



Клочков Алексей Николаевич

**Электронный спектр в модулированно-легированных
гетероструктурах InGaAs/InAlAs на подложках GaAs и InP**

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН)

Научный руководитель: **Галиев Галиб Бариевич**
Доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией ИСВЧПЭ РАН

Официальные оппоненты: **Капаев Владимир Васильевич**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Отделения физики
твёрдого тела Физического института им. П.Н.
Лебедева Российской академии наук

Кытин Владимир Геннадьевич
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры физики низких температур и
сверхпроводимости Физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет информационных технологий,
радиотехники и электроники»

Защита диссертации состоится 9 октября 2015 года в 10-00 на заседании Диссертационного совета Д 002.231.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН <http://www.cplire.ru/rus/dissertations.html>

Автореферат разослан «___» _____ 2015 года

Учёный секретарь диссертационного совета,

доктор физ.-мат. наук, доцент



Кузнецова Ирен Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Модулированно-легированные гетероструктуры (МЛГ) с квантовой ямой (КЯ) InGaAs/InAlAs широко применяются в микроэлектронике в качестве базового материала для создания сверхвысокочастотных полевых транзисторов (50 – 1000 ГГц). Их использование обусловлено высокими достижимыми концентрацией и подвижностью электронов за счет пространственного разделения двумерного электронного газа (ДЭГ), локализованного в КЯ InGaAs/InAlAs, и ионов легирующей примеси.

Благодаря прогрессу технологии эпитаксиального роста стремительно появляются новые типы полупроводниковых гетероструктур и проводятся модификации существующих конструкций. Так, широко исследуется возможность увеличения транспортных свойств ДЭГ путем зонной инженерии электронных состояний в составных КЯ (СКЯ) с использованием тонких функциональных слоев-вставок, например, InAs или GaAs. Такие слои создают потенциальные ямы или потенциальные барьеры для движения носителей заряда в СКЯ и могут быть использованы для управления областью их локализации, конструирования энергетического спектра и изменения эффективной массы. Например, за счет локализации ДЭГ внутри нанометровых слоев InAs в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ добиваются повышения подвижности и дрейфовой скорости электронов. Несмотря на разнообразие работ по оптимизации электронного транспорта в СКЯ InAlAs/InGaAs, данные о модификации спектра электронных и дырочных состояний в СКЯ при введении дополнительных напряженных слоев довольно скудны. Практически отсутствуют исследования энергетического спектра и оптических свойств МЛГ с КЯ InGaAs/InAlAs, содержащих тонкие слои InAs и GaAs, а также влияния упругих напряжений в этих слоях на состояния электронов и дырок.

Механические деформации ограничивают возможный диапазон состава КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в псевдоморфных МЛГ: $x \approx 0 - 0.25$ для структур на подложках GaAs, и $x = 0.53 - 0.75$ для структур на InP. Необходимость преодоления этого ограничения привела к разработке метаморфных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках GaAs. В таких структурах между подложкой и КЯ выращивается толстый буферный

слоей InAlAs с постепенно изменяющимся составом. Метаморфный буфер (МБ) обеспечивает согласование параметров решетки подложки и активной области и позволяет получать ненапряженную КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с произвольным наперед заданным составом. Наиболее интересными являются два диапазона составов x . При $x \sim 0.35 - 0.4$ на гетерогранице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ разрыв зоны проводимости максимален (0.7 эВ), что позволяет повысить плотность ДЭГ в КЯ. Исследование гетероструктур с содержанием индия $x > 0.7$ обусловлено стремлением повышения электронной подвижности и дрейфовой скорости. Оптические свойства метаморфных структур InGaAs/InAlAs исследованы недостаточно подробно, в частности, не определено влияние профиля химического состава в МБ на форму спектров фотолюминесценции (ФЛ).

Вместе с расширением класса полупроводниковых гетероструктур возникают задачи по изучению их физических свойств во взаимосвязи с технологическими условиями получения. Транспортные свойства ДЭГ в КЯ определяются формой волновых функций (ВФ) и заполнением электронных состояний. Поэтому исследование электронного спектра МЛГ как путем расчета зонной структуры, так и измерения оптических спектров, является актуальной задачей. Анализ спектров ФЛ позволяет получить сведения о фундаментальных свойствах материалов – зонной структуре, энергиях электронных состояний и их заполнении. Также метод ФЛ может использоваться в технологии гетероструктур для контроля состава и толщин слоев. Поэтому в настоящей работе была поставлена задача исследования спектров ФЛ новых типов МЛГ InGaAs/InAlAs на подложках GaAs и InP одновременно с контролем их структурных и электрофизических параметров.

Целью работы является установление влияния на электронный спектр и фотолюминесцентные свойства МЛГ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ на подложках GaAs и InP вариации геометрии и состава слоев, в том числе влияния введения в КЯ нанометровых слоев InAs и GaAs и изменения профиля химического состава в МБ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

Проведение расчета спектра электронов и дырок, энергий межзонных оптических переходов, зонной структуры, распределения электронной плотности в

МЛГ InGaAs/InAlAs в зависимости от толщины и состава слоев КЯ, легирования, а также при введении в КЯ слоев InAs и GaAs;

Выращивание и исследование электронных свойств МЛГ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ на подложках InP, содержащих в КЯ центральную вставку InAs различной толщины;

Выращивание и исследование электронных свойств МЛГ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ на подложках InP, содержащих в КЯ парные вставки InAs и/или GaAs;

Выращивание и исследование спектров ФЛ метаморфных МЛГ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.38$ и $x = 0.7$) с различным профилем химического состава в МБ.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые:

- экспериментально и теоретически установлено влияние введения в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ слоев-вставок InAs и GaAs на положение и форму спектров ФЛ;

- обнаружен монотонный сдвиг максимума ФЛ от КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при увеличении толщины центральной вставки InAs;

- теоретически предсказано инверсное расположение подзон легких и тяжелых дырок в МЛГ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, содержащих вставки GaAs;

- экспериментально обнаружено и объяснено сильное увеличение интенсивности и смещение в сторону меньших энергий полосы ФЛ от гетерограницы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ при увеличении длительности и температуры отжига подложки InP в потоке молекул As_4 ;

- обнаружена линейная зависимость полуширины пика ФЛ КЯ $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ от слоевой концентрации электронов;

- экспериментально установлено влияние профиля химического состава в МБ (ступенчатого, линейного, содержащего сверхрешетки и инверсные ступени) на форму спектров ФЛ МЛГ InGaAs/InAlAs на подложках GaAs.

