусловлено как удалением волновой функции электронов от области ионизированной примеси и, как следствие, уменьшением рассеяния на ионах Si, так и уменьшением рассеяния носителей на гетерограницах КЯ.

Для структур с односторонним δ -легированием, концентрация электронов практически не изменилась в варизонной КЯ (№ 184) по сравнению с однород-

ной КЯ (№ 183), что находится в хорошем соответствии с расчетными данными. Действительно, т.к. эффективная ширина КЯ не изменилась, и существенного сдвига энергии подзон при данных условиях не ожидается, концентрация электронов должна сохраниться.

Для структур с двусторонним δ -легированием варизонный профиль КЯ приводит к неоднозначному изменению концентрации электронов и их подвижности в зависимости от градиента состава. В образце № 75 с точной компенсацией изгиба дна КЯ достигается увеличение как концентрации, так и подвижности электронов. Это можно связать с тем, что при оптимальной компенсации кривизны дна КЯ возникает смещение максимума распределения двумерного электронного газа к центру КЯ, что эквивалентно небольшому увеличению расстояния до ионизированных доноров и приводит к снижению рассеяния электронов на удаленных донорах кремния в дельта-слоях. На это указывает большое увеличение подвижности электронов при низкой температуре в этом образце, поскольку при температуре кипения жидкого азота электрон-фононное рассеяние значительно снижено, и подвижность электронов ограничена именно рассеянием на удаленных донорах.

Таблица 3. Электрофизические параметры гетероструктур с односторонним и двусторонним легированием.

Образец	$x_{\text{InAs}}^{\text{В}} \text{ центре КЯ, \%}$	x_{InAs} , средняя по InGaAs, %	$T = 300 \text{ К}$		$T = 77 \text{ К}$	
			$n_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$	$n_s, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu, \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
1 δ № 183	25	20	1,53	6840	1,57	22890
1 δ № 184	25	20	1,48 (-3%)	7060 (+3%)	1,54 (-2%)	26160 (+14%)
2 δ № 74	20	20	1,76	5360	1,80	11600
2 δ № 75	25	20	1,91 (+9%)	5940 (+11%)	2,00 (+11%)	14510 (+25%)
2 δ № 89	22	19	1,95 (+11%)	5540 (+3%)	2,00 (+11%)	11900 (+3%)
2 δ № 90	28	21	1,70 (-3%)	4920 (-8%)	1,77 (-2%)	9930 (-14%)

В образце № 89 с недостаточной амплитудой варизонности увеличение электронной подвижности менее заметно. Однако в образце № 90 с избыточной варизонностью наблюдался обратный эффект – заметное снижение подвижности электронов и некоторое снижение их концентрации. К тому же снижается отношение подвижностей электронов, измеренных при низкой и высокой температурах. Объяснение данного негативного эффекта выходит за рамки зонной трактовки и может быть связано с тем, что при столь резком перепаде состава в псевдоморфно-напряженной КЯ (до 28% InAs в центре) возникает избыточная деформация и частичная неупругая релаксация в центральной области слоя InGaAs с образованием дислокаций. Этот дополнительный механизм рассеяния электронов со слабой температурной зависимостью влечет за собой небольшое ухудшение подвижности электронов.

Таким образом, в структуре с оптимальным профилем состава InAs в КЯ удалось получить увеличение как подвижности, так и концентрации электронов по сравнению с базовой гетероструктурой, имеющей однородный состав InGaAs в квантовой яме. При выборе градиента состава в псевдоморфном слое $\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}$ необходимо учитывать ограничения, накладываемые критической упругой деформацией, чтобы избежать ухудшения кристаллической структуры слоя.

В пятой части главы для экспериментального подтверждения изменения зонной структуры КЯ при изменении профиля состава использовалась спектроскопия ФЛ. В спектрах ФЛ для всех образцов присутствует полоса люминесценции в области энергий $h\omega_1 \sim 1,30$ эВ, которая соответствует переходам из первой электронной подзоны в первую подзону тяжелых дырок $e1-h1$.

Из рис. 7 видно, что при увеличении состава InAs в центре КЯ $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ происходит последовательное смещение положения пиков в более длинноволновую область спектра, что подтверждает изменение профиля дна КЯ при изменении профиля состава. Таким образом возникает возможность управлять энергией оптических переходов в приборах на основе гетероструктур с переменным профилем состава КЯ.

