

*На правах рукописи*

Абрамкин Демид Суад

**Энергетический спектр гетероструктур GaAs/GaP и GaSb/GaP**

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Шамирзаев Тимур Сезгирович, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Овчинников Сергей Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора.

Гриняев Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики.

Ведущая организация:

ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Защита состоится « 12 » марта 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 201 \_\_\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,

Погосов Артур Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Появление низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) не только открыло возможности для создания новых полупроводниковых приборов, но и позволило проводить исследования новых физических явлений фундаментального характера. К настоящему времени, наиболее исследованными гетероструктурами являются прямозонные GaAs/AlGaAs КЯ и (In,Ga)As/GaAs КТ первого рода (оба типа носителей заряда локализованы внутри КЯ и КТ), а так же непрямозонные GaAs/AlAs КЯ и Ge(Si)/Si КТ второго рода (электроны и дырки разделены в реальном пространстве). Недавние теоретические расчеты обратили внимание исследователей на еще один, до сих пор экспериментально не исследовавшийся, тип полупроводниковых гетероструктур – КЯ и КТ первого рода с непрямой запрещенной зоной [1,2]. Гетероструктуры с таким типом энергетического спектра могут быть удобными объектами для анализа физических процессов, изучение которых в других типах полупроводниковых гетероструктур затруднено. Характерным примером такого процесса является спиновая релаксация экситонов в КТ. Сильная локализация в КТ приводит к подавлению механизмов, определяющих перевертот спина свободно двигающихся экситонов, таких как механизмы Эллиота-Яфета и Дьяконова–Переля, смещая характерные времена спиновой релаксации экситонов в миллисекундный диапазон времен. В прямозонных КТ времена релаксации спиновых состояний экситонов становятся на несколько порядков величины больше лежащих в наносекундном диапазоне времен жизни экситона. В тоже время, требования закона сохранения квазиимпульса приводит к увеличению времени жизни экситона в КТ первого рода с непрямой запрещённой зоной [3] делая эти объекты перспективными для экспериментального изучения процессов спиновой релаксации экситонов в нульмерных системах.

В соответствии с теоретическими расчетами гетероструктуры с КТ первого рода с непрямой запрещённой зоной могут быть сформированы на основе соединений АЗ-В5: GaAs и GaSb в матрице GaP [1,2]. Между тем, строение и энергетический спектр гетероструктур с КЯ и самоорганизованными КТ, сформированных в гетеросистемах GaAs/GaP и GaSb/GaP, до сих пор экспериментально не изучались.

**Целью работы** заключается в исследовании энергетического спектра гетероструктур GaAs/GaP и GaSb/GaP с КЯ и самоорганизованными КТ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение строения гетероструктур с самоорганизованными КТ GaAs/GaP и GaSb/GaP: формы, размеров, механических напряжений и состава квантовых точек, и структуры лежащего в основании массива квантовых точек смачивающего слоя (СС), являющегося КЯ.
2. Определение энергетического спектра GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ и СС с учётом особенностей их строения.

**Научная новизна работы.** Все основные экспериментальные и расчетные результаты диссертационной работы получены впервые. Научная новизна конкретных результатов состоит в следующем:

1. Показано, что псевдоморфно напряжённые GaAsP/GaP и GaSbP/GaP КТ и GaAs/GaP КЯ имеют энергетический спектр второго рода с непрямой запрещённой зоной и основным электронным состоянием, принадлежащим  $X$  долине зоны проводимости GaP, псевдоморфно напряжённые GaSbP/GaP КЯ имеют энергетический спектр первого рода с непрямой запрещённой зоной и основным электронным состоянием, принадлежащим  $X_{\text{ХУ}}$  долине зоны проводимости GaSbP, вне зависимости от состава твёрдого раствора, из которого состоят КТ и КЯ.
2. Показано, что релаксация механических напряжений в GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ идёт за счёт введения сетки ломеровских дислокаций в плоскости гетерограницы квантовая точка - матрица. Показано, что релаксация механических напряжений не приводит к увеличению темпа безызлучательной рекомбинации экситонов в гетероструктурах GaAs/GaP и GaSb/GaP с КТ.
3. Установлено, что энергетический спектр КТ первого рода, сформированных из ненапряженных GaAs и GaSb в матрице GaP, существенно зависит от высоты КТ. Основное электронное состояние КТ с высотой меньше 3 нм принадлежит  $L$  долине зоны проводимости. В КТ большего размера основное электронное состояние принадлежит  $\Gamma$  долине зоны проводимости.

