

*На правах рукописи*

ВАСИЛЬЕВСКИЙ ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ И ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА  
В ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ  
НА ОСНОВЕ  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  С ПРОСТРАНСТВЕННО-  
НЕОДНОРОДНЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ  
НАНОСЛОЯМИ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные  
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Автор: *Васильевский*

МОСКВА, 2018

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

Научный консультант:

**Стриханов Михаил Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор НИЯУ МИФИ.

Официальные оппоненты:

**Устинов Виктор Михайлович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор ФГБУН "Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур" РАН;

**Хохлов Дмитрий Ремович**, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова;

**Каган Мирон Соломонович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник ФГБУН "Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН".

Ведущая организация: ФГБУВОН "Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук".

Защита диссертации состоится "18" октября 2018 года в 15 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.130.13 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 "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2018 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 212.130.13  
кандидат технических наук, доцент



Веселов Д.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность направления исследования

Эволюция современной электроники является одним из ключевых факторов, определяющих облик цивилизации. Развитие электроники в значительной степени сопровождается поиском новых материалов и совершенствованием технологий создания приборов. В сверхвысокочастотной (СВЧ) твердотельной электронике для наиболее важного полупроводникового элемента монолитных интегральных схем (МИС) - полевого транзистора с барьером Шоттки, основными тенденциями являются повышение частоты, снижение шумов, увеличение мощности и коэффициента полезного действия (КПД). Помимо продуманного топологического дизайна, предельные параметры обусловлены фундаментальными свойствами электронного транспорта в многослойной полупроводниковой гетероструктуре - базовом материале СВЧ МИС. Развитие метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) открыло широчайшие возможности для инженерии материалов электроники с заданными свойствами. Применение принципов модулированного и дельта ( $\delta$ -) легирования широкозонных слоев привело к созданию нового класса наногетероструктур - НЕМТ (гетероструктуры с высокой подвижностью электронов). Несмотря на то, что физика и технология АЗВ5 НЕМТ развивается уже более 30 лет, существуют ощутимые пробелы в фундаментальных исследованиях и теоретических моделях для электронного транспорта в НЕМТ с высокой плотностью ( $n_s > 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) и подвижностью носителей тока, как то: обоснование механизмов предельного легирования, трактовка явлений параллельной проводимости, феноменология электронного транспорта в сильном электрическом поле. Ввиду значительной сложности физической модели структуры, ее многофакторности, во многих зарубежных работах, нацеленных на исследования InGaAs НЕМТ квантовых ям (КЯ) с высокой электронной плотностью, применялись эмпирические подходы и достаточно стандартные слоевые схемы базовых НЕМТ структур [1]. Наиболее глубокие теоретические модели были созданы только для однопереходных AlGaAs/GaAs НЕМТ с заметно более низкой плотностью носителей тока и квазотреугольной формой потенциала КЯ. Отметим, что до 2005 г. также практически отсутствовали отечественные исследования в области физики и технологии двумерных систем на основе InGaAs РНЕМТ КЯ (псевдоморфных НЕМТ КЯ на подложках GaAs) и InP НЕМТ (на подложках InP) с различным содержанием InAs. Возникла потребность глубокого физического исследования на основе полного квантового описания электронных состояний и процессов рассеяния носителей тока в сложных двумерных системах с высокой электронной плотностью в условиях нескольких заполненных подзон размерного квантования, возникающих в многослойных InGaAs НЕМТ гетероструктурах. С другой стороны, важно было также учесть влияние на электронные свойства структурных факторов, ограничивающих широту

применения полупроводниковых твердых растворов с учетом механических деформаций в многослойной структуре. В последние 10 лет интерес к InGaAs НЕМТ гетероструктурам заметно возрос [2–4]. Несмотря на развитие технологий новых материалов, например, нитридных AlGaInN структур, поиск путей повышения проводимости, управления эффективной массой и процессами рассеяния носителей тока является актуальным как с фундаментальной точки зрения исследования свойств низкоразмерных систем с высокой электронной плотностью, так и для развития СВЧ гетероструктурной электроники.

**Цель работы:** решение научной проблемы управления пространственной структурой электронных состояний, эффективной массой и процессами рассеяния электронов в слабом и сильном электрическом поле в гетероструктурных квантовых ямах на основе  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  с высокой электронной плотностью ( $10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) за счет введения в структуру пространственно-неоднородных функциональных нанослоев различного состава.

### **Задачи работы**

Для достижения поставленной цели решался комплекс задач:

1. Исследование физических механизмов, ограничивающих достижение одновременно высоких значений концентрации и подвижности/дрейфовой скорости электронов в базовых гетероструктурах с квантовыми ямами на основе  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  с однородными слоями.

2. Развитие новых физических подходов по созданию арсенидных структур с квантовыми ямами на основе  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  с введенными в структуру пространственно-неоднородными функциональными нанослоями для управления пространственной структурой электронных состояний, увеличения электронной плотности и проводимости.

3. Исследование особенностей эпитаксиального роста и условий формирования кристаллически совершенных НЕМТ гетероструктур с квантовыми ямами на основе  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , содержащих пространственно-неоднородные слои, включающие нановставки AlAs, InAs, GaAs и варизонный слой  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ .

4. Развитие подходов по управлению эффективной массой и рассеянием горячих электронов в составных КЯ на основе  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  НЕМТ/InP с высоким содержанием InAs за счет внедрения в КЯ одиночных и двойных нановставок InAs и GaAs.

### **Объекты исследования**

В работе исследованы образцы с гетероструктурными квантовыми ямами с высокой подвижностью и концентрацией электронов, с односторонним и двусторонним  $\delta$ -легированием кремнием, на основе двух типов гетеросистем. **Первый базовый тип** - это псевдоморфные (PHEMT) КЯ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$  на подложках GaAs с составом слоев из диапазона  $x \sim 0,15 \div 0,28$ ,  $y \sim 0,15 \div 0,22$ ,  $z = 0$ , либо  $z \sim 0,15 \div 0,28$ . **Второй базовый тип** - изоморфные и псевдоморфные НЕМТ структуры  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As} / \text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  на подложках InP с составом слоев  $x \sim 0,52$ ,  $y \sim 0,53 \div 0,65$ . В сериях образцов

исследовалось влияние на электронные свойства КЯ при следующих изменениях в функциональных слоях:

**в базовой структуре I-го типа:**

- при последовательном уменьшении толщины широкозонного барьера  $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$  между поверхностью и  $\delta$ -слоем доноров  $L_b$  вплоть до толщины 5,5 нм;
- при изменении концентрации донорного  $\delta$ -легирования кремнием в односторонне- и двусторонне легированных КЯ с различным содержанием  $x(\text{AlAs})$ , ( $x=0,23$  и  $x=0,27$ );
- при использовании вместо однородного канала  $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  варизонного слоя  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  с переменным профилем состава вдоль его толщины  $y(\text{InAs})$  с градиентом состава  $\partial y/\partial z$  до  $1,2 \div 2$  %/нм;
- при введении в спейсерный/донорный слой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  одного или двух нанослоев  $\text{AlAs}$  толщиной  $1 \div 2$  нм, в однородный слой  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ;
- при введении легированного донорного слоя  $\text{AlAs}(\delta\text{-Si})$  толщиной 8 нм в составе барьера  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ;
- при введении на гетерограницах легированной КЯ  $n\text{-In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$   $\delta$ -легированных переходных барьеров  $\text{GaAs}$ , для частичного или полного устранения легирования слоя  $\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ ;

**в базовых структурах II-го типа  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}$  HEMT на  $\text{InP}$ :**

- при последовательном увеличении содержания  $\text{InAs}$  в однородной псевдоморфной КЯ  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y=0,53 \div 0,65$ );
- при переходе к двустороннему  $\delta$ -легированию кремнием от одностороннего;
- при введении одиночных и двойных нановставок  $\text{InAs}$  толщиной  $1 \div 4$  нм в КЯ вместо однородного слоя  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ;
- при введении двойных переходных нанобарьеров  $\text{GaAs}$  и нановставок  $\text{InAs}$  в КЯ.

**Методология исследований**

Развитая в работе методология состоит в следующем. Во-первых, в нескольких базовых типах гетероструктур с однородной КЯ  $\text{InGaAs}$  и различным содержанием  $\text{InAs}$  на основании как аналитического обзора, так и оригинальных исследований установлены факторы, ограничивающие достижение предельных значений параметров электронного транспорта. Во-вторых, для каждого рассматриваемого типа выбран способ направленного изменения конструкции активных слоев структуры, обеспечивающий управление параметрами электронного транспорта. Важным ограничивающим условием в данной работе являлось сохранение набора используемых арсенидных полупроводниковых соединений  $(\text{InAlGa})\text{As}$  и типа легирующей примеси ( $\text{Si}$ ). В этом случае расширение дизайна КЯ может базироваться только на переходе от однородных по составу основных активных слоев гетероструктур (квантовой ямы, спейсерных/донорных слоев, барьерных слоев) к пространственно-неоднородным слоям. Неоднородность слоев в предложенных в работе

подходах реализуется за счет либо непрерывного изменения состава InAs в  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , либо за счет введения нанослоев бинарных полупроводников AlAs, InAs, GaAs толщиной порядка  $1\div 10$  нм.

**Функциональные нанослои** в НЕМТ - это тонкие активные слои гетероструктуры, которые при введении в базовую структуру обеспечивают изменение в электронных свойствах, значительно превышающее эффект, связанный со вкладом этих слоев в изменение средней толщины и/или среднего состава базовой гетероструктуры. Вводимые в базовую НЕМТ структуру нановставки или варизонные слои локально влияют на пространственный профиль потенциала, эффекты поперечного туннелирования двумерных электронов, область локализации и профили волновых функций носителей тока, вероятности межподзонных переходов, изменяют энергию уровней размерно-квантованных подзон и скорость электрон-фононного рассеяния. В результате направленно изменяются заполнение электронных подзон, условия рассеяния носителей тока в слабом и сильном электрическом поле, оптические свойства гетероструктур с КЯ на основе InGaAs.

Переход к составным НЕМТ КЯ, содержащим бинарные нановставки или варизонный слой  $\text{In}_{y(h)}\text{Ga}_{1-y(h)}\text{As}$  потребовал адаптации режимов эпитаксиальной технологии для обеспечения требуемой точности и высокого кристаллического совершенства таких структур и малого размытия гетерограниц, ввиду крайне малой толщины вводимых слоев, наличия вносимых механических напряжений, больших градиентов состава.

Для каждого типа структур проводилось расчетное моделирование и анализ для выбора наиболее удачной конструкции НЕМТ КЯ, содержащей пространственно-неоднородные слои. При экспериментальных исследованиях выявлялось влияние либо отдельных факторов, либо ограниченной группы взаимосвязанных факторов при прочих равных условиях. Для этого серии гетероструктур содержали опорный образец базовой НЕМТ структуры для сравнительного анализа. Выращенные образцы подвергались структурному анализу толщин и состава и кристаллического совершенства слоев. Для анализа электронных свойств гетероструктур использовались несколько взаимодополняющих методов исследования, позволяющих надежно установить и разделить факторы, обуславливающие изменения зонной структуры, механизмы рассеяния носителей заряда и т.п.

***Преимущества предлагаемых подходов:***

- малая толщина дополнительно вводимых функциональных нанослоев позволяет нивелировать проблемы механической совместимости и позволяет использовать соединения с большим рассогласованием параметров решетки;

- дополнительные функциональные слои позволяют усилить квантовомеханический подход к разработке конструкций КЯ, что предоставляет дополнительную степень свободы

не только для зонного дизайна, но и контроля процессов рассеяния носителей тока, расширяя инженерии гетероструктурных материалов с заданными свойствами.

- для реализации подходов не требуется добавление новых источников элементов в процессе МЛЭ по сравнению с классической АЗ-As компоновкой.

**Использованные аппаратные методы.** Выращивание образцов: метод молекулярно-лучевой эпитаксии - установка Riber Compact 21T (НИЯУ МИФИ) и ЦНА-24 (ИСВЧПЭ РАН). Изготовление меза-структур с омическими контактами - линии комплексной технологии ИФЯЭ НИЯУ МИФИ и ИСВЧПЭ РАН. Измерение электронных транспортных свойств: исследование температурных зависимостей сопротивления, подвижности и концентрации электронов – Esoria HMS 5000 (НИЯУ МИФИ), исследование квантовых осцилляций магнетосопротивления при низких температурах – криомагнитные установки Cryotel 8T (НИЯУ МИФИ) и в МГУ им. М.В. Ломоносова (лаборатория Кульбачинского В.А.), исследования электронного транспорта в сильном электрическом поле (Semiconductor Physics Institute, Литва). Структурные исследования - рентгеновская дифрактометрия (НИЯУ МИФИ, ИК РАН), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) (НИЦ КИ), профилирование состава с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) (ИСВЧПЭ РАН, ФГУП НИИФП им. Лукина). Оптические измерения - спектроскопия фотолюминесценции (ИСВЧПЭ РАН), фотоотражение (МГУ).

#### **Положения, выносимые на защиту**

1) Показано, что добавление компенсирующего поверхностный потенциал донорного одностороннего легирования в  $1\delta$ -PHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктурах позволяет при сокращении глубины залегания квантовой ямы до  $\sim 3$  раз (с 28 нм до 10 нм) сохранить высокие значения концентрации и подвижности электронов.

2) Обоснован физический механизм немонотонной зависимости подвижности от толщины барьерного слоя Шоттки AlGaAs при уменьшении глубины залегания КЯ AlGaAs/InGaAs/GaAs, за счет особенностей температурно-независимого вклада рассеяния на удаленных ионизированных донорах.

3) Установлено, что увеличение концентрации донорного легирования в двусторонне-легированных кремнием PHEMT AlGaAs/InGaAs/AlGaAs квантовых ямах в диапазоне концентраций электронов  $(2,0 \div 4,0) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  приводит к насыщению концентрации электронов в нижней электронной подзоне и снижению подвижности электронов при рассеянии на ионизированных примесях вследствие заполнения второй электронной подзоны и сокращения эффективной глубины КЯ.

4) Разработан подход и реализована эпитаксиальная технология создания варизонных PHEMT КЯ с неоднородным распределением InAs в канале  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , позволяющие уменьшить негативный эффект снижения подвижности при увеличении легирования в двусторонне-легированных PHEMT гетероструктурах. При перераспределении InAs в КЯ для

обеспечения близкого к прямоугольному профиля КЯ достигается совместное увеличение концентрации и подвижности электронов (до  $\sim 10\%$  и  $\sim 25\%$  при низких температурах, соответственно) за счет увеличения эффективной глубины КЯ.

5) В РНЕМТ гетероструктурах с односторонним  $\delta$ -легированием кремнием при увеличении концентрации электронов в диапазоне  $(0,5 \div 2,5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  наблюдается немонотонная зависимость подвижности электронов от концентрации, причем максимум подвижности электронов определяется составом и толщиной спейсерного слоя AlGaAs. Возрастание подвижности связано с ростом импульса Ферми при рассеянии электронов на удаленных ионизированных донорах, снижение подвижности обусловлено увеличением рассеяния электронов на большие углы при туннельной деградации спейсерного слоя под действием встроенного поля в спейсере.

6) Обнаружено, что негативный эффект снижения подвижности электронов в КЯ, возникающий в сильнолегированных НЕМТ гетероструктурах при промежуточной толщине спейсера ( $d_s \sim 6 \div 20 \text{ нм}$ ), обусловлен пространственной гибридизацией состояний в канале и в широкозонном барьере и может быть значительно ослаблен путем добавления в спейсер широкозонного нанобарьера AlAs.

7) Составная КЯ с комбинированным легированием канала InGaAs и  $\delta$ -легированием переходных нанобарьеров GaAs в HFET структурах позволяет увеличить одновременно концентрацию до  $n_s \sim (1,0 \div 1,4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и подвижность электронов по сравнению с однородно-легированными HFET КЯ за счет оптимизации области локализации доноров с учетом пространственной структуры электронных состояний. Увеличение проводимости в таких структурах составляет до  $\sim 50\%$  при комнатной температуре.

8) Введение двойных узкозонных нановставок InAs в канал InGaAs обеспечивает снижение эффективной массы электронов в КЯ InGaAs, при этом удается избежать резкого уменьшения эффективной ширины составной квантовой ямы.

### **Научная новизна**

1. Развито квантовое описание явления "параллельной проводимости" с учетом влияния пространственной структуры электронных состояний на электронные транспортные свойства НЕМТ структур с сильным легированием через спейсерный слой в пределе высокой концентрации электронов для механизма рассеяния на ионизированных донорных примесях.

2. Систематически исследован процесс масштабирования РНЕМТ гетероструктуры при приближении квантовой ямы к поверхности, обнаружена немонотонная зависимость подвижности и концентрации электронов от глубины залегания КЯ при увеличении донорного легирования кремнием.

3. Развита методика по использованию тонких нанобарьеров AlAs для значительного увеличения подвижности электронов путем подавления туннельной связи пространственно-гибридизированных состояний без существенного изменения распределения суммарной

электронной плотности (в случае одного барьера в спейсере) или с вытеснением электронных состояний из окрестности  $\delta$ -легированного слоя (в случае двух нанобарьеров, окружающих  $\delta$ -Si слой).

4. Развита новый подход в конструировании HFET гетероструктур с легированным каналом для получения высокой проводимости, состоящий в добавлении в структуру составной КЯ  $\delta$ -легированных донорами кремния переходных нанобарьеров GaAs, и снижении легирования узкозонного канала  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ .

5. Получен ряд новых результатов, демонстрирующих преимущества использования составных КЯ, содержащих двойные узкозонные нановставки InAs вместо одиночной вставки, впервые в структуре составных КЯ InAlAs/InGaAs/InAlAs применены напряженные нанослои GaAs в качестве фононных барьеров (получен патент РФ).

6. Развита новый подход по созданию варизонного слоя квантовой ямы  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  и создана методика эпитаксиального роста, позволяющая изготавливать кристаллически совершенные варизонные слои InGaAs с большим градиентом состава InAs – до 2%/нм.

7. Разработана технология эпитаксиального роста составных КЯ на основе канала  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y \sim 0,53$ ) с напряженными нановставками InAs и GaAs, обеспечивающая малое размытие гетерограниц и высокое структурное качество составных квантовых ям при высоком содержании InAs в составной КЯ.