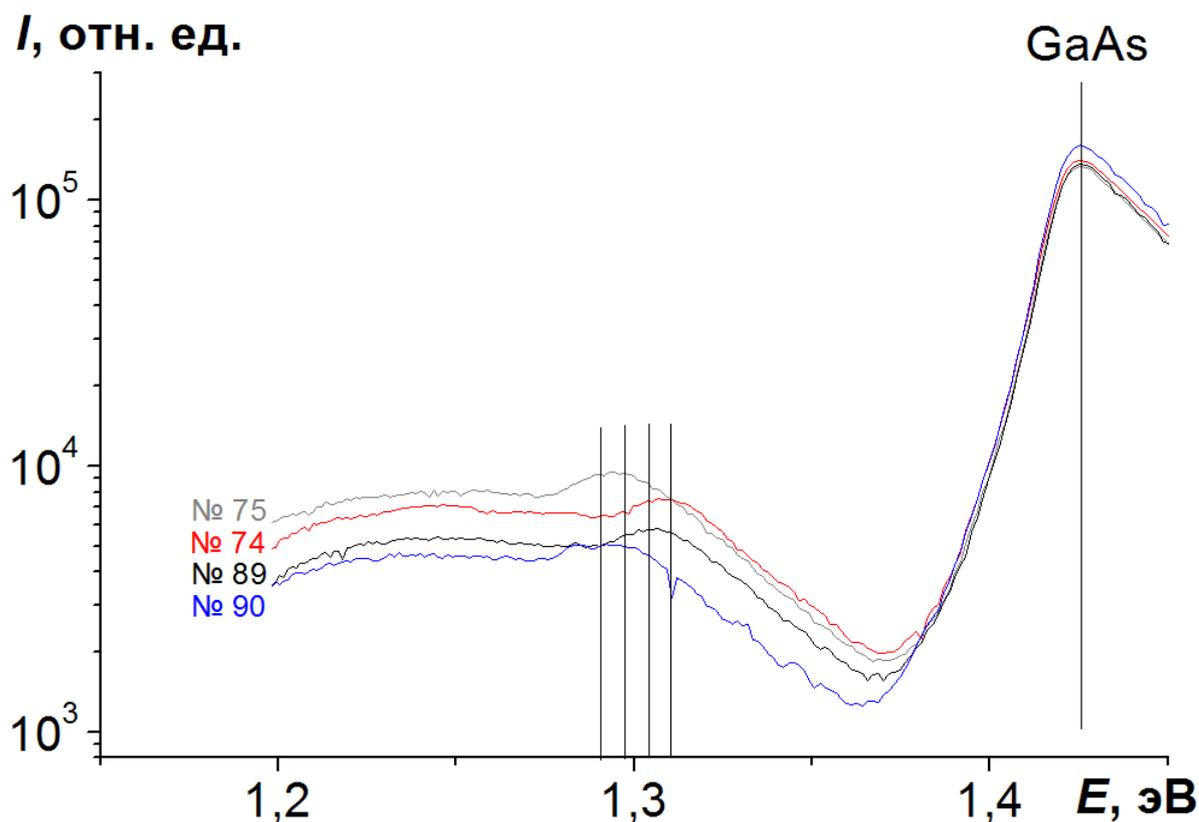


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции образцов с двусторонним легированием при $T = 77 \text{ K}$.

Кроме того, в образце № 75 с прямоугольным дном КЯ наблюдается максимальная интенсивность оптических переходов $e1-h1$, что связано с максимальным перекрытием волновых функций электронов и дырок.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана технология МЛЭ создания РНЕМТ гетероструктур с высоким градиентом состава в КЯ при пониженной скорости роста, позволяющая получить перепад состава до 1,2 %/нм.
2. При структурных измерениях методами рентгеновской дифрактометрии и ПЭМ показано высокое структурное совершенство и точность изготовления гетероструктур по толщине и составу. Отклонение параметров от технологически заложенных составляет не более 3%.
3. Путем расчетного моделирования определен оптимальный профиль состава варизонных КЯ, обеспечивающий прямоугольный профиль дна

КЯ, при котором достигается максимальная глубина квантовой ямы с сохранением ее ширины.

