



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)**



**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Москва, ГСП-1, 119991  
Телефон: 939-3160. Факс: 932-8820

Ученому секретарю  
диссертационного совета  
Д 002.231.01

на базе Института радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова  
д.ф.-м.н., доценту Кузнецовой И.Е.  
125009, Россия, Москва  
ул. Моховая, д. 11, корп. 7  
ИРЭ РАН

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_

## **ОТЗЫВ**

### **ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**к.ф.-м.н., доцента кафедры низких температур и сверхпроводимости  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова**

**Кыгина Владимира Геннадьевича**

**на диссертацию Клочкова Алексея Николаевича "Электронный спектр в  
модулированно-легированных гетероструктурах InGaAs/AlGaAs на  
подложках GaAs и InP", представленную к защите на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук по специальности**

**01.04.10-физика полупроводников**

Модулированно легированные гетероструктуры InGaAs/InAlAs служат основой электронных компонентов способных работать в диапазоне частот до сотен гигагерц. Столь высокое быстродействие достигается из-за высокой подвижности электронов, обусловленной малой эффективной массой и относительно слабым рассеянием. Уменьшение эффективной массы может быть достигнуто увеличением содержания индия в тройных соединениях. Однако, при этом увеличивается постоянная кристаллической решётки и релаксация напряжений в ней может приводить к образованию дефектов и уменьшению подвижности. Для предотвращения образования дефектов разрабатываются

различные методы. Целью работы Клочкова А.Н. являлось «установление влияния на электронный спектр и фотолюминесцентные свойства вариации геометрии и состава слоев модулированно-легированных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  на подложках GaAs и InP, в том числе влияния введения в квантовую яму нанометровых слоев InAs и GaAs и изменения профиля химического состава в метаморфном буфере». Вариация состава слоев и введение вставок в квантовую яму не только уменьшает напряжения в слоях, но и достаточно сложно влияет на энергетический спектр и подвижность носителей заряда. Изучение этого влияния важно для получения структур с максимальной концентраций и подвижностью электронов. Модулированно легированные гетероструктуры содержат квазидвумерные электроны и дырки. Существенную роль в них играют квантовые эффекты, изучение которых важно и с фундаментальной точки зрения. В связи с вышеизложенным диссертационная работа Клочкова А.Н. является актуальной.

Основным экспериментальным методом, использованным автором диссертации, была выбрана спектроскопия фотолюминесценции. Данный метод является бесконтактным, неразрушающим и широко используется для изучения электронных состояний валентной зоны и зоны проводимости в полупроводниковых структурах и материалах.

Для интерпретации спектров фотолюминесценции автор опирается на значительное количество литературных данных, большая часть которых представлена в главе 1 диссертации, а также на результаты проведённых им лично расчётов электронной структуры исследованных гетероструктур. Для расчётов энергетического спектра и волновых функций электронов и дырок автор диссертации использовал метод самосогласованного решения уравнений Шрёдингера и Пуассона в приближении огибающей волновой функции. Обменные и корреляционные эффекты в электрон-электронном взаимодействии учитывались в рамках метода функционала плотности в приближении локальной плотности. Такой метод расчёта широко применяется при расчётах полупроводниковых структур и даёт результаты, хорошо согласующиеся с

экспериментом. Результаты моделирования зонной структуры дали возможность обосновать определение энергии Ферми электронов по ширине максимумов фотолюминесценции и идентифицировать вклады от различных оптических переходов в спектры фотолюминесценции. Расчёты зонной структуры модулированно легированных гетероструктур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  ( $x = 0.53 - 0.7$ ,  $y = 0.4 - 0.52$ ) обосновывают вывод 1 диссертации о том, что квантовые состояния электронов в квантовой яме определяются в основном их концентрацией.