8. Впервые экспериментально установлено влияние двойных нановставок InAs и переходных барьеров GaAs в составных КЯ на подложках InP на рассеяние горячих электронов. Показано, что такие функциональные нанослои за счет подавления электрон-фононной связи с модами поверхностных и захваченных оптических фононов, выступают как "фононные барьеры", что обеспечивает управление дрейфовой скоростью насыщения электронов и изменяет электрическое поле насыщения.

### **Практическая значимость**

Развита 5 новых подходов, расширяющих возможности дизайна НЕМТ гетероструктур с высокой электронной плотностью по сравнению с уже известными конструкциями/приемами. Среди них первая группа связана с модификацией канального слоя: 1) варизонные КЯ с использованием переменного профиля состава InAs в РНЕМТ гетероструктурах AlGaAs/ $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ /AlGaAs ( $\langle y \rangle \sim 0,2$ ); 2) использование составных КЯ с узкозонными нановставками InAs и переходными барьерами GaAs в НЕМТ гетероструктурах InAlAs/ $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ /InAlAs ( $y \sim 0,53$ ) на подложках InP. Вторая группа связана с модификацией спейсера/барьера/донорного слоя в РНЕМТ гетероструктурах с КЯ AlGaAs/ $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ /AlGaAs ( $y \sim 0,2$ ): 3) введение нанобарьеров AlAs в спейсерный слой; 4) переход от объемного легирования к комбинированному легированию с  $\delta$ -слоями кремния в переходных нанобарьерах GaAs; и 5) уменьшение толщины барьерного слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  для приближения

КЯ к поверхности с одновременным увеличением концентрации доноров для компенсации поверхностного потенциала.

Разработанные подходы обеспечивают улучшение параметров электронного транспорта в транзисторных НЕМТ гетероструктурах с КЯ  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  при высокой электронной плотности: увеличение дрейфовой скорости электронов (1, 2, 3), увеличение концентрации электронов в канале (1, 4). Ряд подходов применим для улучшения транзисторных характеристик в сравнении с традиционно используемыми для них конструкциями гетероструктур: для увеличения крутизны (1, 2, 5), увеличения граничных частот усиления (1, 2, 5), увеличения мощности транзистора (3, 4). Результаты работы позволяют, не выходя за пределы традиционно используемых полупроводниковых гетеросистем  $\text{AlGaAs/InGaAs}$  на подложках  $\text{GaAs}$  и  $\text{InAlAs/InGaAs}$  на подложках  $\text{InP}$ , модифицировать конструкцию гетероструктур при помощи функциональных вставок - барьерных или узкозонных нанослоев, для управления рассеянием электронов и увеличения параметров электронного транспорта - подвижности и концентрации электронов, их дрейфовой скорости.

Представляемый цикл работ выполнен в течение 12 лет в рамках решения задач разработки отечественных гетероструктурных СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем сначала в Институте СВЧ полупроводниковой электроники РАН, а затем в ИФЯЭ НИЯУ МИФИ. С использованием результатов настоящей работы были созданы отечественные технологии РНЕМТ КЯ с односторонним и двусторонним  $\delta$ -легированием (2006 г., 2009 г.),  $\text{InP}$  НЕМТ с изоморфным и псевдоморфно напряженным каналом (2007 г.), МНЕМТ метаморфных гетероструктур на подложках  $\text{GaAs}$  (2012 г.), не уступающих, а по ряду параметров - превосходящих мировой уровень. Результаты работы востребованы научными группами, ведущими разработки в области СВЧ гетероструктурной электроники в ИСВЧПЭ РАН им. В.Г. Мокерова, НИЯУ МИФИ, АО "НПП "Пульсар", АО НПП Исток, ФГУП "РНИИРС", ОАО "ЦКБА", ОАО "ОКБ-Планета", ФГУП "ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова", АО НПФ Микран, ООО "Коннектор-оптикс", ЗАО "Светлана-рост". Результаты использованы при выполнении НИР и НИОКР в НИЯУ МИФИ (НИР «Разработка технологии и конструкции радиационно стойких функциональных материалов на основе полупроводниковых наногетероструктур соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$ »; ФЦП «Кадры», 2009-2011 гг.; НИОКР «Разработка технологии молекулярно-лучевой эпитаксии Р-НЕМТ гетероструктур для радиационно-стойкой СВЧ электроники», 2010 г.; НИР «Разработка технологии создания радиационно-стойких транзисторов мм-диапазона частот на основе наногетероструктур  $\text{InAlAs/InGaAs}$ »; 2012-2014 гг.), были использованы в НИЯУ МИФИ при создании учебных дисциплин кафедры 67 "Физика конденсированных сред". Четыре новых типа гетероструктур с каналом  $\text{InGaAs}$  защищены патентами РФ.

**Достоверность** результатов работы обусловлена применением современных и общепризнанных экспериментальных методов создания образцов и их исследования. **Точность** создания гетероструктур и качество изготовления исследуемых образцов были установлены несколькими взаимодополняющими методами структурной характеристики (рентгеновская дифрактометрия, ПЭМ микроскопия, вторично-ионная масс-спектрометрия при ионном травлении, микроскопия поверхности). Латеральная неоднородность состава и толщины слоев на диаметре пластин 50 мм не превышала 3%. Использовались надежные методики исследования, реализованные на современном серийно выпускаемом и аттестованном оборудовании и в нескольких независимых организациях. Межа-структуры для измерения электронных транспортных свойств изготовлены методами литографии и металлизации, обеспечивающими высокую точность и воспроизводимость измерений.

#### **Личный вклад**

Определяющий вклад в работу внесен автором. Автором лично поставлены и сформулированы большинство задач исследований и реализованы физические подходы к решению этих задач. Выполнена основная часть экспериментальных исследований, включая рост и измерения образцов, проведены теоретические расчеты. В рамках отдельных направлений работы под руководством/консультированием автора защищены 4 диссертации на соискание уч. степени к.ф.-м.н.: Хабибуллиным Р.А., Пономаревым Д.С., Климовым Е.А. и Виниченко А.Н., которые участвовали в измерениях образцов и проведении расчетов. Часть работ по технологии выращивания РНЕМТ гетероструктур была проведена автором в ИСВЧПЭ РАН совместно с коллегами из лаборатории №101 МЛЭ Галиевым Г.Б. и Климовым Е.А. Часть криомагнитных измерений выполнена в лаборатории Кульбачинского В.А. в МГУ им. М.В. Ломоносова. Измерения электронных транспортных свойств в сильном электрическом поле проведены группой ИФП Литвы под руководством акад. РАН Ю.К. Пожела на разработанных и изготовленных автором образцах.

#### **Апробация результатов работы**

Результаты работы многократно докладывались на профильных всероссийских и международных научных конференциях, научных семинарах в ведущих организациях по данной предметной области, опубликованы в реферируемых научных журналах. Основные результаты представлялись на: Всероссийских совещаниях по физике низких температур, НТ-33 и НТ-34; Российских конференциях по физике полупроводников (2003, 2005, 2007, 2013, 2015 и 2017 гг.); International Workshop on Modulation Spectroscopy of Semiconductor Structures, 2004 (Wroclaw); 25<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics, Amsterdam, August 2008; International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology (2003, 2007, 2011, 2012, 2014 гг.); International Conference on Micro- and Nanoelectronics, ICMNE- 2005, 2009, 2012; 5-й Национальной Конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследований наноматериалов и

наносистем, РСНЭ-НАНО 2005, (Москва); XIV Национальной конференции по росту кристаллов, НКРК-2010; Втором международном форуме по нанотехнологиями РОСНАНО - 2009; международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» - 2011, 2-й международной конференции «Технологии микро- и наноэлектроники в микро- и наносистемной технике»; Научных сессиях МИФИ - 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.; профильной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Моковские чтения" - 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 и 2017 гг, International Scientific School "Epitaxial technology of novel materials and nanostructures" (2017) - приглашенный доклад; на специализированных предметных семинарах: совещании по проблемам разработки СВЧ ЭКБ, АУ РАН (Ж.И. Алферов) (2011); семинаре основателя метода МЛЭ, проф. Артура Госсарда, UCSB, Santa Barbara, USA (2012); совещании по проблемам создания сверхширокополосных систем связи ЦКБА Омск (2018).

**Публикации.** Содержание работы отражено в 57 публикациях, в том числе 48 публикациях в журналах, входящих в перечень ВАК, 2-х монографиях и 4-х патентах РФ. Список основных работ по теме диссертации приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы из 479 наименований. Диссертация содержит 308 страниц, включает 162 рисунка и 19 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность тематики диссертационной работы, описаны изучаемые объекты исследования, сформулированы цели и задачи работы, методы исследования, новизна и практическая значимость работы, а также выносимые на защиту положения. Приводятся сведения об апробации и список публикаций по теме диссертации, использовании результатов работы.

В **первой главе** приведен обзор особенностей слоевых конструкций и электронных свойств квантовых ям с каналом  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ . Рассмотрены различные гетеросистемы, особенности конструкции и электронные транспортные свойства, применение в приборах для  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  НЕМТ, РНЕМТ,  $\text{InP}$  НЕМТ и РНЕМТ, МНЕМТ и  $\text{InAs}/\text{AlSb}$ . Представлены основные теоретические и экспериментальные данные об энергетическом спектре электронов в квантовых ямах, структуре двумерных подзон, механизмах рассеяния двумерных электронов. Анализируются подходы по эпитаксии и оптимизации конструкции  $\text{InGaAs}$  НЕМТ структур с различным содержанием  $\text{InAs}$ . Критически рассмотрено состояние проблемы влияния пространственно-неоднородных слоев на электронные свойства  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  НЕМТ КЯ. Анализ литературных данных выявил, что в отличие от хорошо изученных НЕМТ  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ , РНЕМТ КЯ на основе  $\text{InGaAs}$  недостаточно изучены: ограничения по

легированию кремнием таких структур; зависимость подвижности электронов от концентрации; эффекты многоподзонной проводимости; эффекты, возникающие в сильном электрическом поле, в т.ч. рассеяние на оптических фононах и перенос горячих электронов в реальном пространстве. Известный для InP НЕМТ КЯ с  $y > 53\%$  подход по внедрению в структуру нановставки InAs носит эмпирический характер и не раскрывает фундаментальных физических ограничений. Публикации по КЯ с каналом  $In_yGa_{1-y}As$  отличает заметный дисбаланс - соотношение числа прикладных работ к фундаментальным составляет более 6. Таким образом, для комплексного исследования необходимы исследования структуры электронных состояний, заполнения подзон КЯ электронами, оптических свойств, квантовых магнетотранспортных эффектов в сильном магнитном поле, электронного транспорта при различных температурах, как в слабом, так и в сильном электрическом поле с учетом квантовых эффектов в НЕМТ структурах.

Первые отечественные фундаментальные исследования базовых РНЕМТ с  $\delta$ -легированием были проведены в наших работах [A1÷A3]. Показано преимущество  $\delta$ -легированных РНЕМТ КЯ перед КЯ с объемным донорным слоем n-AlGaAs(Si) [A1]. Определено влияние толщины спейсерного слоя на зонную структуру, оптимизирована технология роста и исследованы оптические свойства односторонне-легированных  $1\delta$ -РНЕМТ КЯ [A2, A3] и с двусторонним  $\delta$ -легированием  $2\delta$ -РНЕМТ КЯ [A4]. Использование нанослоев AlAs в НЕМТ КЯ было теоретически обосновано в ряде теоретических работ для снижения рассеяния горячих электронов в сильном электрическом поле за счет изменения коэффициента электрон-фононной связи [5]. Однако наши экспериментальные исследования показали, что введение высокого потенциального барьера в КЯ приводит к сильному искажению зонной структуры [A5]. Методология использования нанобарьеров AlAs была применена сначала для КЯ GaAs/InGaAs/GaAs, введение центрального барьера AlAs в КЯ вызывало гибридизацию электронных состояний [A6] и снижение параметров электронного транспорта в КЯ [A7]. Основные результаты исследований к 2009 г. были суммированы в монографии [A8]. Нами было предложено использовать в качестве фононного барьера гетерослой, не приводящий к ухудшению параметров электронного транспорта на основе узкозонных нановставок InAs [A9]. Ввиду структурных ограничений, такие вставки наиболее применимы в гетеросистеме InGaAs/InAlAs на подложке InP. В работе [A10] проведена разработка технологии и комплексное исследование свойств изоморфных и псевдоморфно напряженных однородных КЯ на подложке InP. Наконец, была разработана технология эпитаксии структур с одиночной вставкой InAs в КЯ, исследованы их свойства [A11]. Исследованы возможности по расширению дизайна НЕМТ InGaAs КЯ структур с произвольным составом InAs (до 100%) на основе метаморфной технологии с различной

конструкцией метаморфных буферов, согласующих активные слои НЕМТ с подложками GaAs и InP [A12÷A14]. На основе созданного задела был суммирован опыт использования функциональных нановставок в инженерии многослойных гетероструктур с КЯ InGaAs, обобщенный в работе [A15].

Во **второй главе** рассмотрены основные задачи численного моделирования, применяемого в настоящей работе для анализа электронных свойств квантовых гетероструктур. Это расчет энергетического спектра и волновых функций электронов в квазидвумерных системах на основе многослойных гетероструктур. Итерационно решается самосогласованная система уравнений Шредингера и Пуассона в одномерном приближении с учетом состава и толщины каждого из активных слоев структуры, а также с учетом поверхностного потенциала, распределения донорных примесей. Рассматривается задача моделирования процессов рассеяния электронов при определяющем влиянии ионизированных примесей в многоподзонном приближении. Важно, что в данной модели используются самосогласованные пространственные профили электронных ВФ и значения уровней энергии подзон размерного квантования. Совместное использование двух моделей позволило решить задачу многоподзонного электронного транспорта в InGaAs НЕМТ с учетом квантовомеханического описания электронных состояний. Вычисление транспортного и квантового времени релаксации, подвижности электронов проводится в Борновском приближении на экранированном кулоновском потенциале донорных примесей в каждой из заполненных электронных подзон. Затем проводится холловское усреднение, определяются холловские подвижность и концентрация электронов. Описаны основные подходы к моделированию рассеяния равновесных и горячих электронов на оптических фонах, амплитуды которых представлены в модели диэлектрического континуума. Рассмотрены эффекты конфайнмента фононных мод и возможности снижения коэффициента электрон-фононной связи в многослойных гетероструктурах для увеличения скорости насыщения электронов.

Кратко описаны экспериментальные методики создания гетероструктур методом МЛЭ и методы структурного анализа и измерений электронных свойств гетероструктур. Освещаются используемый в работе комплекс методик метрологического обеспечения технологии МЛЭ для прецизионного контроля состава, толщины и структурного совершенства нанослоев, в том числе, на специально разработанных калибровочных структурах-спутниках. Толщина и состава слоёв структур определялись различными взаимодополняющими методами: масс-спектроскопии вторичных ионов (ВИМС, рисунок 1), рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения (РД, рисунок 2) [A16÷A18].

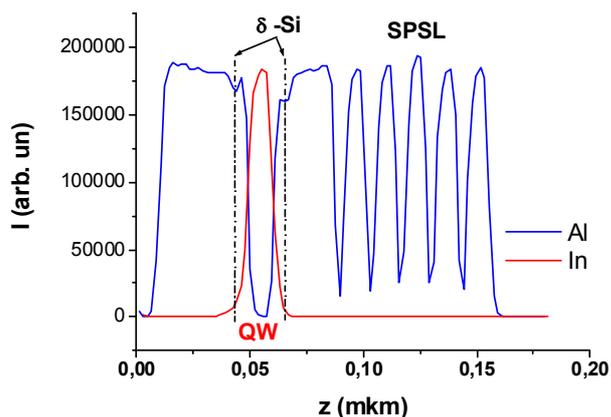


Рисунок 1. Профилирование состава Al и In в 2δ-PHEMT КЯ методом вторично-ионной масс спектроскопии. QW- область КЯ  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ .

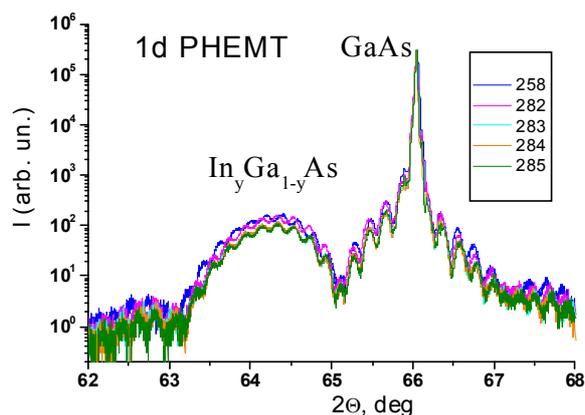


Рисунок 2. Кривые рентгенодифракционного отражения (004) серии 1δ-PHEMT КЯ с различным легированием.

Кратко приведены сведения о методиках измерений температурных зависимостей сопротивления, магнетосопротивления и эффекта Холла, а также квантовых магнитоосцилляционных эффектов - эффекта Шубникова-де Гааза (ШдГ) и квантового эффекта Холла (КЭХ) при низких температурах; методика спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ).

**Третья глава** рассматривает вопросы, связанные с управлением электронными состояниями и туннельными эффектами при многоподзонной проводимости в приповерхностных PHEMT КЯ, содержащих нановставки AlAs в барьерах КЯ. Исследуются PHEMT КЯ  $\text{AlGaAs/InGaAs/(Al)GaAs}$  с одно- и двусторонним  $\delta\text{-Si}$  легированием.

