

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Капаева Владимира Васильевича  
на диссертацию Ключкова Алексея Николаевича «Электронный спектр в модулированно-  
легированных гетероструктурах InGaAs/InAlAs на подложках GaAs и InP»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

### Актуальность.

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ-транзисторы) являются перспективными для использования в современной СВЧ электронике. С целью расширения частотного диапазона работы устройств в последние годы активно используются гетероструктуры InGaAs/InAlAs с содержанием индия в активной области более 50% и ведутся разработки НЕМТ транзисторов и устройств на их основе, способных усиливать сигналы в субмиллиметровом диапазоне длин волн.

Одним из методов улучшения характеристик транзисторов является использование структур с составными квантовыми ямами, состоящими из нескольких слоев разного состава. В этой связи диссертационная работа Ключкова Алексея Николаевича, посвященная исследованиям электронных свойств модулированно-легированных гетероструктур InGaAs/InAlAs при модификации потенциального профиля квантовой ямы InGaAs введением нанометровых вставок InAs и GaAs, а также при изменении профиля химического состава в метаморфном буфере, является актуальной. Основное внимание в работе уделяется измерениям спектров фотолюминесценции полученных гетероструктур и интерпретации результатов на основе моделирования энергетического спектра электронов и дырок.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору работ, представленных в научной периодике. Проведенный анализ позволил оценить состояние разработок в области наногетероструктур InGaAs/InAlAs и уровень знаний в области их фотолюминесцентных свойств, обозначить основные проблемы.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальных и теоретических методов, применяемых в работе: методике молекулярно-лучевой эпитаксии и способов ростовых калибровок, измерительных стендов, методики моделирования электронных состояний в гетероструктурах.

В третьей главе диссертации выполнено моделирование зонной структуры односторонне-легированных квантовых ям InGaAs/InAlAs при вариации толщин и состава слоев структуры. Показано, что энергии межзонных оптических переходов в таких системах в основном определяются тремя параметрами: толщиной, составом слоя InGaAs и концентрацией двумерного электронного газа.

Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию влияния введения в квантовую яму InGaAs/InAlAs нанометровых вставок InAs и GaAs на электронный спектр. Наблюден монотонный сдвиг положения максимума

сигнала фотолюминесценции при увеличении толщины центральной вставки InAs от 1,7 до 3,0 нм. Интенсивность соответствующего оптического перехода и подвижность электронов в КЯ немонотонно зависят от  $L_{\text{InAs}}$ , при  $L_{\text{InAs}} = 2,1$  нм наблюдается максимум обеих величин. Предсказана возможность получения инверсного положения подзон легких и тяжелых дырок в квантовых ямах  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$ , содержащих вставки GaAs.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию особенностей спектров фотолюминесценции метаморфных структур InGaAs/InGaAs с содержанием индия в активной области  $x = 0,4$  и  $0,7$ , выращенных на подложках GaAs. Обнаружена линейная зависимость ширины 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 концентрации электронов. Подобная зависимость ранее наблюдалась для других модулированно-легированных гетероструктур: псевдоморфных AlGaAs/InGaAs/GaAs на подложках GaAs, и изоморфных  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$  на подложках InP, но для структур InGaAs/InAlAs с содержанием индия более 50% получена впервые.

#### Новизна и достоверность.

В работе получен ряд новых результатов. Отметим лишь некоторые из них, по нашему мнению наиболее интересные и значимые.

Экспериментально показано, что интенсивность сигнала люминесценции для структур со вставкой InAs в центре квантовой ямы  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$  коррелирует с подвижностью носителей в канале. Обе эти величины имеют максимум при ширине вставки  $\sim 2$  нм.

Теоретически предсказано инверсное расположение подзон легких и тяжелых дырок в квантовых ямах  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ , содержащих вставки GaAs.

Экспериментально получена линейная связь полуширины пика люминесценции от структур  $\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}/\text{In}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$  и концентрации электронов в канале.

Надежность и достоверность результатов обусловлена комплексностью проведенных исследований с использованием современного оборудования и методик. В диссертации широко используются современные методы контроля параметров гетероструктур: холловские измерения концентрации и подвижности электронов, просвечивающая электронная микроскопия для контроля толщин слоев. Основным экспериментальным методом в работе является метод фотолюминесценции. Для интерпретации результатов измерений использованы методы численного моделирования электронного спектра гетероструктур.