Научная и практическая значимость. Полученные результаты расширяют знания об электронном спектре и оптических свойствах МЛГ с КЯ InGaAs/InAlAs и

зависимость этих свойств от конструкции и технологических условий получения. Данные гетероструктуры широко применяются в качестве базового материала для быстродействующих полевых транзисторов. Представленные в работе результаты важны для решения технологических задач по разработке новых, а также оптимизации и улучшению существующих приборов на основе структур InGaAs/InAlAs.

Проведен систематический расчет зависимости электронного спектра и энергий межзонных оптических переходов в МЛГ InGaAs/InAlAs от вариации геометрии и состава слоев гетероструктуры, а также способа легирования. Построены номограммы зависимости энергий межзонных переходов от концентрации ДЭГ n_S в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ различной толщины.

Предложен способ управления спектром и областью локализации дырок в наногетероструктурах с КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при помощи слоев-вставок GaAs и InAs. Он может быть использован при разработке активной области гетероструктур для светодиодов, лазерных диодов, фотодетекторов, квантово-каскадных лазеров, резонансно-теннельных приборов на основе КЯ InGaAs/InAlAs.

Результаты работы были использованы при выполнении прикладных научных исследований “Разработка наногетероструктур на подложках фосфида индия для приборов СВЧ нанoeлектроники (диапазон 100 – 300 ГГц)” (соглашение с Минобрнауки России №14.604.21.0003 от 17 июня 2014 г.), а также научно-исследовательской работы “Разработка технологии изготовления метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/GaAs для диапазона частот 60-80 ГГц” (государственный контракт с Минобрнауки России №16.513.11.3113 от 12 октября 2011 г.).

Положения, выносимые на защиту.

1. В случае отсутствия параллельной проводимости по легирующему слою энергии межзонных оптических переходов в односторонне-легированных КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($x = 0.53 - 0.7$, $y = 0.4 - 0.52$) полностью определяются плотностью ДЭГ n_S , толщиной КЯ и содержанием индия в КЯ.

2. Положение пика ФЛ от КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, содержащей в центре вставку InAs , смещается в сторону меньших энергий при увеличении толщины L_{InAs} слоя InAs в диапазоне от 1.7 до 3.0 нм. Интенсивность соответствующего оптического перехода и подвижность электронов в КЯ немонотонно зависят от L_{InAs} и максимальны при $L_{\text{InAs}} = 2.1$ нм.

3. Изменение оптических свойств (формы, количества и положения пиков в спектрах ФЛ) КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ при введении слоев GaAs и InAs обусловлено влиянием вставок InAs и GaAs на энергию и пространственную конфигурацию ВФ легких и тяжелых дырок.

4. Интенсивность полосы ФЛ от гетерограницы $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ возрастает, а положение смещается в сторону меньших энергий при увеличении длительности и температуры предростового отжига подложки InP в потоке молекул As_4 .

5. В спектрах ФЛ метаморфных МЛГ $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ обнаружены две полосы, связанные с рекомбинацией носителей заряда в КЯ и в МБ. Полуширина пика ФЛ от КЯ $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ линейно зависит от слоевой концентрации ДЭГ. Форма и положение полосы от МБ определяются профилем химического состава в нем.

Личный вклад соискателя. Соискатель выполнил теоретические расчеты электронного спектра гетероструктур, провел анализ и интерпретацию спектров фотолюминесценции исследованных гетероструктур. Он также принимал участие при планировании и проведении экспериментальных работ по эпитаксиальному росту гетероструктур в лаборатории исследования процессов формирования низкоразмерных электронных систем в наногетероструктурах соединений A^3B^5 ИСВЧПЭ РАН (зав. лаб. д.ф.-м.н. Г.Б. Галиев), измерению концентрации и подвижности электронов, измерению спектров ФЛ. Электронно-микроскопические исследования гетероструктур были проведены в НИЦ «Курчатовский институт» Васильевым А.Л.

Достоверность результатов работы обусловлена тем, что исследуемые гетероструктуры были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в известной лаборатории, в которой выращиваются МЛГ с электрофизическими параметрами, соответствующими мировому уровню. Для характеристики структур использовались общепризнанные прецизионные методы исследования – измерения

эффекта Холла и электропроводности, спектроскопия ФЛ, просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). Достоверность выводов следует из согласия экспериментальных результатов с теоретическими расчетами электронного спектра и с современными знаниями.

Апробация результатов. Результаты работы были представлены на следующих международных и российских конференциях: 21-st, 22-nd, 23-rd International symposium “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 2013, 2014); XI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013); XIX международный симпозиум “Нанозеллектроника и наноэлектроника” (Нижний Новгород, 2015); 3-я, 5-я и 6-я научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2013, 2014, 2015); Научная сессия НИЯУ МИФИ (Москва, 2010); XVII международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2010» (Москва, 2010).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 7 статей - в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 статья – в зарубежном рецензируемом журнале, реферируемом в базах данных Scopus и Web of Science, 5 работ - в сборниках трудов всероссийских и международных конференций. Общий объем опубликованных по теме диссертации работ составил приблизительно 70 мп. стр.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 153 страницах и состоит из введения, обзора литературы (глава 1), описания методов исследования (глава 2), глав теоретических и экспериментальных исследований (главы 3-5), заключения и списка литературы, включающего 244 публикации. Работа иллюстрирована 22 таблицами и 61 рисунком.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследования электронного спектра и оптических свойств МЛГ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4 - 0.7$) на подложках GaAs и InP, сформулированы цель и решаемые задачи, описаны научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** приведен обзор научной литературы в области электронных свойств МЛГ InAlAs/InGaAs/InAlAs. В разделе 1.1 представлены данные об электронном энергетическом спектре в КЯ, структуре двумерных подзон размерного квантования и их заполнении при модулированном легировании. В разделе 1.2 рассмотрены особенности строения (состава и толщин слоев) псевдоморфных, изоморфных и метаморфных МЛГ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.4 - 0.7$) на подложках GaAs и InP, а также технологические ограничения, накладываемые на конструкцию гетероструктур механическими деформациями слоев. В разделе 1.3 рассмотрены основные физические процессы, происходящие в полупроводниках при ФЛ. Приведен обзор особенностей спектров ФЛ МЛГ InGaAs/InAlAs, таких как снятие правил отбора по четности на межзонные оптические переходы из-за асимметричности потенциала КЯ в легированных структурах и уширение спектров ФЛ от КЯ, обусловленное вырождением электронного газа.