**Раздел 3.1** посвящен исследованию влияния расстояния от КЯ до поверхности односторонне-легированных 1δ-PHEMT гетероструктур на заполнение электронных состояний и транспортные свойства КЯ при различном уровне легирования кремнием. Особенностью данных структур является сильное ( $3 \div 9 \cdot 10^5$  В/см) встроенное электрическое поле. Изучены PHEMT при уменьшении толщины  $L_b$  широкозонного барьера  $\text{Al}_{0,23}\text{Ga}_{0,77}\text{As}$  между покрывным слоем GaAs и  $\delta$ -слоем доноров Si в диапазоне  $L_b$  от 24 нм до 5 нм (этот слой соответствует барьерному слою Шоттки под затвором HEMT). Структура образцов приведена на рисунке 3. Проведенные расчеты зонной структуры подтвердили, что для фиксированного уровня легирования  $N_d$  при уменьшении  $L_b$  квантово-размерные уровни в КЯ смещаются вверх относительно уровня Ферми. Это приводит к существенному снижению концентрации электронов в КЯ (вплоть до обеднения канала). С помощью многофакторного моделирования определены изолинии концентрации электронов в КЯ при совместном изменении двух параметров - концентрации доноров  $N_d$  и  $L_b$  для компенсации эффектов, обусловленных влиянием электрического поля поверхности.

Численная аппроксимация

$N_d \rightarrow$	<i>i</i> -GaAs	4 nm
	Al <sub>0.23</sub> Ga <sub>0.77</sub> As	$L_b$
	спейсер Al <sub>0.23</sub> Ga <sub>0.77</sub> As	5,5 nm
	КЯ In <sub>0.2</sub> Ga <sub>0.8</sub> As	12 nm
	GaAs (буфер 2)	0,35 $\mu$ m
	Сверхрешетка GaAs/AlGaAs	26 nm
	GaAs (буфер 1)	41 nm
GaAs (100) подложка		

Рисунок 3. Структура исследуемых образцов с КЯ AlGaAs/InGaAs/GaAs.

позволила установить зависимость требуемой концентрации легирования  $N_d$  от заданных параметров  $L_b$  (нм) и  $n_s$ :  $N_d = 3,49 \cdot n_s + (129,73 + 46,50 \cdot n_s) / L_b$  ( $10^{12} \text{ см}^{-2}$ ) [A19]. Зависимость может быть в т.ч. использована для расчета напряжения отсечки канала и легирования нормально-закрытых НЕМТ транзисторов. Оценки показывают, что сокращение  $L_b$  обеспечивает увеличение крутизны РНЕМТ транзисторов и граничной частоты усиления по току вплоть до  $F_t \sim 80 \div 100$  ГГц при длине затвора  $L_g = 150$  нм.

Исследованы электрофизические и оптические свойства изготовленной **серии** образцов с  $L_b = 23, 18, 15, 13, 11, 9, 7$  и  $5$  нм, с компенсирующим легированием Si для сохранения постоянной концентрации электронов в КЯ  $n_s \sim 1.6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  [A19]. При уменьшении  $L_b$  с  $23$  нм до  $9$  нм холловская концентрация электронов  $n_H$  остается близкой к заданной (в пределах  $10\%$ ). При  $5 \text{ нм} < L_b < 11$  нм наблюдалось монотонное уменьшение  $n_H$  относительно расчетных, что можно объяснить амфотерным поведением донорной примеси Si при увеличении до  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$  концентрации легирования. Измерения показали, что зависимость холловской подвижности  $\mu_H$  от  $L_b$  имеет немонотонный характер (рисунок 4) с максимальным значением  $\mu_H$ , наблюдаемом в образце 724 с промежуточной толщиной барьерного слоя  $L_b = 11$  нм.

Во всех образцах наблюдался эффект Шубникова-де Гааза (ШдГ) при низких  $T$  в квантующем магнитном поле до  $6$  Тл. Определено квантовое время релаксации импульса  $\tau_q$ , а по соотношению транспортного к квантовому времени рассеяния  $\tau_i/\tau_q$  установлено, что в образце с наивысшей подвижностью 724 доминирует рассеяние на удаленных ионизированных донорах (большое  $\tau_i/\tau_q > 2.2$  и  $\mu_{77}/\mu_{300} = 3,4$ ), а в образцах 738 и 718 проявляется рассеяние на больших углах ( $\tau_i/\tau_q \sim 1$  и  $\mu_{77}/\mu_{300} \leq 3$ ) [A20, A21].

Немонотонная зависимость подвижности электронов от  $L_b$  объясняется механизмом рассеяния на ионизированных примесях, однако, снижение  $\mu_0$  в 2-х областях этой зависимости  $\mu_H(L_b)$  объясняется вкладом различных факторов. В пределах малых  $L_b$  профиль легирования уширяется как за счет увеличения плотности доноров, так и за счет возможного увеличения диффузии доноров под действием сильного встроенного электрического поля. Это приводит к более интенсивному рассеянию электронов в КЯ. Напротив, при больших  $L_b$  и меньшем  $N_d$  напряженность встроенного электрического поля в барьерном слое Шоттки снижена, что приводит к увеличению ширины V-образного потенциала в окрестности

ионизированной донорной примеси (рисунок 5). Возрастает туннелирование электронной ВФ основного состояния из КЯ через спейсер, и подвижность электронов в КЯ уменьшается.

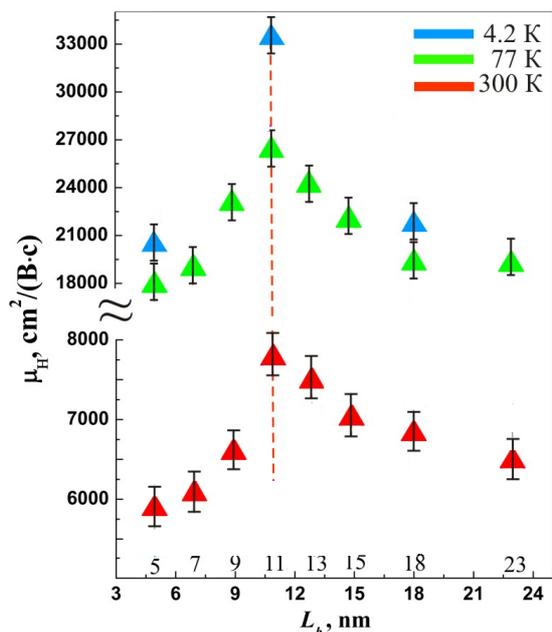


Рисунок 4. Измеренная холловская подвижность электронов в серии 1δ-PHEMT с различной  $L_b$  при температурах 300, 77 и 4.2.

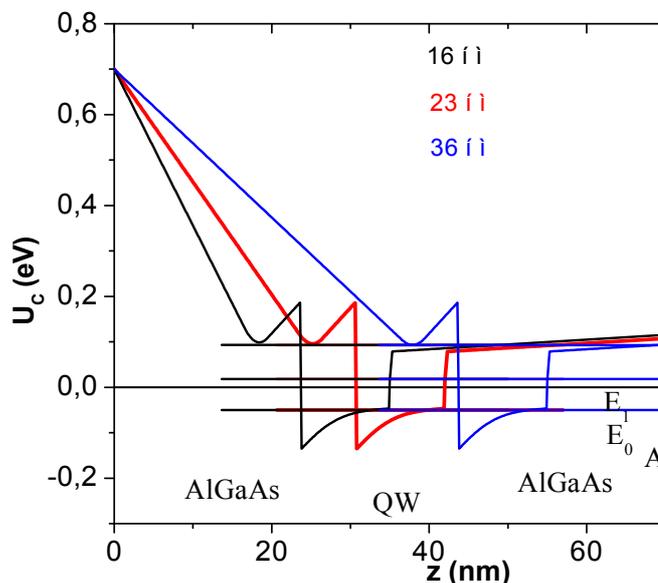


Рисунок 5. Зонный профиль 1δ-PHEMT с различной толщиной барьерного слоя AlGaAs  $L_b$ .

Модель встроенного поля в PHEMT с неглубоко залегающими КЯ верифицирована по измерениям напряженности встроенного электрического поля в барьере  $Al_{0,23}Ga_{0,77}As$  эффекта Франца-Келдыша методом спектроскопии фотоотражения при комнатной температуре [A20, A21]. Исследования спектров ФЛ при  $T=77$  К показало, что при уменьшении  $L_b$  увеличивается интенсивность перехода с первой возбужденной электронной подзоны в основную подзону тяжелых дырок, эффект связан с увеличением электрического поля в КЯ, а не изменением заполнения второй подзоны электронами.

**Разделы 3.2 и 3.3** посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию квантовых эффектов, возникающих при многоподзонной проводимости в  $\delta$ -легированных PHEMT гетероструктурах, а также новым подходам по управлению пространственной структурой квантовых состояний электронов в NEMT КЯ с сильным легированием. В качестве модельной структуры рассматриваются структуры 1 типа №50, 51 с неглубокой КЯ  $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As$  (100 мэВ) и 2 типа №261, 262 с более глубокой PHEMT КЯ  $Al_{0,16}Ga_{0,84}As/In_{0,16}Ga_{0,84}As/Al_{0,16}Ga_{0,84}As$  (240 мэВ) шириной 10 нм. Базовая стандартная структура (SS) с неглубокой двухбарьерной КЯ  $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As$  имела двустороннее  $\delta$ -Si легирование через спейсеры для получения в КЯ концентрации электронов  $\geq 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  с концентрацией доноров  $N_{\delta 1}=1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ,  $N_{\delta 2}=7,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Такое легирование обеспечивало то, что "параллельная проводимость", т.е. заполнение электронами широкозонного барьера, наступала только для области вблизи верхнего  $\delta_1$ -Si

слоя. Расчеты проведены в диапазоне толщины спейсера  $d_s = 2 \div 18$  нм в приближении полной ионизации примеси [A22]. При тонком спейсере  $d_s$  электронами заполнена одна подзона, расположенная в КЯ ( $n_0$ ). С увеличением  $d_s$  концентрация электронов в КЯ  $n_0$  уменьшается, а в верхней подзоне  $n_1$  - возрастает. Встроенное электрическое поле при увеличении  $d_s$  существенно снижает потенциал зоны проводимости в области  $\delta_1$ -слоя. Это приводит к туннельной деградации потенциального барьера спейсерного слоя, который вместо прямоугольного профиля становится треугольным. ВФ основного состояния  $\Psi_0$  распространяется как на область КЯ, так и в область пониженного потенциала  $\delta_1$ -легированного барьера (ПЯ), а  $\Psi_1$  - увеличивается в области КЯ, причем эффект имеет резонансный характер. Начало гибридизации верхней подзоны проявляется с  $d_s \sim 5$  нм, при этом максимум амплитуды ВФ верхнего состояния  $\Psi_1$  располагается в окрестности  $\delta$ -слоя. Далее уровни энергии подзон размерного квантования сближаются, имеет место антикроссинг уровней  $E_0$  и  $E_1$ , затем основным становится уровень, ассоциированный с  $\delta_1$ -легированным барьером. Наибольшая гибридизация состояний ВФ  $\Psi_0$  и  $\Psi_1$  наблюдается при минимальном расщеплении уровней подзон при  $d_s \sim 14$  нм, при этом амплитуды ВФ в каждой из ям (КЯ и ПЯ) сравнимы по модулю. Такой пространственный резонанс состояний можно эффективно описать функцией взаимной пространственной корреляции  $I_{01} = \int \Psi_0^2 \Psi_1^2 dz$ , описывающей перекрытие состояний [A22]. Резонанс состояний приводит к сближению и кроссингу значений подвижностей электронов в двух подзонах размерного квантования  $\mu_0$  и  $\mu_1$  (рис. 6, пунктир, рис. 7). Тем самым, квантовая модель электронного транспорта обосновывает снижение  $\mu_0$  электронов в основном состоянии КЯ. Предложенная модель принципиально отличается от известной аддитивной модели параллельно включенных каналов проводимости.

Поскольку туннельный эффект подавляется потенциальным барьером большой высоты, нами было предложено ввести нанобарьер AlAs в спейсер. Моделирование КЯ с составным спейсером, содержащим 2 нм AlAs барьер, показало, что в этом случае пространственная корреляция состояний  $I_{01}$  ослабевает на 2 порядка, радикально изменяя условия рассеяния одновременно в двух подзонах размерного квантования (см. рис. 6 и 7). В диапазоне  $d_s = 6 \div 12$  нм для основного состояния  $\Psi_0$  расчет показывает значительный прирост подвижности  $\mu_0$  (от 5 до 45 раз) в CS структуре, тогда как подвижность в верхней подзоне  $\mu_1$  значительно снижается (рис. 6, сплошные линии).

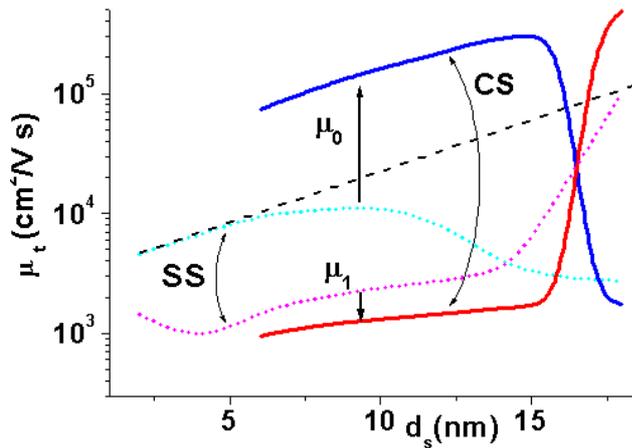


Рис. 6. Рассчитанные зависимости транспортной подвижности электронов  $\mu_0$  и  $\mu_1$  в AlGaAs/GaAs/AlGaAs неглубоких КЯ в зависимости от толщины спейсерного слоя для двух подзон размерного квантования в пределе сильного легирования. SS - для структуры с однородным спейсерным слоем, CS - для структуры, содержащей один 2 нм AlAs нанобарьер в спейсере AlGaAs.

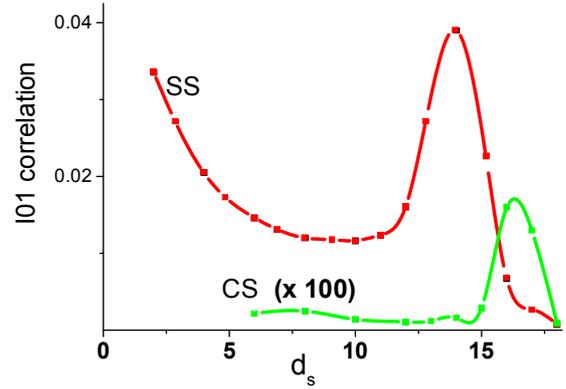


Рис. 7. Зависимость пространственной корреляционной функции для 2-х нижних электронных состояний в структуре с однородным спейсером (SS) и композитным спейсером, содержащим нанобарьер AlAs (CS).

В экспериментальных образцах исследовано влияние нанобарьера AlAs в спейсере. В образце 51 (с составным спейсером) подвижность увеличилась по сравнению с обр. №50 (однородный спейсер) в 1,8 раз при  $T=300$  К, а соотношение подвижностей  $\mu_{77}/\mu_{300}$  составило 3,9 против 2,1 в обр. №50. Это указывает на возрастающую роль фононов в ограничении подвижности электронов и заметное снижение рассеяния электронов на ионизированных примесях. При этом тонкий одиночный нанобарьер AlAs в спейсере слабо изменяет заполнение подзон 0 и 1 и результирующее пространственное распределение электронной плотности.

Введение двух нанобарьеров AlAs в окрестности  $\delta_1$ -Si AlGaAs барьера (на дистанции 4,2 нм друг от друга) в структуре PHEMT КЯ  $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As/GaAs$  позволяет полностью вытеснить электронную плотность из барьера  $Al_xGa_{1-x}As$ , обеспечив сдвиг уровня, ассоциированного с барьером, на +20 мэВ (рисунки 8 а, б) [A23]. Кроме того, увеличивается межподзонный зазор в КЯ  $E_2 - E_1$  (+14 мэВ), за счет более полной локализации электронов в слое КЯ. В образцах второго типа введение двух AlAs нанобарьеров вокруг  $\delta_1$ -Si привело к увеличению подвижности с 21940  $cm^2/V \cdot s$  в образце с однородным донорным слоем №261 (SS) до 24000  $cm^2/V \cdot s$  в обр. №262 с композитным донорным слоем (CS) при  $T=77$  К при концентрации электронов  $n_H = 1,5 \cdot 10^{12} cm^{-2}$  при небольшом заполнении второй подзоны размерного квантования [A23, A24]. В образцах 3-го типа с двусторонним  $\delta$ -легированием с неглубокой КЯ  $GaAs/In_{0,17}Ga_{0,83}As/GaAs$  и высокой концентрацией электронов ( $n_H = 2,3 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ ), эффект введения 2-х нанобарьеров AlAs вокруг каждого  $\delta$ -слоя проявляется еще сильнее ( $\delta\mu_H = +26\%$  при 77 К), благодаря более сильному заполнению второй подзоны.

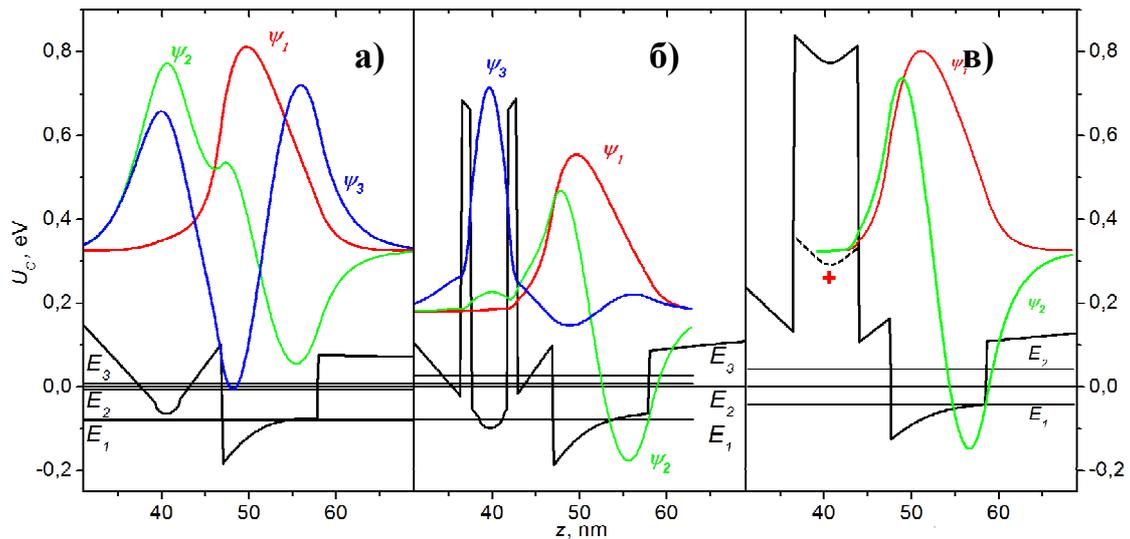


Рисунок 8. Рассчитанные профили зон проводимости и электронные волновые функции в РНЕМТ КЯ: а) - со стандартным донорным/спейсерным слоем AlGaAs, б) - с двумя нанослоями AlAs в окрестности дельта-слоя доноров, в) - с донорным слоем  $\delta$ -Si-AlAs.