Для дальнейшего экспериментального исследования при участии автора методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены псевдоморфные структуры  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  с центральными вставками InAs и парными вставками InAs и GaAs на подложках из InP, а также метаморфные структуры  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с содержанием индия в КЯ  $x = 0.38$  и  $x = 0.7$ . Методика роста и характеризации структур подробно описана в главе 2 диссертаций. Результаты исследования выращенных структур методом просвечивающей электронной микроскопии показали их высокое структурное совершенство и дали возможность уточнить толщины слоёв в структурах. Представленные результаты изучения спектров фотолюминесценции структур со вставками InAs и GaAs и сопоставления их с данными расчётов электронной структуры обосновывает вывод 2 диссертации о зависимости энергии оптических переходов от толщины вставки из-за локализации волновых функций тяжёлых дырок в слое вставки. Представленный в диссертации анализ спектров люминесценции структур с двойными вставками InAs и GaAs последовательно обосновывает также вывод 3 диссертационной работы, а также предложенный автором «способ независимого управления состояниями (энергиями и ВФ) тяжёлых и легких дырок в КЯ  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  за счет создания потенциальных ям в валентной зоне для этих носителей напряженными вставками InAs (тяжелые дырки) и GaAs (легкие дырки)». Кроме этого, представленный в диссертационной работе анализ спектров фотолюминесценции обосновывает вывод 4 диссертации и, в частности,

заклучение о формировании потенциальной ямы в переходном слое InAlAsP и результат 5 диссертации о линейной зависимости ширины максимума фотолюминесценции от квантовой ямы от концентрации электронов и о возможности отслеживать изменения содержания In в КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  для широкого диапазона изменения  $x$ .

На основе сказанного выше результаты, полученные в диссертационной работе А.Н. Ключкова, являются новыми. Текст диссертации является хорошо структурированным. Литературные данные, методика экспериментов и расчётов, их результаты и анализ изложены последовательно в достаточном объёме. Положения диссертации, выносимые на защиту, и её выводы являются обоснованными. Достоверность результатов обусловлена многосторонностью проведенной работы с применением современных и надёжных методов получения гетероструктур (молекулярно-лучевая эпитаксия), определения параметров гетероструктур (изучение эффекта Холла, магнетосопротивления и спектров фотолюминесценции, электронная микроскопия) и расчетов зонной структуры.

Вместе с тем диссертационная работа не свободна от отдельных недостатков. Во-первых, в работе используется затрудняющее понимание выражения типа «повышение параметров электронного транспорта». Во-вторых, на рис. 3.12 не указана концентрация доноров, а рис. 4.14-4.16, температура, при которой проводились измерения. Кроме этого хотелось бы высказать ряд пожеланий. Во-первых энергетический спектр двумерных структур можно эффективно исследовать, изучая эффект Шубникова — де Гааза. Поэтому полученные значения концентраций электронов в двумерных подзонах было бы полезно сравнить с периодами осцилляций магнетосопротивления. Во-вторых, толщина вставок InAs и GaAs в структурах, описанных в главе 4 лишь в несколько раз превышает толщину постоянной решётки. Поэтому полезно было бы сравнить результаты расчёта подобных структур из первых принципов с расчётами в приближении огибающей волновой функции.

Изложенные замечания и пожелания носят частный характер и не снижают значимости диссертационной работы Ключкова А.Н. Задачи диссертации соответствуют поставленной цели и служат её достижению. Результаты и выводы диссертации достаточно полно изложены в автореферате и в публикациях автора, список которых приведён в диссертации и автореферате. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для улучшения характеристик гетероструктур с квантовыми ямами и электронных компонентов на их основе. При этом результаты диссертации имеют как практическое, так и научное значение. Считаю, что диссертационная работа Ключкова А.Н. соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней согласно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№ 842, от 24 сентября 2013 г.), а её автор Ключков А.Н. заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников.

Официальный оппонент, доцент

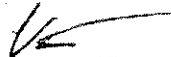
кафедры физики низких температур

и сверхпроводимости физического

факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,

к.ф.-м.н.

7.09.2015



Кытин Владимир Геннадьевич

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2,

тел.: +7(495) 939 11 47, e-mail: [kytin@mig.phys.msu.ru](mailto:kytin@mig.phys.msu.ru)

Подпись В.Г. Кытина заверяю:

Декан физического факультета

МГУ им. М.В. Ломоносова,

д.ф.-м.н., профессор



Н.Н. Сысоев