В **Главе 2** приведено описание экспериментальных и теоретических методов исследования, применяемых в работе. Экспериментальные образцы изготавливались методом МЛЭ на установке ЦНА-24 (НИТИ, г. Рязань) с использованием твердотельных источников. В разделе 2.1 описаны физические принципы МЛЭ, приведен обзор работ по технологическим режимам и операциям, используемым при МЛЭ твердых растворов InGaAs, InAlAs и гетероструктур на их основе, рассмотрена схема установки “ЦНА-24”, описаны применявшиеся способы расчета параметров роста (соотношения парциальных давлений молекулярных пучков) и калибровки скоростей роста соединений GaAs, AlAs, InAs и степени легирования Si.

В разделах 2.2 – 2.4 описаны использовавшиеся экспериментальные методы исследования свойств гетероструктур. Подвижность μ_e и концентрация n_s электронов в КЯ гетероструктур определялись путем измерений удельного сопротивления и коэффициента Холла при температурах 77 и 300 К. Оптические свойства образцов были исследованы методом стационарной фотолюминесценции при температурах 77 – 300 К в диапазоне энергий фотонов 0.6-1.9 эВ. Структурное совершенство СКЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, содержащих слои InAs и GaAs, было исследовано методом ПЭМ в режиме высокоуглового рассеяния, позволяющем

получать изображения с контрастом, зависящим от атомного номера Z элементов в кристаллической решетке.

Раздел 2.5 посвящен описанию применяемого метода моделирования зонной структуры МЛГ. Для расчета квантовых состояний электронов, тяжелых и легких дырок решалась самосогласованная система уравнений Шредингера – Пуассона со следующими приближениями: огибающей волновой функции, эффективной массы и независимых энергетических зон. Использовались вычислительные средства компьютерной программы Nextnano³. Во второй части раздела 2.5 приведены параметры зонной структуры твердых растворов InGaAs и InAlAs, используемые при расчетах, рассмотрено влияние упругих механических напряжений на зонную структуру полупроводников и, в частности, на положение зон в гетероструктурах InAs/InGaAs и GaAs/InGaAs на подложках InP.

Глава 3 посвящена моделированию зонной структуры КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($x = 0.53 - 0.7$, $y = 0.4 - 0.52$) с ДЭГ. Были рассчитаны энергии и волновые функции электронов и дырок, слоевая концентрация электронов и пространственное распределение электронной плотности, энергии межзонных оптических переходов и интегралы перекрытия ВФ при вариации конструкции односторонне-легированных гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$: концентрации ионизированных доноров N_D и профиля легирования, толщины $L_{\text{КЯ}}$ и состава x КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, толщины спейсера, толщины барьера, состава барьера – с целью определения влияния этих параметров на электронный спектр.

Обнаружено, что основными параметрами, определяющими энергии межзонных переходов в КЯ, являются толщина КЯ и содержание In x в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, а также концентрация ДЭГ n_S . Толщина $L_{\text{КЯ}}$ КЯ влияет на энергию состояний носителей заряда за счет размерного эффекта. Зависимость энергий межзонных переходов от x соответствует изменению ширины запрещенной зоны материала КЯ. При увеличении плотности ионизированных доноров N_D линейным образом изменяется слоевая концентрация электронов n_S в КЯ. Одновременно возрастает электрическое поле доноров и наклон энергетических зон в КЯ, приводящий к локализации электронов и дырок у противоположных границ КЯ

(рисунок 1 а). Происходит сближение уровней энергии электронов и дырок и, соответственно, уменьшение энергии межзонной рекомбинации (рисунок 1 б). Данный эффект напоминает квантоворазмерный эффект Штарка в прямоугольных КЯ при прикладывании поперечного электрического поля. Отличие от классического эффекта Штарка состоит в наличии ДЭГ, экранирующего поле доноров и приводящего к линейной зависимости положения линии ФЛ от напряженности поля F доноров, в отличие от нелегированных КЯ (квадратичный вид $\Delta E_{\text{ФЛ}} \sim F^2$). Наклон зависимости энергий оптических переходов от N_D является функцией толщины КЯ.

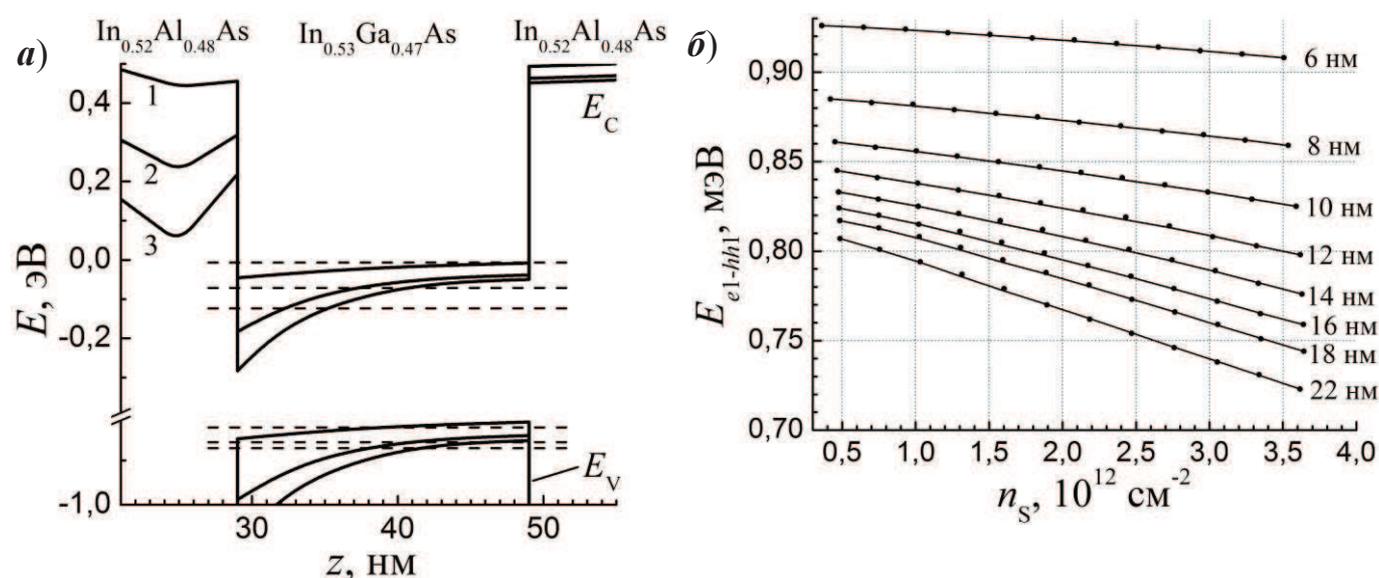


Рисунок 1. а) профиль краев зон E_C и E_V , положение уровней электронов $e1$ и тяжелых дырок $hh1$ в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ для различных $N_D = 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (1), $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (2), $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (3); б) зависимость энергии основного межзонного перехода $e1-hh1$ от n_s в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ различной толщины