Влияние нанобарьеров AlAs на сдвиг уровней в системе за счет ограничения туннелирования в спейсер проявляется также на спектрах ФЛ (рисунок 9), наблюдаются переходы из основного и первого возбужденного электронных состояний в основное состояние тяжелых дырок  $E_1H_1$  и  $E_2H_1$ . Наблюдается увеличение зазора между уровнями  $E_1$  и  $E_2$ , характерное для уменьшения туннельной связи состояний в системе.

Исследование электронного магнетотранспорта в образцах 261 (SS) и 262 (CS) подтверждают, что даже при гелиевых температурах электронами заполнены 2 подзоны размерного квантования. Определенная по осцилляциям ШдГ концентрация  $n_{sdH}$  в образце 261 (SS) оказывается меньше холловской  $n_H$ , монотонная часть зависимости  $\rho_{xy}(B)$  нелинейна, а магнетосопротивление  $\rho_{xx}(B)$  положительное и большое по амплитуде, что характерно для систем с несколькими заполненными подзонами (рисунок 10).

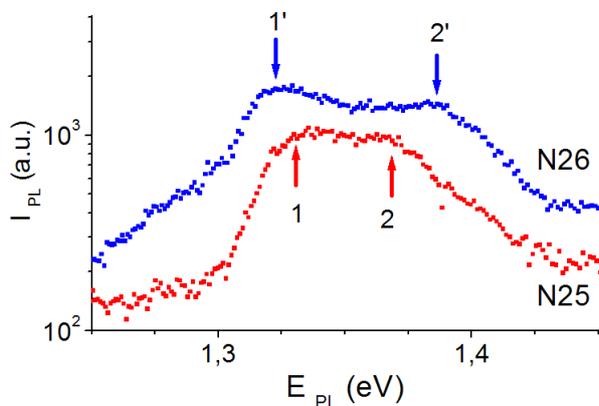


Рисунок 9. Спектры ФЛ (77 К) в 2 $\delta$ -РНЕМТ GaAs/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As/GaAs КЯ (25- стандартной, 26- с 2xAlAs барьерами вокруг каждого  $\delta$ -Si слоя). 1 и 2 относятся к оптическим переходам  $E_1H_1$  и  $E_2H_1$  в КЯ.

Однако, в структуре 262 (CS) амплитуда осцилляций оказывается заметно выше, также увеличивается концентрация электронов в основной подзоне КЯ. Таким образом, введение 1 или 2 нанобарьеров AlAs вокруг  $\delta$ -слоя доноров позволяет эффективно управлять пространственной структурой электронных состояний и транспортными свойствами в КЯ.

На основе полученных результатов была впервые предложена и реализована конструкция РНЕМТ структуры с  $\delta$ -Si-AlAs донорным слоем, где  $\delta$ -Si размещен в тонком

легированном AlAs барьере толщиной 8 нм. Несмотря на то, что AlAs является непрямозонным, и донорный уровень Si-AlAs, ассоциированный с X-долиной, достаточно глубокий, большая высота барьера AlAs по сравнению с окружающим AlGaAs барьером согласно моделированию зонной структуры должна обеспечивать его полную ионизацию (+260 мэВ относительно уровня Ферми, см. рисунок 8 в) [A25]. В образце 24B с AlAs: $\delta$ -Si донорным слоем несмотря на сильное легирование  $N_d=1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , холловская концентрация электронов оказывается в пределах  $0,93 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , что указывает на неполную активацию примеси Si в чистом AlAs (коэффициент активации Si доноров оказался в 2,8 раза ниже, чем в AlGaAs). Однако холловская концентрация электронов практически не возрастает в интервале  $T=2 \div 300 \text{ К}$  ( $\delta n < 7\%$ ), что говорит о полной ионизации доноров. Получены рекордные значения подвижности для  $\delta$ AlAs-PHEMT структуры ( $\mu_H=34200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 4,2 К,  $31000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 77 К и  $7020 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при 300 К), при низких температурах такие величины конкурируют с HEMT на InP. Кроме того, существенно возрастает квантовое время рассеяния в таком образце по исследованию осцилляций ШдГ 0,5 пс против 0,2 пс в структуре с однородным донорным слоем, поэтому осцилляции ШдГ начинаются в поле  $B \sim 0,55 \text{ Тл}$ , наблюдается отчетливый целочисленный КЭХ (рисунок 11).

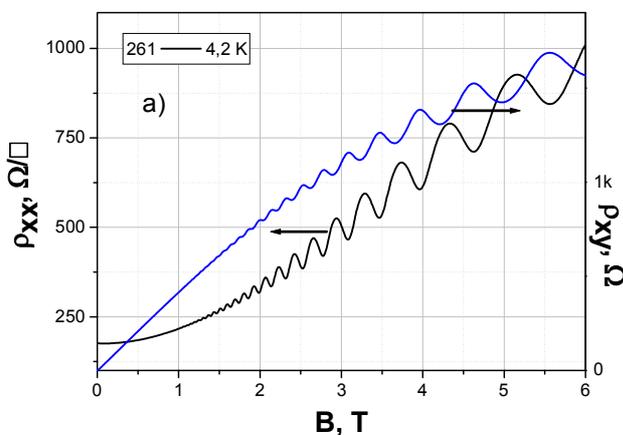


Рисунок 10. Магнетосопротивление  $\rho_{xx}$  и холловское сопротивление  $\rho_{xy}$  при низких температурах в образце 261 с  $1\delta$ -PHEMT AlGaAs/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As/GaAs КЯ при  $T=4,2 \text{ К}$ .

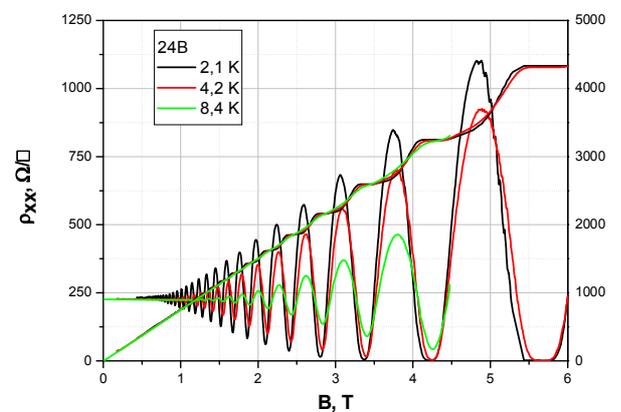


Рисунок 11. Магнетосопротивление  $\rho_{xx}$  и холловское сопротивление  $\rho_{xy}$  при низких температурах в образце 24B с  $1\delta$ AlAs:Si-PHEMT AlGaAs/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As/GaAs КЯ при гелиевых температурах.

**В разделе 3.4** исследована проблема концентрационной зависимости подвижности электронов в  $1\delta$ -PHEMT КЯ шириной 10,5 нм с односторонним легированием [A26÷A27]. Изготовлены серии образцов - первая, Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As/In<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As/GaAs  $1\delta$ -PHEMT (282÷285) с широким диапазоном легирования в  $\delta$ -Si слое  $N_D = (1 \div 16) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  и толщиной спейсера 5,3 нм при прочих неизменных условиях. Вторая серия имела увеличенное содержание  $x_{AlAs}=28\%$  в однородном барьере и толщину спейсера 5,9 нм. В образцах исследованы температурные зависимости сопротивления, подвижности и концентрации электронов,

осцилляции ШдГ и КЭХ. На рис. 12 показаны зависимости холловской концентрации от  $N_D$  при различных температурах, а на рис. 13 температурная зависимость  $n_H(T)$ .

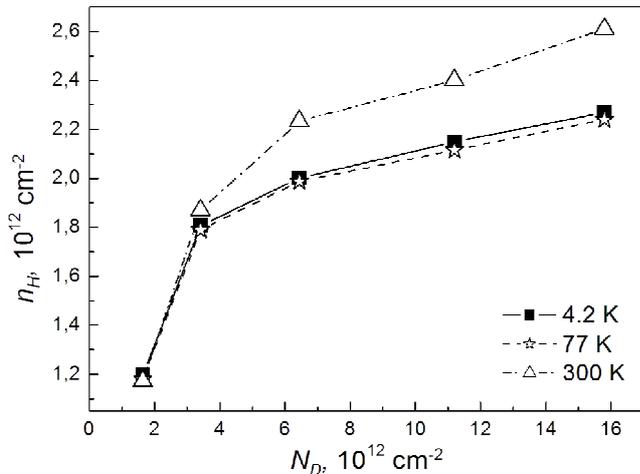


Рисунок 12. Измеренная зависимость холловской подвижности электронов от концентрации доноров для структур  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}/\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$  1δ-PHEMT при  $T=4,2, 77$  и  $300$  К.

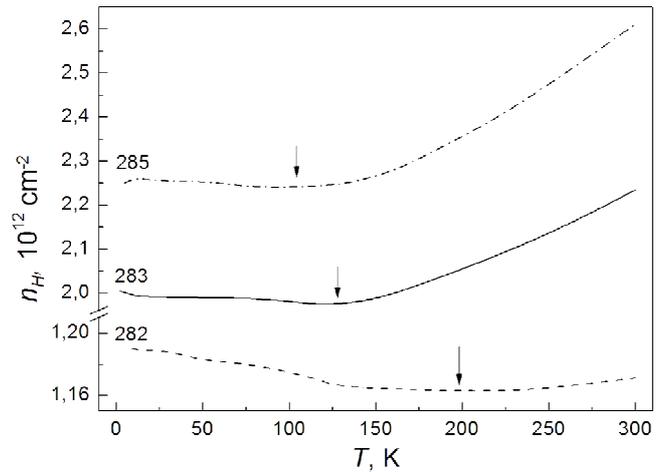


Рисунок 13. Температурные зависимости холловской концентрации электронов  $n_H$  в 1δ-PHEMT  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}/\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$  при различном легировании.

Из рисунка 12 видно, что начиная с  $n_s \sim 1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при увеличении  $N_d$  наблюдается сублинейная зависимость  $n_H(N_D)$ . Возрастающая чувствительность  $n_s$  к увеличению температуры и изменение наклона  $n_H(N_D)$  свидетельствуют об ограниченной ионизации доноров кремния, поскольку при  $x_{\text{AlAs}} \sim 0,25$  энергия ионизации доноров достаточно высока,  $\sim 20$  мэВ. Приведенная на рисунке 14 зависимость холловской подвижности от концентрации двумерных электронов  $\mu_H(n_s)$  немонотонна: при начальном увеличении  $n_s$  она возрастает, затем убывает, причем максимальное значение  $\mu_H$  увеличено в серии 2 с более высоким широкозонным барьером КЯ и достигается при более высокой  $n_s$  [A26]. Для объяснения данных эффектов было проведено самосогласованное моделирование зон и с учетом пространственных профилей ВФ промоделированы подвижности электронов. Вторая по счету подзона КЯ начинает заполняться при  $n_s > 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Расчет рассеяния электронов на ионизированной примеси подтвердил немонотонный характер зависимости  $\mu_0(n_s)$  в основной подзоне. Расчет квантового и транспортного времени релаксации импульса показывает, рост  $\mu_0(n_s)$  обусловлен увеличением фермиевского импульса и экранированием двумерным электронным газом. В области роста  $\mu_0$  меньше чувствительна к конструктивным особенностям спейсера, так как конфинмент электронов в КЯ достаточно сильный и туннелирование ВФ электронов из КЯ подавлено. Переход к спаду подвижности сопровождается резким снижением  $\tau_l/\tau_q$ , соответствующему возрастанию рассеяния электронов на большие углы (рисунок 15). Эффект имеет зонное обоснование: при увеличении  $N_d$  встроенное дипольное электрическое поле в области спейсера приводит к

увеличению его туннельной проницаемости и возникает рассеяние электронов на ионах примеси "на хвостах" ВФ  $\Psi_0$  основного состояния в КЯ.

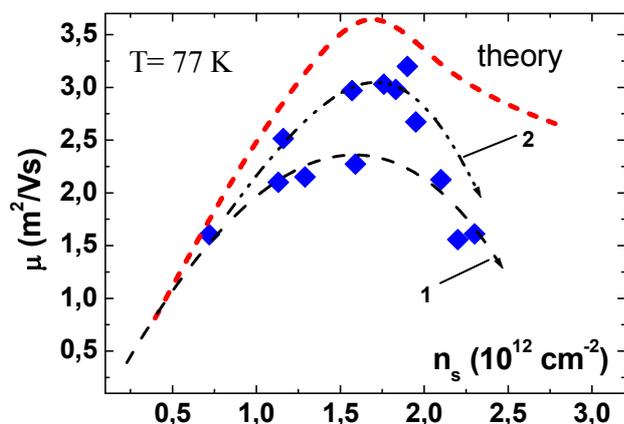


Рисунок 14. Измеренные при  $T=77$  К зависимости холловской подвижности электронов  $\mu_H$  от их суммарной концентрации  $n_s$  для серий:  $1\delta$ -PHEMT  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}/\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$  (1) и  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}/\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}/\text{GaAs}$   $1\delta$ -PHEMT (2), штрихом показана расчетная зависимость для серии 1.

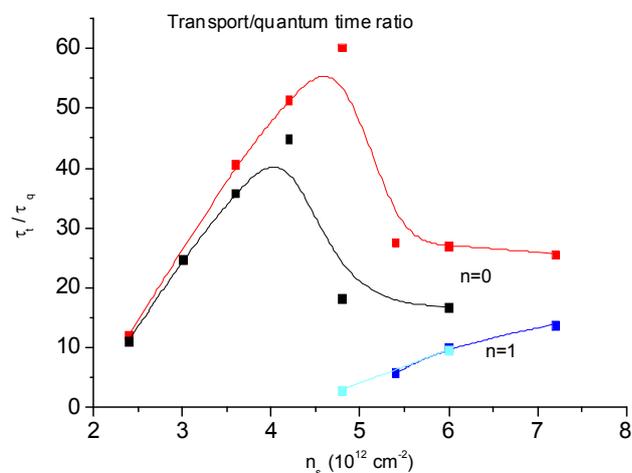


Рисунок 15. Соотношение транспортного к квантовому времени релаксации импульса электронов в двух подзонах ( $n=0, 1$ )  $1\delta$ -PHEMT КЯ при рассеянии на ионизированных примесях для различного состава  $x_{\text{Al}}$  и толщины спейсера.

Увеличение  $x_{\text{AlAs}}$  в барьере снижает туннельную проницаемость спейсера и позволяет увеличить подвижность [A27]. Эффект не связан с заполнением второй подзоны размерного квантования в КЯ. Исследования осцилляций ШДГ при  $T=2\div 8$  К подтверждают данную модель.

В четвертой главе в разделе 4.1 исследуются  $2\delta$ -PHEMT с сильным двусторонним  $\delta$ -легированием с однородной квантовой ямой  $\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}/\text{In}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{As}/\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{As}$  (глубина  $\sim 300$  мэВ) в диапазоне концентраций электронов в КЯ  $(2,0\div 4,0)\cdot 10^{12}$   $\text{cm}^{-2}$ . Моделирование зонной структуры и электронных волновых функций (рисунок 16) показало, что при увеличении донорного легирования наблюдается сублинейная зависимость концентрации  $n_0$  электронов в основной подзоне квантовой ямы при увеличении уровня легирования  $N_d$  [A4]. Это объясняется влиянием кулоновского потенциала электронов в КЯ на форму профиля КЯ. Расчет показал: параболический изгиб дна КЯ, достигающий  $20\div 30$  мэВ относительно гетерограниц, сравним с энергией размерного квантования и приводит к сдвигу вверх уровня основного состояния  $E_0$ . При этом четный уровень  $E_0$  испытывает более сильный сдвиг, чем  $E_1$ , что приводит к снижению межподзонного зазора  $E_1 - E_0$ . Таким образом, увеличение легирования приводит к существенному снижению **эффективной глубины КЯ ( $W_{\text{eff}}$ )**, рассчитанной как величина энергетического зазора между основным состоянием  $E_0$  в КЯ и уровнем энергии, ВФ которого имеет заметную амплитуду как в барьере, так и в КЯ [A15]. Отметим, что с увеличением  $N_d$  номер уровня для расчета  $W_{\text{eff}}$  понижается. Расчет показывает, что эффект снижения  $W_{\text{eff}}$  в базовой  $2\delta$ -PHEMT может

превышать 50% от  $\Delta E_c$  в нелегированной КЯ. Именно данное явление, в рамках изложенной в предыдущей главе модели подвижности, приводит к убывающей зависимости  $\mu(n)$  в 2 $\delta$ -РНЕМТ с ростом  $N_d$ . Сильное легирование при  $n_s > 2,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  ведет к увеличению заполнения лишь верхних состояний в КЯ с ВФ  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ , являющихся гибридными по своей пространственной структуре (см. рисунок 16 б). Снижение холловской концентрации электронов, наблюдаемое при повышении температуры, связано с холловским усреднением в случае увеличения концентрации электронов в верхних подзонах, имеющих меньшую подвижность электронов. Во всех образцах при  $T=4,2 \text{ K}$  наблюдались осцилляции магнетосопротивления (рисунок 17 а), экспериментально подтверждено насыщение концентрации электронов в нижней подзоне размерного квантования  $n_0$  при увеличении  $N_d$  (рисунок 17 б), что подтверждает справедливость представленной модели [А4].

Была также проведена оценка соотношения легирования в нижнем и верхнем  $\delta$ -слоях,  $N_{\delta 1}$  и  $N_{\delta 2}$ , при приближении 2 $\delta$ -РНЕМТ КЯ к поверхности, показано, что при уменьшении  $L_b$  необходимо увеличивать соотношение  $N_{\delta 1}/N_{\delta 2}$ , что обусловлено увеличением напряженности встроенного электрического поля в барьере AlGaAs при приближении КЯ к поверхности.

