



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

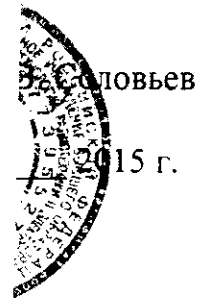
«Московский государственный университет  
информационных технологий, радиотехники и электроники»

**МИРЭА**

пр-т Вернадского, 78, Москва, 119454  
тел.: (495) 433 00 66, факс: (495) 434 92 87  
e-mail: mirea@mirea.ru, http://www.mirea.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе



### ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Ключкова Алексея Николаевича «Электронный спектр в модулированно-легированных гетероструктурах InGaAs/InAlAs на подложках GaAs и InP», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 «Физика полупроводников»

#### Актуальность темы

Интерес к электронным свойствам квантовых ям  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ , содержащих двумерный электронный газ наблюдается уже в течение нескольких десятилетий со времени открытия модулированного легирования. Благодаря одновременно высокой подвижности и плотности электронов такие структуры стали использоваться в качестве базового материала для полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов в приемных и передающих устройствах СВЧ электромагнитных волн. Современная тенденция к освоению терагерцового диапазона частот дала новый импульс к исследованиям гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ . Этому способствовал и прогресс технологии эпитаксиального роста, приведший к разработке новых типов гетероструктур с содержанием индия в слое InGaAs

до 70 % и более с составными квантовыми ямами, электронные свойства которых еще детально не изучены.

Работа Ключкова А.Н. посвящена экспериментальному исследованию электронных свойств модулированно-легированных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках InP, содержащих в квантовой яме нанометровые слои-вставки InAs и GaAs, а также метаморфных гетероструктур InGaAs/InAlAs на подложках GaAs. Значительное внимание в работе уделяется также вопросам моделирования зонной структуры и электронного спектра в квантовых ямах InGaAs/InAlAs. Выбранная тема исследований, безусловно, актуальна и относится к таким важным направлениям физики и технологии как разработка принципов управления электронным спектром полупроводниковых гетероструктур, развитие молекулярно-лучевой эпитаксии напряженных гетеросистем и методов послеростового контроля, совершенствование и оптимизация конструкции модулированно-легированных гетероструктур InGaAs/InAlAs для полевых транзисторов.

#### **Новые научные результаты диссертационной работы, полученные лично автором**

Важной, на наш взгляд, особенностью диссертации является одновременно эпитаксиальное получение и экспериментальное исследование гетероструктур в одной работе. Серии образцов были получены на одной установке при близких технологических условиях роста, что позволило автору установить влияние на электронные свойства гетероструктур InGaAs/InAlAs изменения состава и толщин некоторых эпитаксиальных слоев. Наиболее важные результаты состоят в следующем:

1. Впервые показано, что пик фотолюминесценции от квантовой ямы модулированно-легированных гетероструктур InGaAs/InAlAs смещается в сторону меньших энергий при введении в центр слоя InGaAs нанометровой вставки InAs и это смещение возрастает с увеличением толщины вставки 1.7 до 3.0 нм. В литературе наблюдалась на первый взгляд похожая особенность люминесценции от нелегированного слоя InAs, расположенного внутри объемной матрицы  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ . Нетривиальность результата, полученного Ключковым А.Н., обусловлена сложным потенциальным профилем исследуемой составной квантовой ямы, состоящей из слоев InAs,  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  и барьеров  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ , а также из-за легирования, приводящего к формированию двумерного электронного газа.

2. Впервые измерены спектры фотолюминесценции гетероструктур InGaAs/InAlAs, содержащих слои GaAs в квантовой яме. Этот результат позволил автору впервые теоретически предсказать инверсное расположение подзон легких и тяжелых дырок в квантовых ямах  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  со вставками GaAs.

3. Впервые проведено сравнение спектров фотолюминесценции метаморфных структур  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  на подложках GaAs, с различающимися профилями химического состава в метаморфном буфере (ступенчатым, линейным, содержащим сверхрешетки и инверсные ступени).

4. Впервые обнаружена линейная зависимость полуширины пика фотолюминесценции квантовой ямы  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  от слоевой концентрации электронов. Аналогичные зависимости были получены в литературе для псевдоморфных структур  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  с содержанием индия порядка 20 % в квантовой яме.

5. Экспериментально обнаружено сильное увеличение интенсивности и смещение в сторону меньших энергий полосы фотолюминесценции, происходящей от границы раздела подложки  $\text{InP}$  и буферного эпитаксиального слоя  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  при увеличении длительности и температуры отжига подложки  $\text{InP}$  в потоке молекул  $\text{As}_4$ .

В результате анализа содержания диссертации можно сделать вывод о том, что в ней на основании последовательного подхода получены новые, физически значимые результаты, которые в ряде случаев переходят в известные закономерности и результаты других авторов, чем подтверждается их достоверность и обоснованность.