Путем моделирования было показано, что для широкого диапазона изменения параметров спейсера, барьера, профиля легирования в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ одинаковой толщины и состава x , с одинаковой плотностью n_s , совпадают энергии состояний носителей заряда. Это объясняется высокой величиной разрыва зоны проводимости на гетерогранице $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ и тем, что все различия потенциала, связанные с перечисленными вариациями конструкции, находятся в областях вне

КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, где ВФ электронов и дырок экспоненциально затухают. Универсальный характер зависимости энергий оптических переходов от плотности электронов при фиксированных толщине и составе КЯ позволяет построить соответствующую номограмму (рисунок 1 б) и использовать ее для анализа оптических свойств широкого класса модулированно-легированных гетероструктур с различной конструкцией. Описанная универсальность нарушается при высоких плотностях легирования, когда происходит образование параллельной проводимости ДЭГ по слою примесей (при $n_S > 3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$).

В Главе 4 представлены результаты экспериментального и теоретического исследования влияния тонких слоев-вставок InAs и GaAs в КЯ на электронный спектр и структурные свойства МДГ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. В разделе 4.1 описано исследование серии гетероструктур с КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ толщиной 16 нм, содержащей центральную вставку InAs в центре КЯ толщиной L_{InAs} 1.7, 2.1 или 3 нм. Гетероструктуры были выращены при температуре $T_G = 500 \text{ }^\circ\text{C}$, для некоторых образцов T_G понижалась до $470 \text{ }^\circ\text{C}$ при выращивании КЯ. Слоевая концентрация электронов n_S в образцах составляла $(3.5-3.8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Наибольшая подвижность μ_e наблюдалась в образцах с толщиной вставки InAs $L_{\text{InAs}} = 2.1 \text{ нм}$.

Исследования методом ПЭМ показали высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев и отсутствие протяженных структурных дефектов в КЯ. Измеренные ПЭМ толщины слоев находятся в хорошем согласии с технологически заданными, за исключением толщин вставок InAs, которые оказались больше заданных приблизительно на 1 нм. Данное отличие объясняется поверхностной сегрегацией атомов индия во время эпитаксиального роста, приводящего к уширению толщин вставок InAs, которому способствовала высокая для таких структур температура роста.

В спектрах ФЛ образцов с одиночной вставкой InAs в диапазоне 0.6-1.9 эВ наблюдаются четыре полосы, соответствующие рекомбинации носителей заряда в определенных областях структур: КЯ InAlAs/InGaAs/InAlAs (диапазон 0.6 – 0.8 эВ), гетерограница подложка InP – буфер InAlAs (1.24 – 1.38 эВ), подложка InP (1.38 – 1.48 эВ), буферный слой InAlAs (1.48 – 1.60 эВ).

Наблюдаемые пики люминесценции в диапазоне 0.6 – 0.8 эВ соответствуют рекомбинации ДЭГ и фотогенерированных дырок, захваченных в КЯ (рисунок 2 а). Они обладают полушириной $\Delta \sim 70\text{--}80$ мэВ, что объясняется заполнением двумерных состояний КЯ вырожденным ДЭГ. В сторону меньших энергий от пиков ФЛ наблюдается плечо, выходящее за границы чувствительности фотоприемника. Подобная несимметричность формы спектров ФЛ ДЭГ связана с заполнением электронами в КЯ двух подзон размерного квантования. Энергетическое положение максимума пиков ФЛ от КЯ для всех образцов различаются: при увеличении толщины вставки InAs наблюдается сдвиг пиков в сторону меньших энергий (с 0.7 эВ до 0.65 эВ).

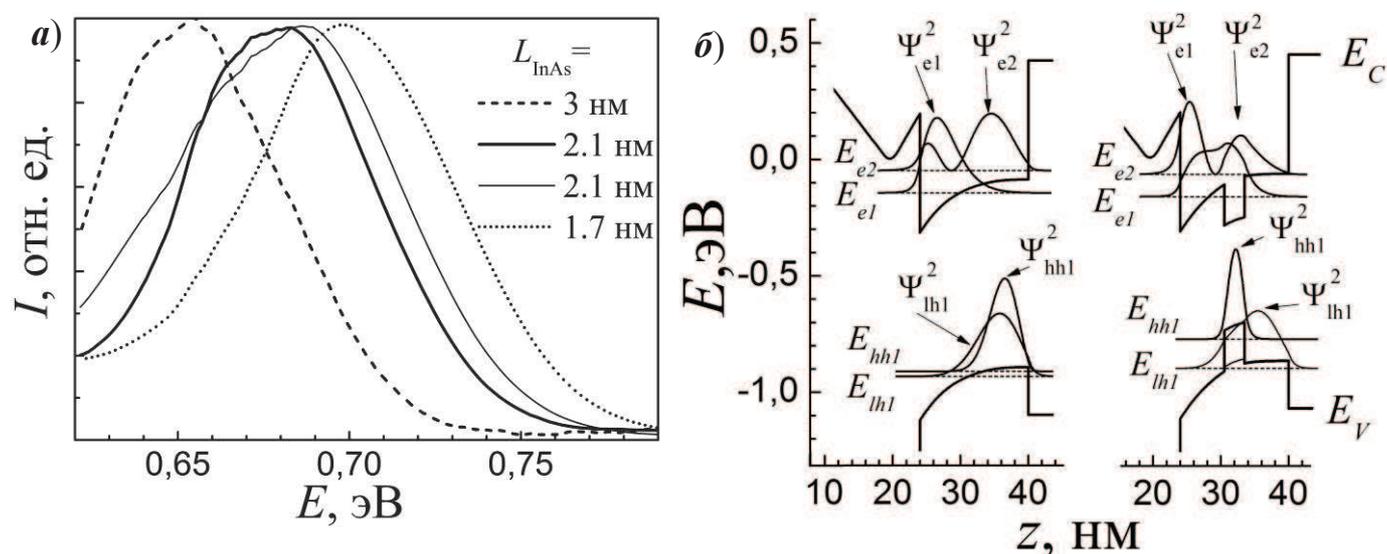


Рисунок 2. а) нормированные спектры ФЛ от КЯ InAlAs/InGaAs с нановставками InAs различной толщины; б) профили зон E_c и E_v , квадраты ВФ Ψ_i , уровни размерного квантования E_i в гетероструктурах $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ без InAs и со вставкой InAs толщиной 3 нм