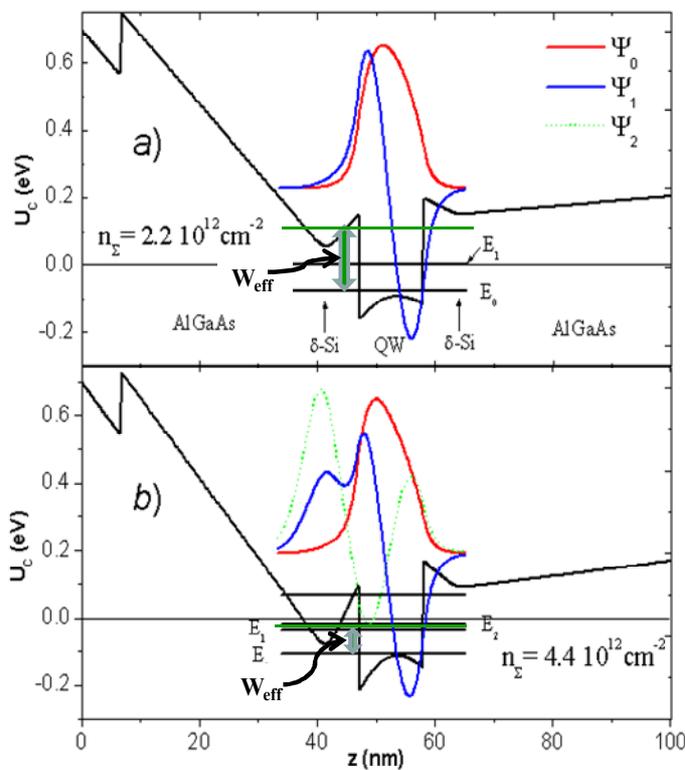


Рисунок 16. Рассчитанные профили дна зоны проводимости, уровни размерного квантования в слабо (а) и сильнолегированных (б) 2 $\delta$ -РНЕМТ гетероструктурах. Суммарная концентрация двумерных электронов приведена на полях.

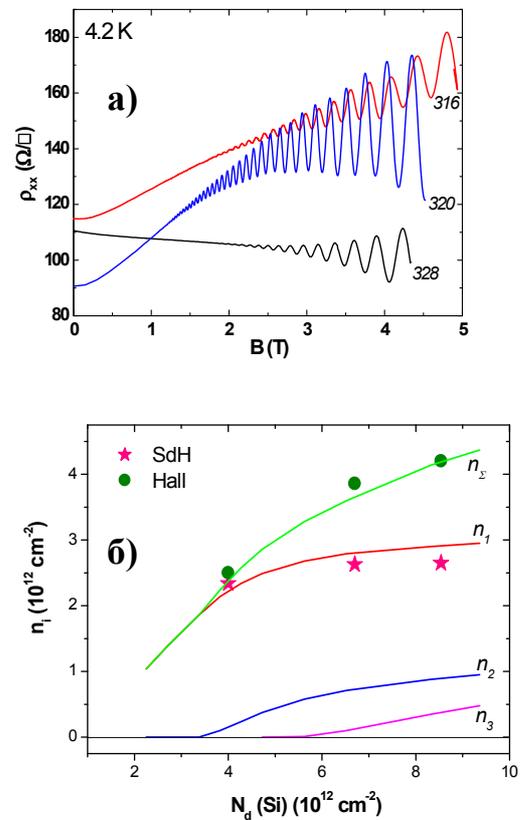


Рисунок 17. а) Осцилляции Шубникова-де Гааза для образцов 316, 320 и 238 с различным уровнем двустороннего  $\delta$ -легирования кремнием. б) Расчетные (линии) и экспериментальные данные по заполнению электронных подзон при  $T=4,2 \text{ K}$ .

**В разделе 4.2** представлены результаты разработки и исследования РНЕМТ гетероструктур с варизонной КЯ InGaAs. Избежать негативного эффекта снижения эффективной глубины в  $\delta$ -РНЕМТ КЯ предложено за счет пространственного перераспределения содержания InAs: увеличив его в центре КЯ и уменьшив его вблизи гетерограниц [A28]. Таким образом, реализуется компенсация кулоновского потенциала в зоне проводимости за счет пространственного профиля  $\Delta E_g(y_{InAs}(z))$ . Для практической реализации была применена кусочно-линейная аппроксимация  $y_{InAs}(z)$  вдоль координаты КЯ  $z$  из двух участков (шириной по 5,5 нм каждый, см. вставку на рисунке 18 б). Исходя из того, что вариация ширины запрещенной зоны при увеличении  $y_{InAs}$  составляет  $dE_g/dy \sim 6$  мэВ/%, оптимальным для компенсации изгиба и барьера оказывался профиль  $y = 0,20$  в начале КЯ,  $y = 0,25$  в центре и  $y = 0,15$  в конце КЯ, в этом случае реализуется наиболее прямоугольный профиль потенциала дна КЯ при сохранении среднего состава КЯ  $y = 0,2$ .

Была разработана **технология МЛЭ роста варизонных слоев** с высоким композиционным градиентом In в плавном слое  $In_{y(z)}Ga_{1-y(z)}As$ ,  $g_c \sim 1,2\%$  InAs/нм [A29]. Столь высокий  $g_c = \partial y/\partial z$  невозможно надежно реализовать при стандартном режиме МЛЭ, поскольку для характерной скорости роста  $v_{InGaAs} \sim 16\div 18$  нм/мин скорость изменения температуры источника In превышает  $\sim 60$  °С/мин. Поэтому было проведено масштабирование скорости роста и времени роста слоев при сохранении их состава и толщины. Образцы были выращены при средней скорости роста GaAs 6 нм/мин, причем потоки In и Ga изменялись одновременно по линейному закону. Были проведены тщательные градуировки зависимости давления потока от температуры источников Ga и In, учтена тепловая инерция источников In и Ga. Изображение активных слоев в варизонной структуре № 75, полученное методом ПЭМ в темном поле, демонстрирует высокое качество гетероструктур и малое размытие гетерограниц (рисунок 19). Рентгеновская дифрактометрия и ПЭМ подтвердили высокое структурное совершенство и точность изготовления гетероструктур по толщине и составу. Отклонение параметров от технологически заложенных составляет не более 3%. Образец № 75 с наиболее прямоугольным профилем дна КЯ показал увеличение как концентрации, так и подвижности электронов по сравнению с базовой гетероструктурой, имеющей однородный состав InGaAs КЯ. Это можно связать с тем, что при оптимальной компенсации кривизны дна КЯ: - увеличивается эффективная глубина КЯ  $W_{eff}$ , - максимум ВФ основного состояния  $\Psi_0$  смещается к центру КЯ. Эти факторы приводят к увеличению расстояния от центроида ВФ до ионизированных доноров и к снижению рассеяния электронов на удаленных донорах кремния в  $\delta$ -слоях. На это указывает увеличение подвижности электронов, более заметное при низкой температуре.

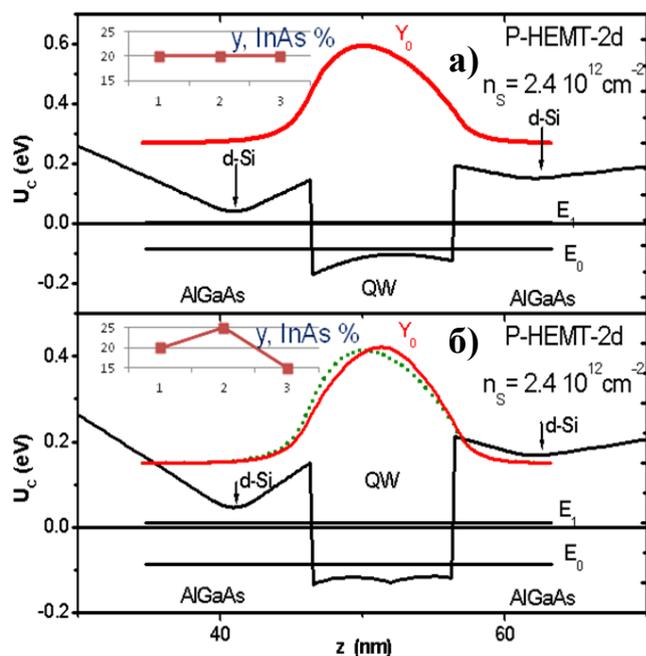


Рисунок 18. Рассчитанные зонные профили и волновые функции основного состояния для PHEMT гетероструктур с двусторонним  $\delta$ -легированием: а – однородная КЯ; б – варизонная КЯ с компенсацией изгиба дна. На вставках рисунка показаны композиционные профили  $y(\text{InAs})$  в КЯ.

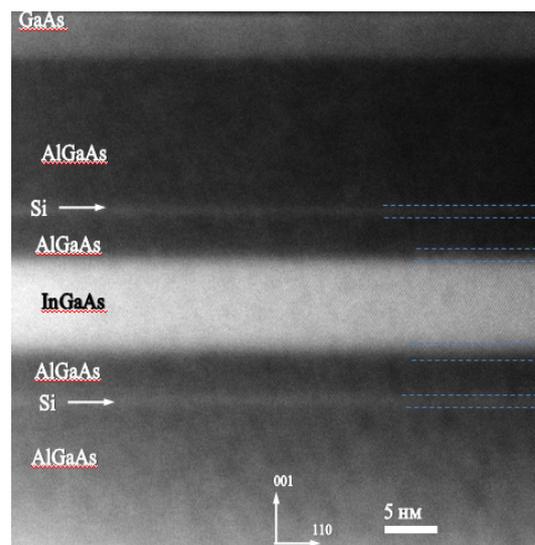


Рисунок 19. Изображение ПЭМ поперечного сечения экспериментальных образцов с варизонной  $2\delta$ -PHEMT КЯ.

В образце № 89 со сниженным  $g_c$  увеличение электронной подвижности не столь велико. Однако, в образце №90 с еще более высоким относительно оптимального  $g_c$  наблюдалось сильное снижение  $\mu_n$ , особенно при низких T. Экспериментальные результаты исследования электронных транспортных свойств [A29] приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры гетероструктур с односторонним и двусторонним легированием с различным профилем состава квантовой ямы (в скобках - относительное изменение от базовой структуры).

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

Также в образце №90 наблюдалось небольшое снижение концентрации  $n_n$ . Объяснение данного негативного эффекта выходит за рамки зонной трактовки и может быть связано с тем, что при столь резком перепаде состава  $g_c$  в псевдоморфно-напряженной КЯ (до 28% InAs в центре) может возникать избыточная деформация и частичная неупругая

релаксация в центральной области слоя InGaAs с образованием дислокаций, захватывающих часть свободных носителей тока. Этот дополнительный механизм рассеяния электронов со слабой температурной зависимостью влечет за собой ухудшение подвижности электронов.

При выборе композиционного градиента  $\text{In } g_c$  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. Исследования спектроскопии ФЛ подтверждают изменение тонкой структуры межподзонных переходов в пределах  $\pm 23$  мэВ, связанное с введением варизонного профиля КЯ на величины, хорошо соответствующие расчетным.

В 1 $\delta$ -PHEMT изменение профиля дна КЯ за счет встречного постоянного градиента  $g_c$  приводит к возрастанию подвижности электронов при сохранении их концентрации (См. таблицу 1) [A29]. Моделирование показывает, что при небольшой вариации профиля дна КЯ эффективная ширина КЯ практически не изменяется.

**В Главе 5** рассматриваются структуры с легированной КЯ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n+\text{In}_{0,16}\text{Ga}_{0,84}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , используемые для создания мощных транзисторов с высокой плотностью тока. Их особенностью является повышенное содержание  $x_{\text{AlAs}}$  (35÷40%) в барьере Шоттки, который не легируется для сохранения высокого пробивного напряжения в структуре. В этом случае применяется прямое легирование канала InGaAs донорами Si, что, однако, сильно снижает подвижность электронов в КЯ, в результате прямого рассеяния электронов на донорах проводимость такой КЯ ограничивается. Преимуществом таких структур является снижение электрического поля в барьере  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Нами предложено ввести в структуру **тонкие  $\delta$ -легированные переходные слои GaAs (ПС)** на гетерограницах базовой КЯ для перераспределения доноров в пространстве, используя то, что вблизи барьеров КЯ электронная плотность будет подавлена за счет размерного квантования [A30]. Проведен сравнительный анализ зонной структуры и подвижностей электронов в КЯ  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\delta\text{Si-GaAs}/n+\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\delta\text{Si-GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с высокой концентрацией электронов ( $6\div 14 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>), имеющих различные стратегии легирования: классическое однородное легирование, двустороннее  $\delta$ -легирование в переходных слоях (ПС) GaAs на границах КЯ и комбинированное легирование КЯ и ПС [A31÷A32]. На рисунке 20 приведены профили дна зоны проводимости таких структур, при постепенном перераспределении объемного легирования в  $\delta$ -слои. Параметр  $N_{\text{delta}}/N_D$  отвечает доле легирования в  $\delta\text{Si-GaAs}$  ПС по отношению к полной концентрации доноров. Значения транспортной подвижности электронов в 3-х заполненных подзонах  $\mu_i$  при рассеянии на ионизированной примеси, с учетом межподзонных переходов в зависимости от  $N_{\text{delta}}/N_D$

приведены на рисунке 21. Усредненная холловская подвижность  $\mu_t$  ( $N_{delta}/N_D$ ) имеет два экстремума, что связано с различным поведением подвижностей электронов в подзонах  $\mu_i$ . В разных диапазонах значений  $N_{delta}/N_D$  преобладают различные конкурирующие тенденции: 1) в диапазоне  $N_{delta}/N_D$  от 0 до 0.55 - рост  $\mu_t$  из-за уменьшения рассеивающих центров в центральной области КЯ при переносе части донорной примеси в ПС; 2) в диапазоне  $N_{delta}/N_D$  от 0.55 до 0.83 - уменьшение  $\mu_t$  из-за возрастания прямого рассеяния электронов на ионах доноров в ПС GaAs; 3) в диапазоне  $N_{delta}/N_D$  от 0.83 до 1 - рост  $\mu_t$  из-за увеличения области локализации электронов в верхних подзонах №1 и 2, когда вследствие перестройки профиля КЯ снижается перекрытие электронных ВФ и донорной примеси [А33].

В выращенных образцах  $Al_{0,38}Ga_{0,62}As/In_{0,15}Ga_{0,85}As/Al_{0,38}Ga_{0,62}As$  ( $x=0,38, y=0,15$ ), ширина КЯ - 15 нм (18 нм для №656), для снижения сегрегации кремния температура роста активных слоев была снижена до 570 °С для слоев GaAs и 470 °С для  $In_yGa_{1-y}As$ . В образце №656 с легированием только в ПС GaAs было использовано по 2  $\delta$ -Si слоя в каждом ПС для снижения эффекта амфотерности кремния при столь высоких уровнях легирования.

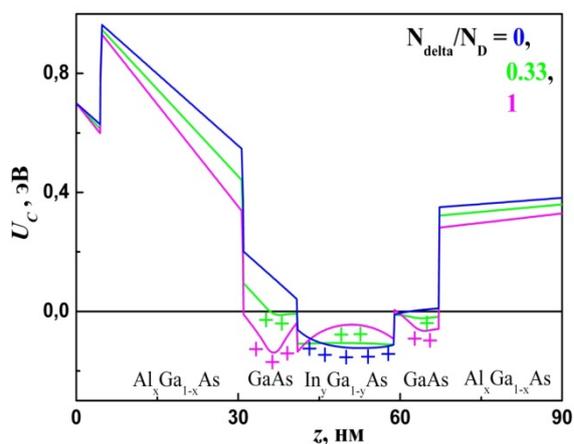


Рисунок 20. Профиль зоны проводимости  $U_C$  при последовательном перераспределении концентрации доноров из КЯ в  $\delta$ -слои, размещенные в переходных нанобарьерах GaAs для трех различных значений  $N_{delta}/N_D = 0; 0,33$  и 1.

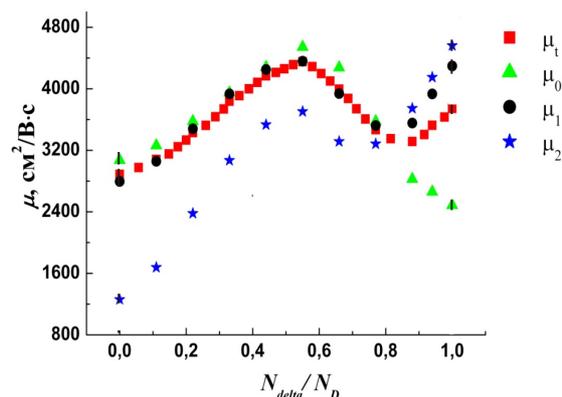


Рисунок 21. Рассчитанные холловская подвижность электронов  $\mu_t$  (квадраты), подвижности электронов первой, второй и третьей подзон размерного квантования -  $\mu_0$  (треугольник),  $\mu_1$  (круг) и  $\mu_2$  (звезда) в HFET СКЯ с фиксированным суммарным легированием при переходе от объемного к  $\delta$ -легированию в GaAs барьерах.

Исследования электронных свойств (таблица 2) показали, что во всех структурах с сильным легированием (662÷659) достигается высокая электронная плотность  $n_H \sim 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Перенос легирования в ПС GaAs приводит к приросту подвижности электронов. Максимальную комбинацию как  $n_H$ , так и  $\mu_H$  продемонстрировала структура с легированием в ПС. В данной структуре наблюдались осцилляции ШдГ при  $T=4,2$  К, содержащие несколько частот, по которым определены концентрации электронов в 4-х заполненных подзонах размерного квантования. Показано, что максимальная подвижность электронов наблюдается в верхних подзонах размерного квантования №2 и №3, ВФ которых имеют наибольшие амплитуды в нелегированном слое  $In_{0,15}Ga_{0,85}As$ .

**Таблица 2.** Электронные транспортные свойства HFET КЯ с комбинированным легированием с различным профилем состава квантовой ямы (в скобках - относительное изменение от базовой структуры).