4. С использованием расчетного моделирования зонного профиля РНЕМТ гетероструктур с односторонним и двусторонним δ -легированием определен оптимальный профиль состава InAs в КЯ: $15\% \div 25\%$ и $20\% \div 25\% \div 15\%$ для 1δ -РНЕМТ и 2δ -РНЕМТ, соответственно.
5. Обнаружено, что в 1δ -РНЕМТ гетероструктурах изменение профиля дна КЯ приводит к возрастанию подвижности электронов при сохранении их концентрации.
6. Установлено, что увеличение содержания In в центральной части КЯ 2δ -РНЕМТ гетероструктур приводит к увеличению подвижности и концентрации носителей заряда за счет увеличения эффективной глубины КЯ и межподзонного энергетического зазора. Кроме того, электронная волновая функция основного состояния становится более локализованной в центральной области КЯ, и рассеяние на ионизированных примесях и шероховатостях гетерограниц снижается. Избыточное содержание InAs в КЯ приводит к снижению подвижности носителей заряда за счет частичной неупругой релаксации материала КЯ с возникновением дислокаций несоответствия.
7. Установлено, что оптимизация профиля дна КЯ в двусторонне-легированных РНЕМТ гетероструктурах приводит к увеличению эффективной глубины КЯ и, как следствие, концентрации электронов. В РНЕМТ гетероструктурах с односторонним δ -легированием эффективная глубина КЯ не меняется при изменении профиля состава, поэтому данный эффект не наблюдается.
8. Показано, что в РНЕМТ гетероструктурах с варизонной КЯ наблюдается смещение положения переходов в КЯ, обусловленное управляемым изменением профиля дна КЯ электронов и дырок. Таким образом, возник-

кает возможность управлять энергией оптических переходов в приборах на основе варизонных гетероструктур.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, В.П. Гладков, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов. Технология и электронные свойства Р-НЕМТ $\text{AlGaAs}/\text{In}_{y(z)}\text{Ga}_{1-y(z)}\text{As}/\text{GaAs}$ квантовых ям с переменным профилем состава. – Физика и техника полупроводников, 2014, т. 48, вып. 9, с. 1258–1264.
2. М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, В.П. Гладков, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов. Влияние профиля состава квантовой ямы на электрофизические свойства Р-НЕМТ гетероструктур с двусторонним дельта-легированием. – Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2013, т. 2, вып. 3, с. 261–266.
3. М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, Д.М. Жигунов, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, И.С. Еремин, Ю.Д. Сибирмовский. Особенности формирования ансамблей квантовых колец $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ и $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ методом капельной эпитаксии. – Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2013, т. 2, вып. 3, с. 267–272.
4. Ю.Д. Сибирмовский, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, И.С. Еремин, Н.И. Каргин, О.С. Коленцова, М.Н. Стриханов. Особенности диффузионных процессов при капельной эпитаксии квантовых колец. – Краткие сообщения по физике ФИАН, 2014, т. 41, вып. 9, с. 3–8.
5. А.Н. Виниченко, В.П. Гладков, Н.И. Каргин, М.Н. Стриханов, И.С. Васильевский. Увеличение подвижности электронов в НЕМТ гетероструктурах с составным спейсером, содержащим нанослой AlAs . – Физика и техника полупроводников, 2014, т. 48, вып. 12, с. 1660–1665.

6. М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов. Технология РНЕМТ гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs с варизонными квантовыми ямами. – В. сб.: Тезисы 2-ой Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Москва, НИЯУ МИФИ, 2012, с. 22-23.
7. М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, В.П. Гладков, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов, Д.В. Лаврухин. Влияние профиля состава квантовой ямы на оптические и электрофизические свойства Р-НЕМТ гетероструктур. – В. сб.: Аннотации докладов Научной сессии НИЯУ МИФИ – 2013, Москва, НИЯУ МИФИ, 2013, т. 2, с. 185.
8. М.Н. Стриханов, Н.И. Каргин, В.П. Гладков, Д.В. Лаврухин, И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов. Электрофизические и оптические свойства двусторонне-легированных гетероструктур с переменным профилем состава квантовой ямы AlGaAs/In_{y(z)}Ga_{1-y(z)}As/GaAs. – В. сб.: Тезисы 5-ой Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Москва, НИЯУ МИФИ, 2014, с. 17-18.