Моделирование зонной структуры показало, что при введении вставки InAs в центре КЯ формируется дополнительная потенциальная яма для электронов и тяжелых дырок (рисунок 2 б). В слое InAs у ВФ электронов в подзонах Ψ_{e1} и Ψ_{e2} образуется локальный максимум. Из-за большой эффективной массы тяжелые дырки практически полностью локализуются в потенциальной яме слоя InAs, и положение края дырочной подзоны оказывается по энергии выше края валентной

зоны $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. В зависимости от L_{InAs} изменяется энергия размерного квантования уровня $hh1$ тяжелых дырок и происходит смещение линий ФЛ.

В разделе 4.2 представлены результаты исследования серии гетероструктур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с КЯ толщиной 16 нм, содержащей парные вставки InAs в слое $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (образец №3), вставки GaAs на границах слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (№4), одновременно InAs и GaAs (№5). Образец №2 не содержал вставок. Образцы выращивались при температуре $T_G = 500$ °С, для выращивания КЯ T_G снижалась до 430 °С. Концентрация электронов n_S в образцах составляла $(1.1-1.4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, введение парных вставок GaAs и InAs для используемых конструкции КЯ и технологических режимов роста привело к уменьшению подвижности электронов, по сравнению с обр. №2.

Исследование структуры образцов 2-5 методом ПЭМ подтвердило хорошее согласие технологически заданных и измеренных толщин слоев КЯ. Уменьшению величины размытия вставок InAs и GaAs , по сравнению с серией образцов с одиночной вставкой InAs , способствовало снижение температуры роста КЯ до 430 °С. На рисунке 3 а приведено ПЭМ изображение области КЯ образца №5, на котором отчетливо проявляется светлый контраст в области вставок InAs и темный контраст в области слоев GaAs . Дислокации и другие протяженные дефекты на снимках ПЭМ обнаружены не были.

На спектрах ФЛ образцов № 2-5 проявляются полосы излучения от КЯ (0.6 – 0.9 эВ) и гетерограницы буфер InAlAs – подложка InP (0.9 – 1.2 эВ), а также от подложки InP и буфера InAlAs . Вследствие перекрытия полос ФЛ от КЯ и гетерограницы InAlAs/InP для некоторых образцов (рисунок 3 б), была произведена точная идентификация происхождения этих линий при помощи послойного травления гетероструктур. Зависимость интенсивности полос ФЛ КЯ и гетерограницы от мощности возбуждения является линейной.

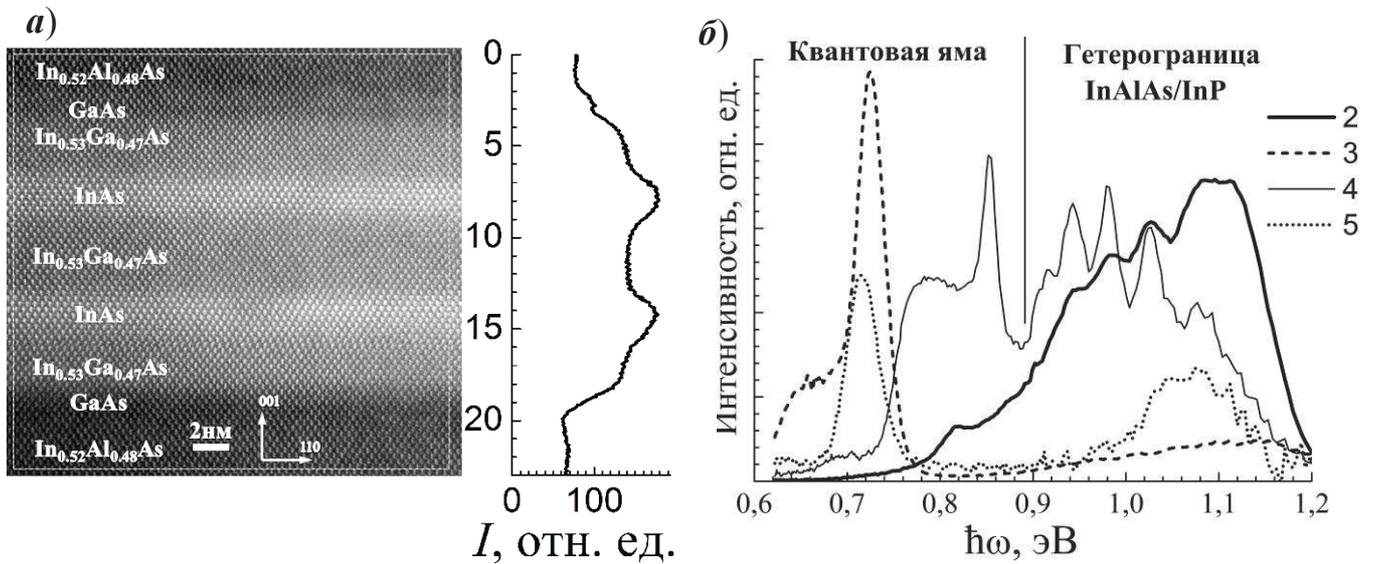


Рисунок 3. а) ПЭМ изображение области КЯ образца №5 с парными вставками InAs и GaAs и интегральный профиль сигнала ПЭМ; б) Спектры ФЛ гетероструктур $In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As$ с парными вставками InAs и/или GaAs

Спектры ФЛ от КЯ для образцов № 2-5 различаются интенсивностью, формой, и энергетическим положением, что обусловлено конструктивными особенностями СКЯ. Основная полоса в спектрах ФЛ от СКЯ образцов № 3 и № 5, содержащих парные вставки InAs, сдвигается приблизительно на 100 мэВ в сторону меньших энергий по сравнению с образцами № 2 и № 4, соответственно. В образцах № 4 и 5, содержащих нанослой GaAs, пик ФЛ от СКЯ также сдвигается в сторону меньших энергий по сравнению с образцами № 2 и №3, соответственно.