№ обр	Тип легирования ПС-КЯ-ПС	300 К		77 К	Расчет
		$n_{H_s}$ $10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu_{H_s}$ $\text{см}^2/\text{Вс}$	$\mu_{H_s}$ $\text{см}^2/\text{Вс}$	$\mu_{I_s}$ $\text{см}^2/\text{Вс}$
663	n+ (КЯ)	5,9	1300	1330	2830
662	n++ (КЯ)	11,7	1150	1320	2540
656	2 $\delta$ - i - 2 $\delta$	13,7	1520	1780	4310
659	2 $\delta$ - n+ - 2 $\delta$	12,0	1200	1450	4070

Для снижения утечки затвора в мощных транзисторах на базе НЕМТ структур предложено использовать **варизонный барьер**  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , обеспечивающий снижение встроенного электрического поля в структуре, что в свою очередь, должно снижать эффекты лавинного пробоя из-за ускоренных в этом поле горячих электронов при их переходе в канал. Кроме того, такая форма уменьшает пространственный перенос электронов в барьер [А34]. Для линейного профиля состава  $x_{\text{AlAs}}$  от гетерограницы с КЯ  $x_1 = 0,38$  до приповерхностного значения  $x_2 = 0,18$  оценки тока утечки затвора в ВКБ приближении дают его снижение в 1,5 раза при  $U_{gs}=0,5$  В и в 2,5 раза при  $U_{gs} = -0,7$  В в сравнении со структурой, где барьер имеет постоянный состав  $x = 0,28$ .

В **шестой главе** рассматривается проблема управления электронными состояниями, эффективной массой электронов и транспортными свойствами в слабом и сильном электрическом поле в InP НЕМТ КЯ на основе использования функциональных нановставок InAs и GaAs в составной КЯ. **Раздел 6.1** посвящен исследованию проблемы дизайна и электронных свойств гетероструктур с высоким содержанием InAs в квантовой яме  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  на подложках InP (состав слоев  $x \sim 0,52$ ,  $y \sim 0,53 \div 0,7 // 1,0$ ). В разделе 6.1 рассматриваются конструкции и свойства **однородных КЯ** при а) различной ширине изоморфной КЯ (LM InP НЕМТ,  $y \sim 0,53$ )  $L_{qw}=14.5 \div 26$  нм, при  $n_s = (1.6 \div 3.2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  с односторонним и двусторонним дельта-легированием Si [А35÷А37] и б) последовательном увеличении мольной доли InAs в псевдоморфно напряженных КЯ (InP РНЕМТ)  $L_{qw}=18 \div 16$  нм и  $n_s > 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  с односторонним  $\delta$ -Si легированием [А36, А10]. Теоретически и экспериментально исследовано влияние ширины КЯ LM InP НЕМТ на заполнение электронных подзон КЯ и холловскую подвижность. При  $n_s \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  вторая подзона КЯ начинает заполняться электронами при ширине более 11 нм. Характерные значения  $\mu_n$  составляют  $(9 \div 10) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (300 К) и  $(28 \div 30) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (77 К). Исследования низкотемпературного магнетотранспорта выявляют в InP НЕМТ параметры одновременно для 2-х заполненных подзон КЯ №0, №1 благодаря достаточно высоким значениям

подвижности электронов. В LM НЕМТ значения транспортного времени релаксации импульса  $\tau_{i0}$  и  $\tau_{i1}$  оказались близкими (в пределах 18%) [A35, A36].

В InP РНЕМТ при увеличении  $y(\text{InAs})$  показано, что подвижность электронов вначале увеличивается при увеличении  $y$ , затем несколько снижается при  $y \sim 0,7$  при  $L_{QW} \sim 16$  нм вследствие влияния структурных факторов, связанных с началом неупругой релаксации псевдоморфно напряженного слоя  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  [A10, A38]. Интересной особенностью РНЕМТ КЯ оказалось увеличенная подвижность электронов в верхней подзоне КЯ по отношению к LM InP НЕМТ, т.е.  $\tau_{i0} < \tau_{i1}$ , соотношение  $\tau_{i1}/\tau_{i0}$  достигало  $\sim 2$  при  $y \sim 0,6$ . Таким образом, электронные транспортные свойства во второй по счету подзоне размерного квантования более восприимчивы к изменениям слоевой структуры КЯ [A38]. Переход к двустороннему  $\delta$ -легированию LM InP НЕМТ позволяет создать высокую концентрацию электронов  $n_S = 5,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  при сохранении высоких значений подвижности электронов  $\mu_H = 8,5 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при комнатной  $T$  и  $\mu_H = 15,8 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  при  $T = 4,2$  К, при этом Фурье-анализ осцилляций ШдГ показал, что значения  $n_0$  и  $n_1$  сближаются из-за параболического изгиба потенциала КЯ, подобно 2 $\delta$ -РНЕМТ/GaAs [A39].

В разделе 6.2 исследована **проблема инвертированного легирования** в изоморфных InP НЕМТ КЯ с малой толщиной барьера  $L_b$ , отделяющего КЯ от поверхности. В структурах LM InP НЕМТ эта проблема актуальна ввиду достижения большой крутизны транзисторов и предельной рабочей частоты. Моделирование зонной структуры в диапазоне  $L_b = 4 \div 20$  нм для двух способов расположения одиночного  $\delta$ -Si слоя относительно КЯ - со стороны поверхности (стандартного) и со стороны подложки (инвертированного) показало, что в стандартной КЯ электрическое поле доноров снижает встроенное электрическое поле в КЯ, а в случае инвертированного - увеличивает его (рисунок 22) [A40]. В рассматриваемых образцах для актуальных  $L_b \sim 10 \div 15$  нм и шириной КЯ 15 нм этот эффект сложения встроенных полей имеет крайне сильное влияние на зонную структуру и заполнение электронных состояний. Экспериментально созданы InP НЕМТ с двумя уровнями легирования -  $N_{Si} = 2,7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (№312-стандартный, №313- инвертированный), 2 -  $N_{Si} = 3,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (№308-стандартный, №309- инвертированный). Для устранения нежелательных эффектов сегрегации доноров в инвертированных структурах, все образцы были выращены при сниженной температуре подложки до  $T_S = 350/380$  °С. В обоих парах образцов оказалось, что переход к инвертированному легированию радикально (в  $\sim 2$  раза) увеличивает концентрацию электронов. Подвижность электронов слабо возрастает в структуре с меньшим легированием и уменьшается в структуре с более сильным легированием при комнатной температуре. При низких  $T$  ( $T < 80$  К) подвижности заметно снижаются в инвертированных КЯ (в 1,6 раз в №309 и в 1,25 раз в №313).

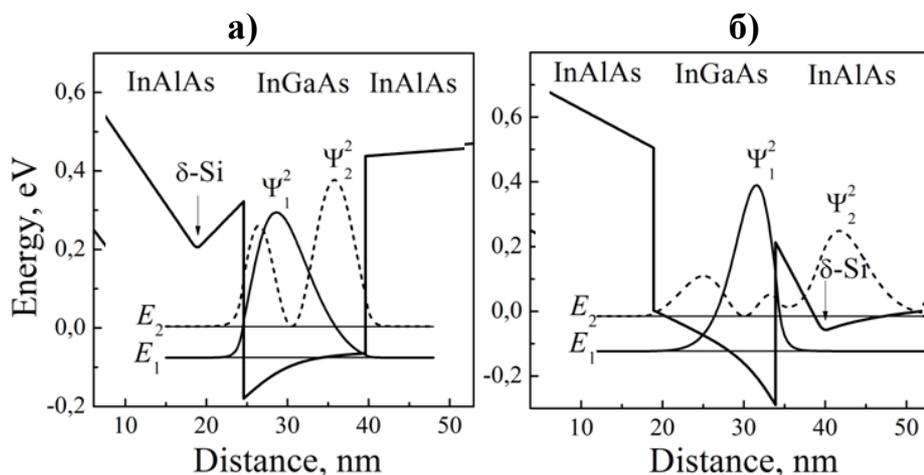


Рисунок 22. Рассчитанные зонные профили и волновые функции в InP НЕМТ КЯ с  $\delta$ -легированием: а – с верхним легированием; б - с нижним инвертированным легированием.

Причина эффекта - в снижении потенциала дна зоны проводимости в области  $\delta$ -Si слоя при инвертированном дизайне структур, приводящая также к квазиреугольной форме КЯ. Моделирование зонной структуры совместно с данными низкотемпературного транспорта и спектроскопии ФЛ подтверждают, что сложный потенциал приводит к снижению эффективной глубины КЯ и заполнению второй подзоны в инвертированных КЯ даже при малой толщине слоя InGaAs [A40].

В разделе 6.3 представлены исследования неоднородных **составных квантовых ям (СКЯ)** на основе  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  НЕМТ на подложках InP, **содержащих одну центральную нановставку InAs различной толщины и двойные нановставки InAs и GaAs в СКЯ**. Моделирование зонной структуры СКЯ с центральной вставкой InAs в зависимости от ее толщины  $d_{ins}$  показывает, что при увеличении  $d_{ins}$  ВФ основного состояния стягивается в область вставки, а когда уровень подзоны  $E_0$  пересекает дно слоя  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ , эффективная ширина КЯ стремится к  $d_{ins}$  [A9]. Согласно расчетам, это должно приводить к снижению концентрации электронов в СКЯ, а также к увеличению межподзонного зазора  $E_1 - E_0$ . Исследовано также влияние положение вставки InAs в КЯ. Что касается подвижности электронов, то с одной стороны, бинарный материал вставки исключает рассеяние электронов на флуктуациях состава сплава, с другой стороны, усиливается рассеяние на шероховатостях дополнительных гетерограниц в СКЯ  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{InAs}$ . Для последнего механизма рассеяния известно, что критичным он становится при  $L_{qw} \rightarrow 0$ . Поэтому размещение толстой вставки InAs не является целесообразным. К тому же, критическая толщина слоя  $\text{InAs}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  находится вблизи 4нм. Для того, чтобы увеличить в среднем содержание InAs в СКЯ без негативного снижения эффективной ширины СКЯ нами **впервые была предложена структура с двумя симметрично расположенными**

**нановставками InAs** [A41]. Предложен формализм численной оценки эффективной ширины КЯ по точкам перегиба ВФ основного состояния  $\Psi_0$  и по полуширине ВФ. Расчет показывает, что в этом случае благодаря туннельной связи 2-х вставок, формируется единая квантовая система с  $L_{eff}$ , сравнимой с исходной шириной образующего канала  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  (рисунок 23) [A42]. В случае СКЯ с тремя вставками зонная структура приближается к РНЕМТ КЯ, со слегка промодулированной формой огибающих  $\Psi_i$  ВФ электронов, поэтому использование таких структур для НЕМТ приложений вряд ли целесообразно. Был проведен расчет скорости рассеяния электронов на шероховатостях гетерограниц на основе вариационного анализа влияния шероховатостей  $\partial L_{qw}$  на размытие уровней энергии квантования. В случае составной КЯ с 2мя вставками производная  $\partial E/\partial L$  имеет более плавный характер, указывая на то, что эффективная ширина КЯ меньше зависит от толщины вставки. Зависимости подвижности электронов  $\mu_{IR}$  на шероховатости гетерограниц от суммарной толщины InAs, для однородной КЯ InAs и СКЯ, содержащих 1 (1 ins) или 2 (2 ins) симметрично расположенные нановставки InAs, приведены на рисунке 24. В случае двойных нановставок InAs  $\mu_{IR}$  оказывается выше в диапазоне суммарной  $d_{ins} \sim 2 \div 3$  нм [A15]. Подробно исследовалось влияние условий формирования – температуры формирования составной КЯ и давления мышьяка  $P_{As4}$  при эпитаксиальном росте составных КЯ с одиночной вставкой InAs в трех сериях образцов в интервале температур подложки  $T_S \sim 410 \div 500$  °C [A42÷A44].

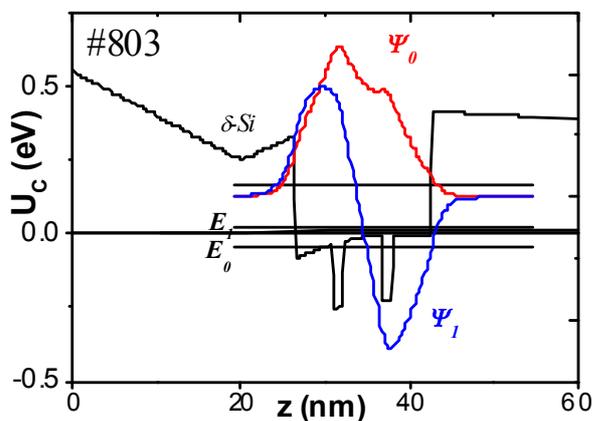


Рисунок 23. Профиль зоны проводимости  $U_C$  при последовательном перераспределении концентрации доноров из КЯ в  $\delta$ -слои, размещенные в переходных нанобарьерах GaAs для трех различных значений  $N_{delta}/N_D = 0; 0,33$  и 1.

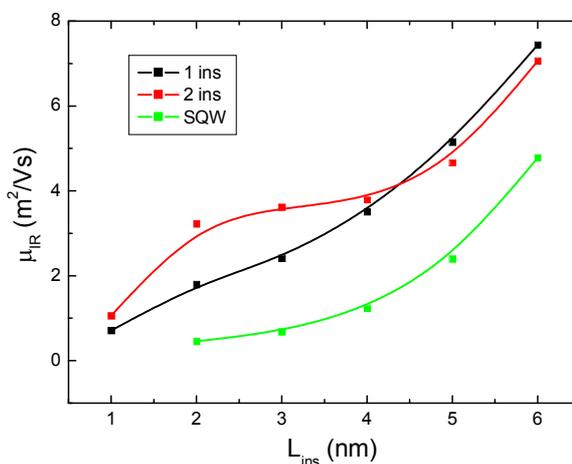


Рисунок 24. Рассчитанные зависимости подвижности электронов  $\mu_{IR}$  на шероховатости гетерограниц от суммарной толщины InAs, для однородной КЯ InAs и СКЯ, содержащих 1 (1 ins) или 2 (2 ins) симметрично расположенные нановставки InAs.

Проведены структурные исследования образцов методами ПЭМ ВР, РД, ВИМС. В первой серии с СКЯ 17 нм толщина InAs варьировалась от 1,8 нм до 8 нм. При  $T_S \sim 430$  °C  $d_{ins} = 4,3$  нм уже приводит к снижению подвижности электронов несмотря на отсутствие заметной релаксации слоя, даже в образце со сниженной до 470 °C температурой роста

[A11]. Наиболее оптимальным условием формирования оказалась  $T_S \sim 430$  °С с одновременным снижением  $P_{As4}$  во время роста вставки. В лучших образцах СКЯ с толщиной вставки InAs 4 нм получено увеличение электронной подвижности до  $\mu_H = 9780$  см<sup>2</sup>/В·с (300 К) и 30340 см<sup>2</sup>/В·с (77 К) при концентрации электронов  $3,24 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Измерения в ПЭМ показывают, что выращенные образцы обладают высоким структурным совершенством, а размытие границ даже в случае наноразмерной вставки толщиной 1,8 нм составляет всего 1,5 монослоя (рисунок 25 а). [A44].

**Разделы 6.4-6.5** описывают реализацию и электронные свойства **нового типа структур с двойными нановставками InAs и переходными барьерами GaAs в СКЯ**. На базе структуры 16 нм InP LM НЕМТ с односторонним дельта-легированием и  $n_S \sim 1,5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> впервые реализованы структуры с 2-мя симметричными вставками InAs толщиной 1,2 нм (обр. 803, рисунок 25б), а также 2-мя переходными барьерами GaAs 1.1 нм (обр. 804) и комбинацией 2-х InAs и 2-х GaAs вставок (обр. 805) [A45]. Влияние условий роста на структурные и электронные свойства СКЯ с двойными нановставками исследованы в интервале температур подложки  $T_S \sim 410 \div 500$  °С [A46].

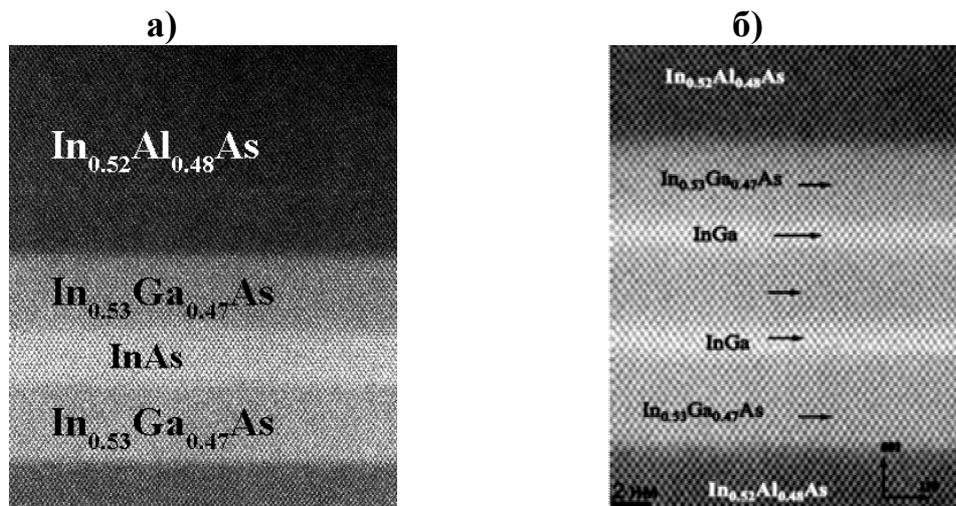


Рисунок 25. Изображения, полученные методом высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии образцов: а) №496 с составной КЯ, содержащей толстую нановставку InAs (4 нм). Размытие гетерограниц 1,2 МС; б) №803 с составной КЯ, содержащей две тонкие нановставки InAs (1,2 нм). Размытие гетерограниц менее 1 МС.

Оптимизация условий роста позволила получить в СКЯ с толщиной 2-х вставок InAs по 3,5 нм высокую электронную подвижность до  $\mu_H = 9110$  см<sup>2</sup>/В·с (300 К) и 21800 см<sup>2</sup>/В·с (77 К) при концентрации электронов  $2,85 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Предложенные впервые нанослои GaAs в качестве переходных барьеров на гетерогранице являются псевдоморфно растянутыми, и были введены из соображений сдвига частот фононного спектра интерфейсных полярных оптических фононов [A47, A48]. Введение в СКЯ множественных гетерограниц, однако, привело к уменьшению слабополевой подвижности электронов при введении 2-х

нановставок InAs и переходных барьеров GaAs, особенно при комбинации 4-х вставок в обр. 805. Кроме того, наблюдалось уменьшение концентрации электронов в СКЯ (табл. 3) [A45].