#### **Практическая значимость работы и область применения**

Полученные результаты расширяют знания об электронном спектре и оптических свойствах модулированно-легированных гетероструктур  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$  и зависимость этих свойств от конструкции и технологических условий получения. Данные гетероструктуры широко применяются в качестве базового материала для быстродействующих полевых транзисторов. Представленные в работе результаты важны для решения технологических задач по разработке новых, а также оптимизации и улучшению существующих приборов на основе структур  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ .

Автором также предложен способ управления спектром дырок в наногетероструктурах  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  при помощи слоев-вставок  $\text{GaAs}$  и  $\text{InAs}$ . Метод может быть использован при разработке активной области гетероструктур для приборов, работа которых основана на межзонных и межподзонных электронных переходах в квантовых ямах, таких как светодиодов, лазерных диодов, фотодетекторов, квантово-каскадных лазеров, резонансно-теннельных приборов на основе системы материалов  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ .

Результаты, полученные в работе, могут быть практически использованы в организациях, занимающихся исследованием, разработкой и эпитаксиальным ростом гетероструктур  $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ , а также разрабатывающих приборы на основе данной гетеросистемы полупроводников. Среди них институты Российской академии наук ФТИ им. Иоффе, ФТИАН, ИФП СО РАН, исследовательские университеты МГУ им. М.В. Ломоносова, МИФИ, Академический университет, МИРЭА, а также организации АО "НИИПП", НПП "Пульсар", "Светлана-Рост" и другие.

#### **Общая оценка диссертационной работы**

Работа А.Н. Ключкова представляет собой достаточно обширное научное исследование электронного спектра в модулированно-

легированных гетероструктурах InGaAs/InAlAs, выращенных на различных подложках GaAs и InP. Тема диссертации соответствует специальности 01.04.10 – физика полупроводников. Полученные результаты обладают новизной и представляют несомненный практический интерес.

Все основные экспериментальные результаты были получены автором или при его непосредственном участии. Это касается как постановки научных задач, так и обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных.

Материалы диссертации достаточно полно отражены в 13 научных работах: 8 статьях в рецензируемых отечественных (7) и зарубежных (1) журналах, вошедших в Перечень, определенный ВАК, 5 работ в сборниках трудов всероссийских и международных конференций. Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях: 21-st, 22-nd International symposium “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 2013, 2014); XI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2013); XIX международный симпозиум “Нанопизика и нанозлектроника” (Нижний Новгород, 2015) и другие.

#### **Замечания к работе**

1. Автором недостаточно полно проведено сравнение экспериментальных особенностей спектров фотолюминесценции модулированно-легированных структур InGaAs/InAlAs и результатов моделирования зонной структуры. В частности, при построении зависимости полуширины пика фотолюминесценции квантовой ямы  $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$  от слоевой концентрации электронов не проводится сравнения с рассчитанными значениями энергий Ферми двумерного электронного газа. Также, кроме энергий межзонных переходов автор мог бы рассчитать вероятности переходов, что наиболее интересно для интерпретации спектров фотолюминесценции гетероструктур, содержащих нанометровые вставки GaAs и InAs в квантовой яме.

2. Автором обнаружено смещение полосы фотолюминесценции от границы раздела подложки InP и буфера  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  и зависимость ее интенсивности от длительности и температуры отжига подложки InP в потоке молекул  $\text{As}_4$ . На основании этого он делает вывод о механизме формирования переходного слоя на границе подложка InP - буфер  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ , который заключается в замещении атомов P подложки атомами As при отжиге. Между тем, автор не проводит анализа полученных снимков просвечивающей электронной микроскопии и зависимости толщины переходного слоя от температуры отжига. Поэтому полученные данные не позволяют сделать окончательный вывод о механизме формирования переходного слоя.

Указанные замечания не снижают нашей общей высокой оценки диссертационной работы.

## Выводы


Диссертация А.Н. Ключкова является законченной научно-квалификационной работой и содержит решение задач в области электронных свойств наногетероструктур InGaAs/InAlAs, имеющих важное значение для развития физики полупроводников. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Защищаемые автором научные результаты опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, докладывались на российских и международных конференциях.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Материал диссертации изложен логически выверено и доходчиво, используемые методы обоснованы, а результатам дана адекватная физическая интерпретация.

Таким образом, диссертация Ключкова А.Н. удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа и отзыв обсуждались на семинаре кафедры физики конденсированного состояния факультета электроники Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники 30 июня 2015 г., протокол №7. Отзыв подготовлен зав. лабораторией «Фемтосекундная оптика для нанотехнологий», д.ф.-м.н., профессором Мишиной Еленой Дмитриевной.

Зав. лабораторией «Фемтосекундная оптика для нанотехнологий» кафедры физики конденсированного состояния факультета электроники,  
д.ф.-м.н., профессор

 Е.Д. Мишина

Почтовый адрес: 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78.

Телефон: (495) 434-7665

Адрес электронной почты: [mishina\\_elena57@mail.ru](mailto:mishina_elena57@mail.ru).

Зав. кафедрой физики  
конденсированного состояния,  
академик РАН  
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.С. Сигов

Ученый секретарь  
канд. физ.-мат. наук



А.Н. Юрасов