Моделирование зонной структуры показало, что на спектр электронов и дырок в СКЯ существенное влияние оказывают механические деформации слоев InAs и GaAs. Под действием упругих напряжений в GaAs и InAs происходит изменение ширины запрещенной зоны и расщепление потолка валентной зоны, в результате чего потенциальный профиль для тяжелых и легких дырок в СКЯ различается (рисунок 4).

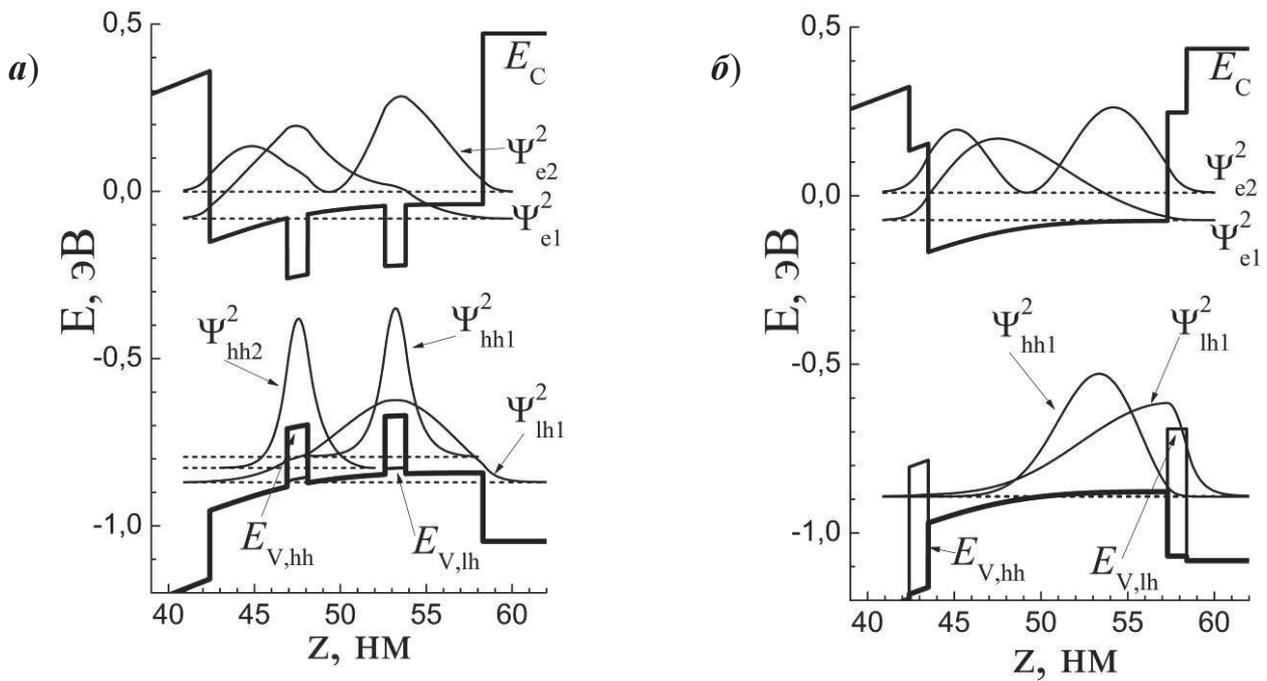


Рисунок 4. Зонные диаграммы составных КЯ *InGaAs/InAlAs*, содержащих парные вставки *InAs* (а) и *GaAs* (б)

Вставки *InAs* в слое $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ создают потенциальные ямы для электронов и тяжелых дырок и практически не влияют на легкие дырки. Введение слоев *InAs* в СКЯ приводит к увеличению амплитуды ВФ электронов и локализации тяжелых дырок в области вставок. При этом происходит снижение энергий межзонных переходов и усиление перекрытия электронной и дырочной ВФ. Слои *GaAs* в $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ являются барьерами для электронов и тяжелых дырок и создают яму для легких дырок. За счет этой потенциальной ямы при достаточной толщине слоев *GaAs* (более 1.1 нм) в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ со вставками *GaAs* основной (самой высокой по энергии) является подзона легких дырок, т.е. происходит инверсия положения подзон тяжелых и легких дырок. За счет изменения толщины и положения вставок *InAs* и *GaAs* в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ предложен способ отдельного управления энергиями и ВФ подзон тяжелых и легких дырок.

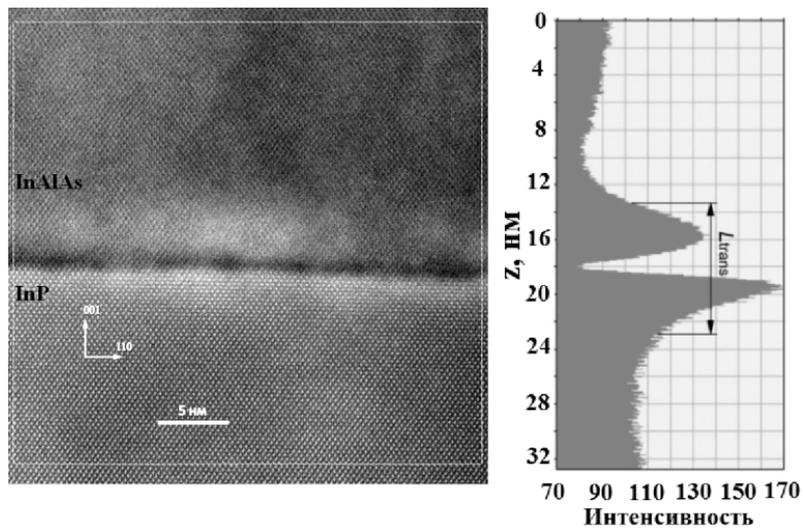


Рисунок 5. ПЭМ изображения и интегральные профили интенсивности сигнала от области гетерограницы InP/InAlAs

Обнаружено, что положение и форма полосы ФЛ от гетерограницы InAlAs/InP зависит от условий предостовой подготовки подложки. При увеличении максимальной температуры и длительности отжига подложки от 9 мин при 525 °С (для серии образцов с одиночной вставкой InAs) до 15 мин при 530 °С (для образцов №2-5) эта полоса ФЛ смещается в сторону меньших энергий и происходит увеличение ее интенсивности и ширины. Это объясняется формированием потенциальной ямы для электронов и дырок на гетерогранице внутри переходного слоя InAlAsP со сложным профилем состава (рисунок 5). Слой образовался в результате замещения атомов P в подложке InP атомами As при высокотемпературном отжиге в потоке мышьяка.