Отдельно исследовано **изменение эффективной массы электронов** в основной подзоне СКЯ за счет введения нановставок. Для численной оценки проведен расчет в приближении локальной эффективной массы, усредняющей объемные значения  $m^*$  в слоях с весовым коэффициентом  $|\Psi_0|^2$ :

$$m^*/m_0 = \frac{\int m^*(z) / m_0 \psi(z) \psi^*(z) dz}{\int \psi(z) \psi^*(z) dz}$$

Расчет показал, что эффект от введения нановставок превышает среднее увеличение состава в СКЯ. Такое надлинейное снижение эффективных масс связано с квантовым эффектом усиления амплитуды ВФ в области узкозонных вставок.

Экспериментальные значения  $m^*$  были определены из эффекта ШдГ при кратных температурах 4,2 и 8,4 К (рисунок 26) по формуле

$$m_c^* = \frac{e\hbar B_n}{2\pi^2 k_B T_2} \text{Arch} \left[ A(T_2, B_n) / A(T_1, B_n) \right]$$

Получено снижение эффективной массы электронов в СКЯ на 26% при толщине нановставок InAs 1,2 нм. Хорошее согласие экспериментальных данных с расчетной моделью получено только после учета непараболичности энергетического спектра электронов из-за вариации концентрации электронов в СКЯ с различной комбинацией вставок [A49, A45].

**Таблица 3.** Электронные транспортные свойства образцов с однородной КЯ (№802) и составными КЯ, содержащими 2 нановставки InAs (№803), 2 переходных барьера GaAs (№804) и комбинацию нановставок обоих типов (№805) при температуре 4,2 К.

№ обр.	$n_{\text{InAs}}$ , $10^{12} \text{ см}^{-2}$	$n_{\text{GaAs}}$ , $10^{12} \text{ см}^{-2}$	$\mu_{\text{H}_2}$ , $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$m_c^*/m_0$ (ШдГ)
802	1,55	1,57	45170	$0,065 \pm 0,001$
803	1,38	1,36	28100	$0,0436 \pm 0,001$
804	1,13	1,12	30800	$0,0588 \pm 0,001$
805	1,53	1,54	21800	$0,059 \pm 0,01$

**Исследования оптических свойств СКЯ** по спектроскопии ФЛ подтвердили сильное влияние вставок на электронные и дырочные состояния СКЯ для одиночной InAs [A50] и двойных вставок InAs и GaAs [A51]. Введение вставок InAs приводит к увеличению амплитуды ВФ электронов и локализации тяжелых дырок в области вставок. При этом энергия перехода снижается за счет сдвига вверх энергии тяжелых дырок, а интенсивность

ФЛ возрастает за счет усиления перекрытия электронной и дырочной ВФ. Впервые за счет напряженных нанослоев 10 Å GaAs в гетеробарьерах СКЯ получен инверсный порядок дырочных зон (основной является подзона легких дырок), поскольку ширина и глубина СКЯ для легких дырок заметно выше, чем для тяжелых дырок. Комбинации GaAs и InAs нановставок в СКЯ позволяет отдельно управлять энергией оптических переходов от подзон тяжелых и легких дырок за счет изменения толщины и положения вставок. В СКЯ с ПС GaAs получено более плавное распределение интенсивности сигнала в широкой полосе ФЛ, а также длинноволновое смещение наиболее интенсивного перехода на спектрах ФЛ на ~0,3 эВ (рисунок 27) [A51].

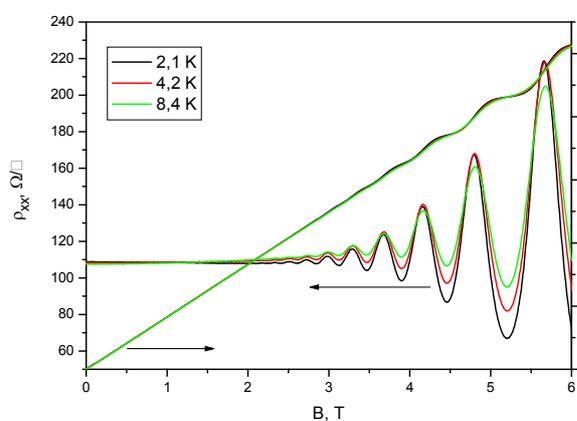


Рисунок 26. Осцилляции магнетосопротивления и холловское сопротивление в магнитном поле при гелиевых температурах в образце СКЯ №803.

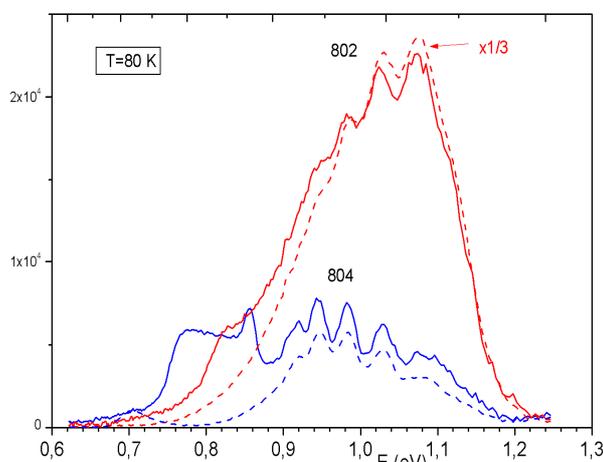


Рисунок 27. Спектры фотолюминесценции образцов с однородной КЯ (№802) и СКЯ, содержащих 2 нановставки InAs (№803), 2 переходных барьера GaAs (№804) и комбинацию нановставок InAs и GaAs (№805) при температуре 77 К.

**В разделе 6.5** приводятся данные о **высокополевом электронном транспорте в образцах с нановставками в составной КЯ**. В сильных электрических полях дрейфовая скорость насыщения определяется эффективной массой электронов и энергией оптического фонона, потому уменьшение  $m_e^*$  и изменение коэффициента электрон-фононной связи за счет форм-фактора рассеяния горячих электронов играет значительно более существенную роль, нежели увеличение слабополевой подвижности электронов [A52, A53]. Реализовать сильное отличие в содержании InAs в барьере и канале КЯ, для которого предсказано значительное снижение темпов рассеяния горячих электронов на полярных оптических (ПО) фононах на практике невозможно.

Однако, рассеяние с участием интерфейсных ПО фононов можно изменить в СКЯ с бинарными напряженными нанослоями. Кроме того, в СКЯ с 1 или 2-мя вставками InAs увеличивается эффективная глубина СКЯ, таким образом, немного снижается эффект

переноса горячих электронов в барьер СКЯ. Модель учитывала изменение электронной плотности в сильном поле [A53].

Методом геометрического магнетосопротивления из измерения импульсных ВАХ (ИФП Литва, группа акад. Пожела Ю.К.) экспериментально определены полевые зависимости дрейфовой скорости насыщения электронов в однородных КЯ и СКЯ с различным набором нановставок в сильном электрическом поле [A47, A54, A55]. Показано, что введение одной нановставки InAs увеличивает дрейфовую скорость насыщения  $V_S$  (до 2-х раз при толщине  $d_{InAs} \sim 4$  нм и на  $\sim 40\%$  при  $d_{InAs} \sim 1,2$  нм), при этом в случае более толстой вставки InAs наблюдается снижение электрического поля насыщения (до 3-х раз). Значения  $V_S$  и  $E_C$  приведены в Таблице 4.

**Таблица 4.** Значения высокополевой дрейфовой скорости насыщения  $V_S$  и электрического поля насыщения  $E_C$ , подвижности электронов  $\mu_{HF}$  в КЯ и СКЯ, содержащих нановставки InAs и GaAs.

№ обр.	Тип КЯ	$\mu_{HF}$ , см <sup>2</sup> /Вс	$V_S$ , 10 <sup>7</sup> см/с	$E_C$ , 10 <sup>3</sup> В/см
794	SQW	6620	2,47	3,37
796	+1 InAs	9400	3,41	3,60
802	SQW	10000	2,67	2,67
803	+2 InAs	10000	2,91	2,91
804	+2 GaAs	13400	3,95	3,95
805	+2 InAs +2 GaAs	12810	$\sim 4,0$	$\sim 4,0$

Введение двух нановставок приводит к возрастанию как дрейфовой скорости насыщения электронов (в 2,2 раза при толщине нановставок  $d_{InAs} \sim 3,5$  нм), так и к увеличению электрического поля насыщения (на 30%) [A55].

Таким образом, впервые обнаружено и объяснено сильное влияние нановставок InAs и GaAs в СКЯ на максимальную дрейфовую скорость насыщения  $V_{max}$  и электрическое поле насыщения  $F_c$ . Структуры с комбинацией нановставок двух типов

приводят к увеличению как  $V_{max}$ , так и  $F_c$ , и могут быть наиболее перспективны в приложениях, требующих предельно высоких частот.

В **Заключении** рассматриваются основные итоги настоящей работы и дальнейшие пути развития работы на основе метаморфных структур с повышенным содержанием InAs на подложках GaAs и InP. В таких структурах важнейшим фактором является сохранение наиболее выгодного параметра решетки в композиции структуры  $In_xAl_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As/In_xAl_{1-x}As$ , а также обеспечение высокого структурного совершенства переходного метаморфного буфера (ММБ), обеспечивающего механическое согласование активных слоев гетероструктуры и подложки. На основе метаморфной технологии с переменным профилем состава переходного буфера InAlAs разработаны подходы по достижению необходимого параметра решетки для выращивания InGaAs/InAlAs КЯ с произвольным содержанием InAs, в диапазоне 75% ÷ 100% [A56, A12÷A14]. Исследованы такие новые приемы, как введение нескольких сверхрешеток или инверсных профилей состава InAs в ММБ. Комбинация

метаморфной технологии и псевдоморфного канала позволили получить высококачественные КЯ и двойные туннельно-связанные КЯ с содержанием  $\text{InAs}$  вплоть до 85÷100% для исследований квантового эффекта Холла [А57]. Таким образом, в настоящей работе исследован весь диапазон содержания  $\text{InAs}$  в канале  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  НЕМТ КЯ от  $y=0\%$  до  $y=100\%$ . Применение концепции функциональных нановставок и пространственно-неоднородных слоев в таких двумерных квантовых системах с повышенным содержанием создало новые возможности в инженерии квантовых гетероструктур с заданными свойствами, в том числе, для приложений СВЧ твердотельной электроники суб-ТГц диапазона.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**1. Дано теоретическое и экспериментальное обоснование скейлинга глубины залегания квантовой ямы в РНЕМТ гетероструктурах с односторонним  $\delta$ -легированием, установлено влияние на зонную структуру и электронные транспортные свойства возрастающего встроенного поля при одновременном сокращении расстояния от КЯ до поверхности от 28 нм до 10 нм и увеличением донорного легирования, в том числе:**

1.1. Теоретически рассчитана зависимость концентрации доноров от глубины залегания КЯ, обеспечивающая заданную концентрацию электронов в квантовой яме при приближении ее к поверхности;

1.2. При сокращении толщины приповерхностного широкозонного барьера  $L_b$  до 9 нм и менее и компенсирующем увеличении концентрации доноров экспериментально наблюдается последовательное снижение концентрации электронов, связанное с уширением  $\delta$ -слоя и амфотерным поведением примеси при переходе к сильному легированию;

1.3. Обнаружена температурно-независимая компонента немонотонной зависимости подвижности электронов от глубины залегания квантовой ямы, обусловленная конкуренцией нескольких факторов при рассеянии электронов на удаленных ионизированных донорах. Максимальная подвижность электронов при концентрации  $n_s \sim 1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  достигается при толщине барьера  $L_b=11$  нм, при этом реализуется максимальное соотношение транспортного и квантового времени релаксации импульса. При изменении  $L_b$  наблюдается снижение подвижности электронов.

**2. В двусторонне-легированных РНЕМТ квантовых ямах с высокой электронной плотностью:**

2.1. Экспериментально и теоретически показано, что в РНЕМТ гетероструктурах с двусторонним дельта-легированием при увеличении концентрации электронов в диапазоне  $(2,0 \div 4,0) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  подвижность электронов снижается. Наблюдается насыщение роста концентрации электронов в основном состоянии КЯ. Основным фактором, приводящим к таким процессам, является сильное уменьшение эффективной глубины КЯ за счет увеличения электростатического барьера в центральной области КЯ.

**2.2. Предложен подход и реализована технология и конструкция варизонных гетероструктур** с большим градиентом состава КЯ InGaAs до 2,1 % InAs/нм. Компенсация изгиба дна КЯ за счет варизонного профиля состава InGaAs приводит в двусторонне -легированных РНЕМТ гетероструктурах к возрастанию электронной подвижности и концентрации. Получено увеличение проводимости в КЯ на 35% при низких температурах.

**3. Теоретически обоснован и экспериментально подтверждён квантовый характер явлений параллельной проводимости** в сильнолегированных через спейсер гетероструктурных НЕМТ КЯ с высокой электронной плотностью в приближении двух заполненных подзон размерного квантования, в том числе:

3.1. Обоснована немонотонная зависимость подвижности электронов от их концентрации в РНЕМТ гетероструктурах с односторонним  $\delta$ -легированием кремнием, обусловленная конкуренцией механизмов экранирования и возрастания фермиевского импульса, ответственного за рост подвижности, и увеличением туннелирования электронов в область ионизированной примеси, ответственного за снижение подвижности. Максимальная подвижность электронов и соответствующая ей концентрация электронов, при которой возрастание подвижности сменяется спадом, могут быть увеличены при помощи увеличения содержания AlAs в спейсере.

3.2. Показано, что в таких структурах при увеличении толщины спейсерного слоя может наблюдаться аномальный спад подвижности при рассеянии на ионизированных примесях. При увеличении толщины спейсера возникает пространственная гибридизация волновых функций электронов и резонанс состояний в КЯ и в широкозонном барьере, вызванные снижением энергии зоны проводимости в области доноров, и сопровождающиеся сближением подвижностей электронов в гибридизированных электронных подзонах.

**3.3. Предложен подход по управлению локализацией электронных состояний и подвижностью электронов с использованием составного донорного/спейсерного слоя, содержащего нанобарьеры AlAs,** в структурах с сильным  $\delta$ -легированием. Обнаружено более чем 3-кратное увеличение низкотемпературной подвижности электронов в НЕМТ с неглубокой КЯ, и заметное увеличение подвижности электронов в РНЕМТ КЯ при введении нанобарьеров AlAs толщиной 2 нм. Эффект связан с подавлением туннельной связи состояний в реальном пространстве в КЯ и в потенциальной яме  $\delta$ -слоя ионизированных доноров. При этом добавление одного нанобарьера AlAs в спейсер не приводит к заметному перераспределению электронной плотности в пространстве. Добавление двух нанобарьеров AlAs, окружающих  $\delta$ -слой Si в AlGaAs, приводит к вытеснению электронных состояний из потенциальной ямы  $\delta$ -слоя доноров.

**4. Предложен способ увеличения проводимости HFET гетероструктур с легированным каналом на основе AlGaAs/n-InGaAs(Si)/AlGaAs при использовании дельта-легирования в переходных нанобарьерах GaAs.** Установлены особенности электронного транспорта в таких структурах с высокой электронной плотностью в диапазоне до  $n_s \sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  при комбинированном легировании квантовой ямы и  $\delta$ -легировании в

переходных нанобарьерах GaAs. Оптимизация распределения примесей приводит к увеличению подвижности электронов, достигнут прирост проводимости ~ 50% при комнатной температуре.

**5. Развѣт подход по использованию нановставок InAs и GaAs в канал HEMT структур InAlAs/InGaAs на подложках InP** для управления зонным профилем, эффективной массой электронов, их подвижностью и дрейфовой скоростью насыщения, в том числе:

5.1. Разработаны технологические режимы эпитаксии, позволяющие сохранить высокое структурное совершенство формируемой составной квантовой ямы при введении напряженных наноразмерных вставок InAs и GaAs в HEMT структуры InAlAs/InGaAs на подложках InP.

5.2. Показано, что при использовании одиночной нановставки InAs эффективная ширина КЯ уменьшается. Введение двух нановставок InAs в СКЯ позволяет сохранить эффективную ширину СКЯ, при этом за счет квантового туннелирования в СКЯ достигается более значительное снижение эффективной массы электронов  $m^*$ , чем от увеличения среднего состава InAs в КЯ. В структурах с СКЯ с двумя нановставками InAs толщиной 1,2 нм реализовано уменьшение  $m^*$  на 26% по сравнению с однородной КЯ.

5.3. В составных КЯ нановставки InAs и/или переходные барьеры GaAs могут играть роль фононных барьеров, снижающих фононное рассеяние горячих электронов за счет уменьшения коэффициента электрон-фононной связи. Введение нановставок InAs и GaAs приводит к увеличению дрейфовой скорости насыщения электронов и/или увеличению электрического поля насыщения:

- введение одной нановставки InAs увеличивает дрейфовую скорость насыщения (до 2-х раз при толщине  $d_{InAs} \sim 4$  нм и на ~ 40% при  $d_{InAs} \sim 1,2$  нм), при этом в случае более толстой вставки InAs наблюдается снижение электрического поля насыщения (до 3-х раз);

- введение двух нановставок приводит к возрастанию как дрейфовой скорости насыщения электронов (в 2,2 раза при толщине нановставок  $d_{InAs} \sim 3,5$  нм), так и к увеличению электрического поля насыщения (на 30%).

В результате выполнения представленной работы развито новое направление в физике и технологии наногетероструктур A3B5 - применение пространственно-неоднородных функциональных нанослоев в гетероструктурных квантовых ямах на основе  $In_yGa_{1-y}As$  для управления электронными состояниями и процессами переноса электронов.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pseudomorphic HEMT Technology and Applications / ed. R. Lee Ross, S. P. Svensson, P. Lugli // NATO ASI Series. – Springer, 1996.–350 p.
2. del Alamo, J. Nanometre-scale electronics with III–V compound semiconductors / J. del Alamo // Nature. – 2011. –V.479. – P.317–323.
3. Ajayan, J. A review of InP/InAlAs/InGaAs based transistors for high frequency applications / J. Ajayan, D. Nirmal // Superlattices and Microstructures. – 2015. – V.86. – P.1-19.