Результаты многократно обсуждались на отечественных и международных конференциях, полно отражены публикациями автора в ведущих научных изданиях.

#### Научная и практическая значимость

Результаты исследований модулированно-легированных гетероструктур InGaAs/InAlAs, проведенных диссертантом, расширяют знания об электронном спектре и

оптических свойствах составных квантовых ям на основе гетеросистемы InGaAs/InAlAs и об изменении этих свойств при изменении конструкции буферных слоев и технологических условий их получения. Представленные в работе результаты важны для решения технологических задач по разработке новых, а также оптимизации и улучшению существующих приборов на основе структур InGaAs/InAlAs.

#### Рекомендации по использованию результатов.

Построенные на основе расчета энергий межзонных оптических переходов в гетероструктур InGaAs/InAlAs номограммы могут быть использованы для экспресс-контроля НЕМТ гетероструктур. Предложенный способ управления спектром и областью локализации дырок в наногетероструктурах с ямой  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  при помощи слоев-вставок GaAs и InAs может быть использован при разработке активной области гетероструктур для светодиодов, лазерных диодов, фотодетекторов, резонансно-туннельных приборов на основе InGaAs/InAlAs.

#### Замечания.

Диссертационная работа, однако, не свободна от недостатков.

1. В формулировках научной новизны и в первом из положений, выносимых на защиту, содержатся очевидные формулировки типа "установлено влияние ведения вставок на положение и форму спектров люминесценции", в положении 3 сказано, что изменение оптических свойств обусловлено влиянием вставок только на состояния дырок, что, вообще говоря, не всегда верно.

2. В 3.1 обсуждают возможное заполнение электронами ямы, формируемой в области дельта-слоя и совсем игнорируется возможное заполнение ямы на гетерогранице контактный слой - барьерный слой, хотя в целом ряде представленных кривых  $E_c(z)$  ее дно лежит ниже уровня Ферми.

3. На стр.70 содержится утверждение, что при нулевой плотности электронов потенциал в квантовой яме является прямоугольным. Это требует пояснений, поскольку в общем случае для ям расположенных вблизи поверхности это не так из-за наличия поверхностного барьера Шоттки. В этом случае распределение потенциала у поверхности сильно зависит от свойств нижнего барьера (от типа и концентрации легирующей примеси).

4. При исследовании влияния вставок в центре ямы естественно сравнивать результаты для структуры без вставок, но такой образец изготовлен не был. Вывод о наличии оптимума по ширине вставки не слишком обоснован, в силу отсутствия статистики (только 4 образца). В работе были проведены измерения реальных толщин, тем не менее, расчеты проводятся не для измеренных, а для номинальных значений.

5. Рассматриваемые типы структуры в общем родственны. При переходе от одной к другой параметры общих слоев изменяются (ширины контактного, барьерного слоев,

спейсера, концентрация примеси), но отсутствует какая-либо мотивировка выбора значений этих параметров.

6. Общее замечание. Рассматриваемые структуры являются основой транзисторов. В этой связи представляется интересным проследить за изменением характеристик при изменении напряжения на затворе. В частности при такой постановке можно проследить за изменением полуширины линии люминесценции от концентрации носителей в канале. Автор же ограничился случаем нулевого напряжения на затворе.

Отмеченные недостатки не умаляют значимости полученных диссертантом результатов.

### Заключение

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются научно обоснованными и новыми. Результаты диссертации достаточно полно представлены в научной периодике и апробированы на конференциях.

Автореферат и опубликованные автором работы полностью отражают содержание диссертации, которая полностью соответствует специальности 01.04.10 – физика полупроводников. Диссертация Ключкова А.Н. является законченным исследованием, в котором решены важные задачи, связанные с электронными свойствами гетероструктур InGaAs/InAlAs, имеющей значение для развития физики полупроводников. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Ключков Алексей Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук  
главный научный сотрудник

Подпись В.В. Капаева  
И.о. ученого секретаря ФИАН



  
В.В. Капаев

  
Н.П. Топчиев

### Информация об официальном оппоненте

ФИО: Капаев Владимир Васильевич

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

Почтовый адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

Телефон: +7(499) 783-36-92

Адрес электронной почты: kapaev@sci.lebedev.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

Должность: главный научный сотрудник Теоретического сектора Отделения физики твердого тела