В **Главе 5** представлены результаты исследования спектров ФЛ метаморфных гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs. Образцы гетероструктур с содержанием индия в активной области $x = 0.7$ (раздел 5.1) различались профилем состава в МБ. Несмотря на то, что состав и толщина КЯ (17 нм), а также концентрация легирования в гетероструктурах были одинаковыми, концентрация и подвижность ДЭГ существенно различались: n_S изменялась в интервале $(1.3 - 2.1) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

В спектрах ФЛ образцов с КЯ $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ наблюдаются две полосы излучения, соответствующие рекомбинации электронов и дырок в КЯ ($0.6 < \hbar\omega < 0.78$ эВ) и в МБ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ (0.8 - 1.1 эВ) (рисунок 6 а). Полоса ФЛ от КЯ состоит из двух перекрывающихся пиков e1-hh1 и e2-hh1, причем линия e2-hh1 гораздо более интенсивная. В зависимости от концентрации электронов наблюдается линейная корреляционная связь между полушириной (Δ) линии ФЛ КЯ и концентрацией ДЭГ n_S (рисунок 6 б).

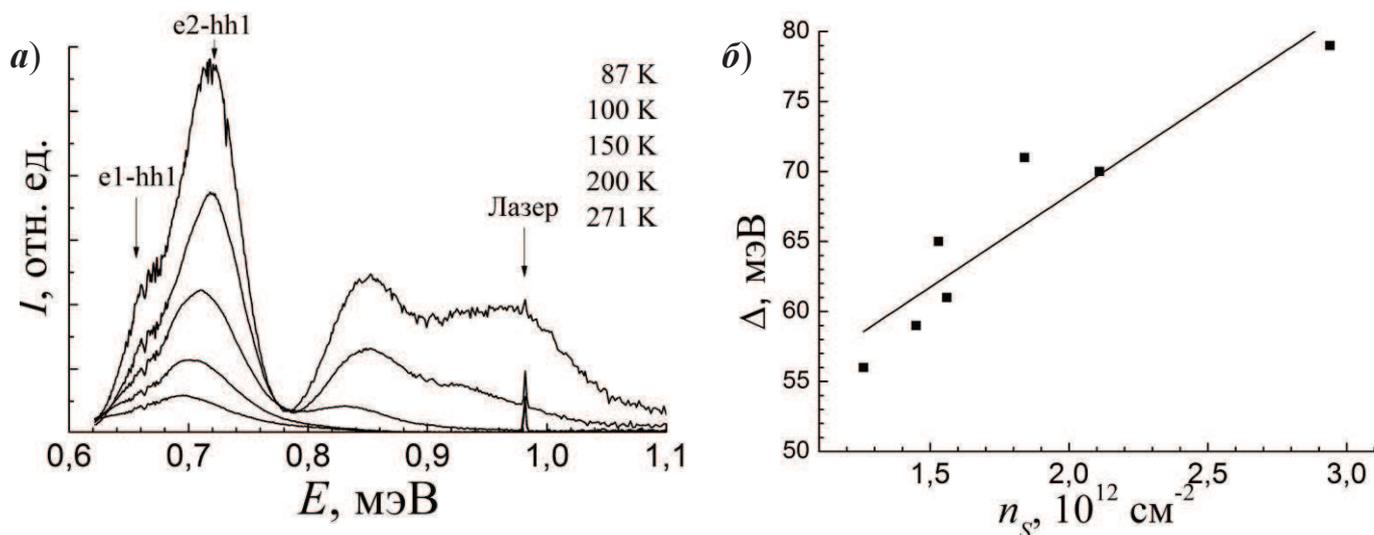


Рисунок 6. а) спектры ФЛ образца 889 в зависимости от температуры; б) корреляционная зависимость полуширины Δ линии ФЛ КЯ от концентрации электронного газа n_S

Полосы в спектрах ФЛ образцов в диапазоне 0.8 - 1.1 эВ состоят из нескольких компонент, соответствующих рекомбинации электронов и дырок в различных слоях МБ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ – инверсной ступени ($x = 0.75 \rightarrow 0.7$), заглаживающем слое $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ и барьере $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$. Форма спектров ФЛ от МБ изменялась от образца к образцу из-за особенностей профиля химического состава в МБ – линейного или ступенчатого, а также наличия внутри МБ напряженных сверхрешеток и инверсных ступеней.

В разделе 5.2 описаны результаты исследования оптических свойств метаморфных гетероструктур $\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}/\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{As}$ с КЯ толщиной 22 нм. В спектрах ФЛ образцов ($T = 77$ К) обнаружены четыре линии излучения,

соответствующие рекомбинации носителей заряда в КЯ (1.0 – 1.15 эВ), барьерной области InAlAs (1.8 – 1.9 эВ), подложке GaAs (1.51 эВ) и короткопериодной сверхрешетке GaAs/AlGaAs (1.69 эВ). Для всех образцов полоса ФЛ от КЯ состоит из двух линий e1-hh1 и e2-hh1, причем интенсивность перехода e2-hh1 существенно выше. Пик ФЛ от буфера InAlAs, в отличие от метаморфных гетероструктур с $x = 0.7$, не обладает многокомпонентной структурой. По разбросу положений пиков ФЛ от КЯ и буфера InAlAs была проведена оценка воспроизводимости состава твердых растворов $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на установке ЦНА-24 при выращивании толстого МБ (более 1 мкм), которая равна $\Delta x = \pm 0.02$.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен расчет электронного спектра и зонной структуры МЛГ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($x = 0.53 - 0.7$, $y = 0.4 - 0.52$) от геометрии гетероструктуры. Показано, что при отсутствии параллельной проводимости квантовые состояния электронов и дырок полностью определяются концентрацией ДЭГ n_S , толщиной КЯ и содержанием In x в КЯ. Построена номограмма зависимости энергий переходов e1-hh1 и e2-hh1 от концентрации ДЭГ n_S в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ различной толщины.