4. Протасов Д. Ю. Подвижность двумерного электронного газа в DA-pHEMT гетроструктурах с различной шириной профиля  $\delta$ -n-слоев / Д. Ю. Протасов, А. К. Бакаров, А. И. Торопов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2018.–Т.52. – Вып. 1.– С.48–56.
5. Kim, K. W. // Effects of interface phonon scattering in multiheterointerface structures / K.W. Kim, A.R. Bhatt, M.A.Stroscio, et al. // J. of Applied Physics. – 1992.–V.72.– N.6.–P. 2282–2287;
- Пожела, Ю. Рассеяние электронов на захваченных поверхностных полярных оптических фононах в двухбарьерной гетроструктуре / Ю. Пожела, К. Пожела, В. Юцене // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т.41. – Вып. 9. – С.1093–1098.

## АВТОРСКИЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- A1. Галиев, Г. Б. Электрофизические свойства модулированно- и дельта- легированных P-HEMT транзисторных структур на основе  $Al_xGa_{1-x}As/In_yGa_{1-y}As/GaAs$  / Г. Б. Галиев, И. С. Васильевский, Е.А. Климов, В. Г. Мокеров // Микроэлектроника.–2006.–Т.35.–№2.–С.83–89.
- A2. Галиев, Г. Б. Влияние температуры роста спейсерного слоя на подвижность двумерного электронного газа в P-HEMT структурах / Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов и др. // Физика и Техника Полупроводников. – 2006. – Т.40. – Вып.12. – С.1479–1483.
- A3. Галиев, Г. Б. Влияние температуры роста спейсерного слоя на электрофизические и структурные свойства PHEMT структур / Г. Б. Галиев, И. С. Васильевский, Е. А. Климов и др. // Журнал Технической Физики.– 2007.–Т4. – Вып.4.–С.50–55.
- A4. Васильевский, И. С. Электрофизические и структурные свойства двусторонне дельта-легированных PHEMT гетроструктур на основе  $AlGaAs/InGaAs/AlGaAs$  / И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов и др. // Физика и Техника Полупроводников. – 2008. – Т.42. – Вып.9. – С.1102–1109.
- A5. Kulbachinskii, V. A. Electron transport and optical properties of shallow  $GaAs/InGaAs/GaAs$  quantum wells with a thin central  $AlAs$  barrier / V. A. Kulbachinskii, I.S. Vasil'evskii, R.A. Lunin et al. // Semicond. Sci. Technol. – 2007.–V.22.–N.3.–P.222–228.
- A6. Васильевский, И. С. Влияние гибридизации состояний на низкотемпературный электронный транспорт в неглубоких квантовых ямах / И. С. Васильевский, В.А. Кульбачинский, Р. А. Лунин и др. // ЖЭТФ. – 2007. –V.132. – Вып.1. – С.197–199.
- A7. Kul'bachinskii, V. A. Influence of state coupling on the electron transport in shallow quantum wells / V. A. Kul'bachinskii, I. S. Vasil'evskii, R. A. Lunin et al. // Revista Mexicana de Fisica. – 2007.–V.53.–N.7.–P.66–69.
- A8. Наногетроструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике / В.А. Кульбачинский, В.Г. Кытин, Р.А. Лунин, А.П. Сеничкин, А.С. Бугаев, Г.Б. Галиев, Р.М. Имамов, И.С. Васильевский.–Техносфера Москва, 2010. – 432 С. – ISBN: 978-5-94836-255-7.
- A9. Пономарев, Д. С. Инженерия волновых функций в наногетроструктурах  $InAlAs/InGaAs/InAlAs$  с композитной квантовой ямой, содержащей нановставки  $InAs$  / Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Ядерная Физика и Инжиниринг.– 2011. –Т.2. – Вып.1. – С.89–93.
- A10. Васильевский, И. С. Электрофизические и структурные свойства квантовых ям  $In_yGa_{1-y}As/In_xAl_{1-x}As/InP$  с различным содержанием  $InAs$  / И. С. Васильевский, Г.Б. Галиев, В. Г. Мокеров и др. // Кристаллография. – 2010.–Т. 55. – № 1. – С. 7–11.
- A11. Васильев, А. Л. Структурные и электрофизические свойства квантовых ям с наноразмерными вставками  $InAs$  в гетроструктурах на основе  $In_yAl_{1-y}As/In_xGa_{1-x}As$  на

- подложках InP / А.Л. Васильев, И.С. Васильевский, Г. Б. Галиев и др. // Кристаллография. – 2011. – Т.56. – №2. – С. 324–335.
- A12. Галиев, Г. Б. Структурные и электрофизические свойства метаморфных наногетероструктур с высоким содержанием InAs (37-100%) на подложках GaAs и InP / Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Р.М. Имамов и др. // Кристаллография. – 2011. – Т.56. – №5. – С.8–11.
- A13. Галиев, Г. Б. Исследование структурных и электрофизических параметров МНЕМТ наногетероструктур  $\text{In}_{0.70}\text{Al}_{0.30}\text{As}/\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}$  с различным распределением деформаций в метаморфном буфере / Г. Б. Галиев, С. С. Пушкарев, И. С. Васильевский и др. // Кристаллография. – 2012. – Т.57. – №6. – С.954–961.
- A14. Galiev, G. B. Metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs/GaAs HEMT heterostructures containing strained superlattices and inverse steps in the metamorphic buffer / G. B. Galiev, I. S. Vasil'evskii, S. S. Pushkarev et al. // Journal of Crystal Growth. – 2013. – V.366. – P.55–60.
- A15. Васильевский, И. С. Влияние пространственно-неоднородных функциональных нанослоев на процессы переноса в гетероструктурных квантовых ямах на основе InGaAs с высокой электронной плотностью (обзор) / И.С. Васильевский // Труды 7-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», 25 мая 2016 г. / М.: МИФИ. – 2016. – С. 16–18. – ISBN 978-5-7262-2257-8.
- A16. Васильевский, И. С. Метрологическое обеспечение технологии РНЕМТ наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs / И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, Г.Б. Галиев и др. // Труды 2-й научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения", 16-17 мая 2012 г. / М.: МИФИ. – 2012. – С. 50–51. – ISBN 978-5-7262-1686-7.
- A17. Сарайкин, В. В. Анализ InGaAs/InAlAs гетероструктур с нанометровыми вставками InAs методом масс-спектрометрии вторичных ионов / В.В. Сарайкин, А.Н. Клочков, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, С.С. Пушкарев, И.С. Васильевский, А.Л. Васильев // Труды 5-й научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Мокеровские чтения", 21-22 мая 2014 г. / М.: МИФИ. – 2014. – С. 81–82. – ISBN 978-5-7262-1919-6.
- A18. Васильевский, И. С. Метрологическое обеспечение технологии изоморфных гетероструктур  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  на подложках InP методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии / И. С. Васильевский, А. Н. Виниченко, М. М. Грехов, Н. И. Каргин // Труды Первого российского кристаллографического конгресса, 21-26 ноября 2016г. / Москва. – 2016. – С. 326
- A19. Хабибуллин, Р. А. Влияние встроенного электрического поля на оптические и электрофизические свойства Р-НЕМТ наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs / Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Физика и Техника Полупроводников. – 2011. – Т.45. – Вып. 5. – С. 666–671.
- A20. Khabibullin, R. A. The built-in electric field in P-HEMT heterostructures with near-surface quantum wells  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  / R.A. Khabibullin, I.S. Vasil'evskii, D.S. Ponomarev et al. // Journal of Physics: Conference series. – 2012.– V.345. – 012015.
- A21. Хабибуллин, Р. А. Электрофизические и оптические свойства приповерхностных квантовых ям AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с различной глубиной залегания / Р. А. Хабибуллин, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский и др. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т.47. – Вып.9. – С. 1215–1220.
- A22. Виниченко, А. Н. Увеличение подвижности электронов в НЕМТ гетероструктурах с составным спейсером, содержащим нанослой AlAs / А.Н. Виниченко, В.П. Гладков, Н.И.

- Каргин, М.Н. Стриханов, И.С. Васильевский // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – Вып. 12. – С. 1660–1665.
- A23. Galiev, G. B. Quantum and transport scattering times in AlGaAs/InGaAs nanoheterostructures with AlAs inserts in the spacer layer / G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov et al. // Lithuanian Journal of Physics. – 2015. – V. 55. – № 4. – P. 249–254.
- A24. Васильевский, И.С. Р-НЕМТ транзисторная гетероструктура с составным донорным слоем, содержащим нанобарьеры AlAs / И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, Н.И. Каргин и др. // Патент на полезную модель РФ №155420 от 27.11.2014. Заявка № 2014147871.
- A25. Vinichenko, A. N. Pseudomorphic HEMT quantum well AlGaAs/InGaAs/GaAs with AlAs: $\delta$ -Si donor layer / A.N. Vinichenko, I.S. Vasil'evskii // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V.151. – 012037.
- A26. Сафонов, Д. А. Электронный транспорт в РНЕМТ квантовых ямах AlGaAs/InGaAs/GaAs при различных температурах: влияние одностороннего дельта-легирования Si / Д. А. Сафонов, А. Н. Виниченко, Н. И. Каргин, И. С. Васильевский // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т.52. – Вып. 2. – С. 201–206.
- A27. Сафонов, Д. А. Особенности ионизации доноров кремния и рассеяние электронов в псевдоморфных квантовых ямах AlGaAs/InGaAs/GaAs при сильном одностороннем  $\delta$ -легировании / Д.А. Сафонов, А.Н. Виниченко, Н.И. Каргин, И.С. Васильевский // Письма в Журнал Технической Физики. – 2018. – Т. 44. – Вып. 4. – С. 34–41.
- A28. Васильевский, И.С. Влияние профиля состава квантовой ямы на электрофизические свойства Р-НЕМТ гетероструктур с двусторонним дельта-легированием / И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов и др. // Вестник НИЯУ МИФИ.– 2013. – Т.2.– №3.– С.261–266.
- A29. Васильевский, И.С. Технология и электронные свойства Р-НЕМТ AlGaAs/In<sub>y(z)</sub>Ga<sub>1-y(z)</sub>As/GaAs квантовых ям с переменным профилем состава // И.С. Васильевский, А.Н. Виниченко, М.М. Грехов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т.48. – Вып.9. – С.1258–1264.
- A30. Хабибуллин Р.А. Полупроводниковая наногетероструктура со ступенчатой квантовой ямой AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs на подложке GaAs с комбинированным легированием / Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Патент на полезную модель РФ № 113072 от 12.10.2011 г. Заявка № 2011141221.
- A31. Хабибуллин, Р.А. Рассеяние и подвижность электронов в комбинированно-легированных HFET-структурах AlGaAs/InGaAs/AlGaAs с высокой концентрацией электронов / Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – Вып. 10. – С. 1373–1378.
- A32. Хабибуллин, Р.А. Подвижность электронов в комбинированно-легированных транзисторных наногетероструктурах AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs с высокой концентрацией электронов: моделирование и эксперимент / Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Д.С. Пономарев и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 12.– С. 21–24.
- A33. Хабибуллин, Р. А. Увеличение подвижности электронов в комбинированно-легированных транзисторных наногетероструктурах AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs/AlGaAs в случае многоподзонной проводимости / Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Ядерная Физика и Инжиниринг. – 2012. – Т.3. – Вып. 2. – С.179–187.
- A34. Виниченко, А.Н. Транзисторная гетероструктура типа Р-НЕМТ с варизонным барьером Al<sub>x(z)</sub>Ga<sub>1-x(z)</sub>As / А.Н. Виниченко, И.С. Васильевский, Ю.Д. Сибирмовский и др. // Патент на полезную модель РФ №160576 от 29.10.2015. Заявка № 2015146685.
- A35. Кульбачинский, В. А. Электронные подвижности в изоморфных квантовых ямах In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As/In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As/In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As на InP / В.А. Кульбачинский, Р.А. Лунин, Н.А. Юзеева, И.С. Васильевский и др. // ЖЭТФ. – 2013. – Т.143. – Вып. 5. – С.872–876.

- A36. Kulbachinskii, V.A. Electron mobility and persistent photoconductivity in quantum wells  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  on InP substrate / V.A. Kulbachinskii, R.A. Lunin, N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, I.S. Vasilievskii, E.A. Klimov // *Advances in nanodevices and nanofabrication* / Eds. Q. Zhang, W.I. Milne. – CRC Press, 2012. – Chapter 19. – P. 273–281. – ISBN 981436455X, 9789814364553
- A37. Vasil'evskii, I. S. Low temperature electron magnetotransport in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  quantum wells with high electron density / I.S. Vasil'evskii, V.A. Kulbachinskii, G.B. Galiev et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. –2009. – V.150. – 022096. – P.1–4.
- A38. Пономарев, Д. С. Квантовое и транспортное времена рассеяния электронов в наногетероструктурах  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  с повышенным содержанием индия / Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский и др. // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2012. – Т.3. – Вып. 2. – С.173–178.
- A39. Imamov, R.M. Relationship between modification of electrophysical properties and structural characteristics in semiconductor nanosized heterostructures  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  / R.M. Imamov, I.A. Subbotin, G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskiy et al. // *International Conference «Micro- and nanoelectronics 2009»*. Book of abstracts / Moscow, Zvenigorod, 2009.– P.2–42.
- A40. Галиев, Г.Б. Электронные свойства приповерхностных квантовых ям  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  с инвертированным легированием на подложках InP / Г.Б. Галиев, А.Н. Клочков, И.С. Васильевский и др. // *Физика и техника полупроводников*.–2017.–Т.51.–Вып. 6.– С.792–797.
- A41. Пономарев, Д.С. Полупроводниковая наногетероструктура  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с составной активной областью  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  с двумя вставками InAs / Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Патент на полезную модель РФ № 113071 от 12.10.2011 г.
- A42. Пономарев, Д.С. Моделирование зонной диаграммы и расчет эффективной массы электронов в составных квантовых ямах  $\text{InGaAs}$  с нанослоями  $\text{GaAs}/\text{InAs}$  / Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // *Нано- и микросистемная техника*. – 2011. – №12. – С.16–19.
- A43. Galiev, G. B. 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 / G. B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov et al. // *Proceedings of 22nd Int. Symposium on Nanostructures* / Saint Petersburg, Russia, 2014, 27–27 June. – 2014. – P.402–403.
- A44. Galiev, G.B. Electrophysical and structural properties of the composite quantum wells  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  with ultrathin InAs inserts / G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov et al. // *J. Material Research*. – 2015. – V.30. – Issue 20. – P.3020–3025.
- A45. Пономарев, Д.С. Подвижность и эффективная масса электронов в составных квантовых ямах  $\text{InGaAs}$  с нановставками InAs и GaAs / Д.С. Пономарев, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2012.–Т.46.– Вып. 4. – С. 500–506.
- A46. Галиев, Г. Б. Структурные и электрофизические свойства  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  НЕМТ наногетероструктур с различными комбинациями InAs и GaAs вставок в квантовой яме / Г.Б. Галиев, А.Л. Васильев, И.С. Васильевский и др. // *Кристаллография*. – 2015. – Т.60. – Вып. 3. – С.445–454.
- A47. Васильевский, И. С. Транспорт электронов в квантовой яме  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  с дельта-легированным Si барьером в сильных электрических полях / И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Ю.А. Матвеев и др. // *Физика и техника полупроводников*. – 2010. – Т. 44. – Вып. 7. – С. 928–933.
- A48. Galiev, G. B. Electron mobility and high-field drift velocity enhancement in  $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  quantum well heterostructures / G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov

et al. // Proceedings of the 19th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", Ekaterinburg, Russia, 2011, 20–25 June. – 2011. – P.57–58.

A49. Kulbachinskii, V.A. Electron effective masses in InGaAs quantum well with InAs and GaAs inserts. / V.A. Kulbachinskii, N.A. Yuzeeva, G.B. Galiev, E.A. Klimov, I.S. Vasil'evskii et al. // Semiconductor Science and Technology. – 2012. – V.27. – N.3. – P.035021.

A50. Галиев, Г.Б. Особенности фотолюминесценции НЕМТ-наногетероструктур с составной квантовой ямой InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs / Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49. – Вып. 2. – С.241–248.

A51. Галиев, Г.Б. Фотолюминесцентные свойства модулированно-легированных структур  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с напряженными нановставками InAs и GaAs в квантовой яме / Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2015. – Т.49. – Вып. 9. – С.1243–1253.

A52. Мокеров, В.Г. Дрейфовая скорость электронов в каналах полевых гетеротранзисторов в сильных электрических полях / В.Г. Мокеров, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев и др. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т.43. – Вып. 4. – С.478–482.

A53. Васильевский, И.С. Подвижность и дрейфовая скорость электронов в селективно-легированных гетероструктурах InAlAs/InGaAs/InAlAs / И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т.45. – Вып. 9. – С.1214–1218.

A54. Požela, K. Electron Transport in Modulation-Doped InAlAs/InGaAs/InAlAs heterostructures in high electric field / K. Požela, J. Požela, V. Jucienė, I.S. Vasil'evskii et al. // Acta Physica Polonica A. – 2011. – V.119. – №2. – P.170–172.

A55. Požela, K. Effects of phonon confinement on high-electric field electron transport in an InGaAs/InAlAs quantum well with an inserted InAs barrier / K. Požela, A. Šilėnas, J. Požela, V. Jucienė, G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov // Applied Physics A: Materials Science & Processing. – 2012. – V.12. – P.7039–7046.

A56. Васильевский, И.С. Взаимосвязь конструкции метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs с содержанием InAs в активном слое 76–100% с морфологией их поверхности и электрофизическими свойствами / И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов и др. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т.45. – Вып. 9. – С.1203–1208.

A57. Gudina, S. Quantum Hall effect and variable-range hopping conductivity in n-InGaAs/InAlAs heterostructures / S. Gudina, Y. Arapov, A. Savelyev, V. Neverov, S. Podgornykh, N. Shelushinina, M. Yakunin, I. Vasil'evskii et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – V.440. – P.10–12.