2. Экспериментально исследованы структурные и электронные свойства МЛГ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ с центральными вставками InAs. Впервые обнаружен монотонный сдвиг в сторону меньших энергий максимума ФЛ от СКЯ при увеличении толщины вставки InAs L_{InAs} . Путем моделирования зонной структуры СКЯ показано, что смещение пика ФЛ при вариации L_{InAs} в основном происходит за счет изменения энергии подзоны hh1 при локализации тяжелых дырок внутри слоя InAs.

3. Впервые исследовано влияние парных вставок GaAs и InAs на спектры ФЛ в МЛГ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. С использованием расчетного моделирования предсказан инверсный порядок подзон легких и тяжелых дырок в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, содержащих слои GaAs. Предложен способ независимого управления состояниями (энергиями и ВФ) тяжелых и легких дырок в КЯ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ за счет создания потенциальных ям в валентной зоне для

этих носителей напряженными вставками InAs (тяжелые дырки) и GaAs (легкие дырки).

4. В спектрах ФЛ гетероструктур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ на подложках InP обнаружена широкая и интенсивная полоса, связанная с рекомбинацией электронов и дырок вблизи гетерограницы. Положение и форма этой полосы ФЛ зависит от температуры и длительности отжига подложки. Эти изменения были объяснены формированием потенциальной ямы для носителей заряда в переходном слое InAlAsP, образовавшемся в результате замещения атомов P в подложке InP атомами As при отжиге в потоке мышьяка.

5. Измерены спектры ФЛ метаморфных гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ с содержанием индия в КЯ $x = 0.38$ и $x = 0.7$. Показано, что спектроскопия ФЛ позволяет отслеживать изменения содержания In в КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ для широкого диапазона изменения x . Обнаружена линейная зависимость полуширины пика ФЛ КЯ $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ от слоевой концентрации электронов. Форма и положение полосы ФЛ от метаморфного буфера определяются профилем химического состава в нем.

Публикации по результатам работы.

1. Г.Б. Галиев, А.Л. Васильев, И.С. Васильевский, Р.М. Имамов, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, П.П. Мальцев, С.С. Пушкарев, И.Н. Трункийн. Структурные и электрофизические свойства НЕМТ-наногетероструктур $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$ с различной комбинацией нановставок InAs и GaAs в квантовой яме // Кристаллография. – 2015. – Т. 60. – Вып. 3. – С. 459 – 468.

2. Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев. Фотолюминесцентные исследования метаморфных наногетероструктур $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ на подложках GaAs // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – Вып. 5. – С. 658 – 666.

3. G.B. Galiev, I.S. Vasilevskii, E.A. Klimov, S.S. Pushkarev, A.N. Klochkov, P.P. Maltsev, M.Yu. Presniakov, I.N.Trunkin, A.L.Vasiliev. Effect of (1 0 0) GaAs substrate misorientation on electrophysical parameters, structural properties and surface

morphology of metamorphic HEMT nanoheterostructures InGaAs/InAlAs // Journal of Crystal growth. – 2014. – V. 392. – P. 11 – 19.

4. Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев. Особенности фотолюминесценции HEMT-наногетероструктур с составной квантовой ямой InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т. 49. – Вып. 2. – С. 241 – 248.

5. Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, П.П. Мальцев, С.С. Пушкарев, О.М. Жигалина, Р.М. Имамов, А.Н. Кускова, Д.Н. Хмеленин. Электрофизические и структурные характеристики метаморфных HEMT наногетероструктур $\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{As}/\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}/\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{As}$ // Кристаллография. – 2013. – Т. 58. – Вып. 6. – С. 916 – 921.

6. Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, П.П. Мальцев. Влияние разориентации подложки (100) GaAs на электрофизические параметры и морфологию поверхности метаморфных HEMT наногетероструктур $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – Вып. 1. – С. 67 – 72.

7. Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев. Применение спектроскопии фотолюминесценции для исследования метаморфных наногетероструктур $\text{In}_{0.38}\text{Al}_{0.62}\text{As}/\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}/\text{GaAs}$ // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – Вып. 7. – С. 909 – 916.

8. Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзеева. Влияние встроенного электрического поля на оптические и электрофизические свойства P-HEMT наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 5. – С. 666 – 671.

9. G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov, S.S. Pushkarev, A.N. Klochkov, M.Yu. Presniakov, I.N. Trunkin, A.L. Vasiliev. Effect of (1 0 0) GaAs substrate misorientation on electrophysical parameters, structural properties, and surface morphology of metamorphic HEMT nanoheterostructures $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ // Proceedings of the

21st International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology». – St. Petersburg: Academic University Publishing, 2013. – P. 283-284.

10. Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев. Спектроскопия фотолюминесценции для исследования МНЕМТ наногетероструктур $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ с различным дизайном метаморфного буфера // Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников (XI РКФП). – СПб.: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2013. – С. 225.

11. Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, С.С. Пушкарев, Д.В. Лаврухин, О.М. Жигалина, А.Н. Кускова, Д.Н. Хмеленин, П.П. Мальцев. Исследование влияния конструкции метаморфного буфера и давления мышьяка на электрофизические и структурные характеристики МНЕМТ гетероструктур $\text{In}_{0.37}\text{Al}_{0.63}\text{As}/\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ // Тезисы докладов XI Российской конференции по физике полупроводников (XI РКФП). – СПб.: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2013. – С. 231.

12. G. B. Galiev, I. S. Vasil'evskii, E. A. Klimov, S. S. Pushkarev, A.N. Klochkov, P.P. Maltsev, M.Yu. Presniakov, I.N.Trunkin, A.L.Vasiliev. Epitaxial technology of the composite quantum wells $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ with ultrathin InAs insertions // Proceedings of the 22st International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology». – St. Petersburg: Academic University Publishing, 2014. – P. 263-264.

13. Г.Б. Галиев, С.С. Пушкарев, П.А. Просеков, Р.М. Имамов, А.Е. Благов, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин. Характеризация НЕМТ-наногетероструктур $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ на подложках InP с нановставками InAs в квантовой яме // Труды XIX международного симпозиума “Нанозифика и нанозлектроника”. В 2 т. Том II. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2015. – С. 636-637.