### **Практическая значимость**

1. Высокая эффективность излучательной рекомбинации, демонстрируемая гетероструктурами Ga(As,P)/GaP и Ga(Sb,P)/GaP с КЯ и КТ, указывает на возможность применения этих гетероструктур для создания светоизлучающих приборов.
2. Разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов в КТ GaAs/GaP и GaSb/GaP первого рода с полной релаксацией механических напряжений приводит к увеличению

времени жизни экситонов вплоть до времён, сравнимых с временами релаксации спиновой ориентации экситонов - порядка сотен микросекунд. Возможность создания долгоживущих спиновых состояний экситонов в данных КТ делает их перспективными для приложений спинтроники.

#### **Защищаемые положения.**

1. В зависимости от размеров КТ, основное электронное состояние полностью релаксированных GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ с энергетическим спектром первого рода может лежать как в  $L$ , так и в  $\Gamma$  долине зоны проводимости.
2. Псевдоморфно напряжённые GaAs/GaP КЯ имеют энергетический спектр второго рода с непрямой запрещённой зоной и основным электронным состоянием, принадлежащим  $X$  долине GaP.
3. Псевдоморфно напряжённые GaSbP/GaP КЯ имеют энергетический спектр первого рода с непрямой запрещённой зоной и основным электронным состоянием, принадлежащим  $X_{\text{XY}}$  долине зоны проводимости GaSbP, вне зависимости от состава твёрдого раствора КЯ.
4. Псевдоморфно напряжённые КТ GaAsP/GaP и GaSbP/GaP имеют энергетический спектр второго рода с непрямой запрещённой зоной и основным электронным состоянием, принадлежащим  $X_Z$  долине зоны проводимости GaP, вне зависимости от состава твёрдого раствора КТ.

**Достоверность** и надёжность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается тщательной проработкой инженерно-технического оснащения экспериментов, проведением тестовых измерений, проверкой экспериментов на воспроизводимость, сопоставлением с результатами других авторов.

#### **Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на:

1. XII Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике ЛЛФ-2010 (Хужир, Россия, 26-31 июля 2010);
2. XIX Международном симпозиуме «Наноструктуры – физика и технология» (Екатеринбург, Россия, 20-25 июня 2011);
3. Российской конференции и школе по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники «Фотоника-2011» (Новосибирск, Россия, 22-26 августа 2011);
4. Азиатской школе-конференции по физике и технологии наноструктурированных материалов «ASCO-Nanomat-2011» (Владивосток, Россия, 22-27 августа 2011);

5. XIII Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, Россия, 21-25 ноября 2011);
6. XVI Международном симпозиуме «Нанозифика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Россия, 12-16 марта 2012);
7. XIII Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике ЛЛФ-2012 (Бухта «Песчаная», Россия, 16-22 июля 2012).

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в подготовке и проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных. Написание статей проводилось автором совместно с научным руководителем Т. С. Шамирзаевым.

**Публикации.** Материалы диссертации с требуемой полнотой изложены в 12 научных публикациях, среди которых 4 статьи в рецензируемых научных журналах (2 – в отечественных), 8 работ в материалах международных и российских конференций. В том числе, 4 работы опубликовано в научных журналах, входящих в список Высшей аттестационной комиссии для опубликования материалов диссертаций.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа содержит 134 страниц, в том числе 30 рисунков и список литературы, включающий 117 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость результатов работы, перечислены научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. Обсуждается энергетический спектр полупроводниковых гетероструктур. Приводится обзор работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию гетероструктур, сформированных на основе бинарных полупроводниковых соединений А3-В5: GaAs/GaP и GaSb/GaP. В соответствии с недавними теоретическими расчетами гетероструктуры, сформированные на основе GaAs/GaP и GaSb/GaP могут иметь новый, не изучавшийся ранее энергетический спектр - первого рода с непрямой запрещённой зоной. Однако экспериментальные исследования таких гетероструктур были направлены на изучение сверхрешёток GaAs/GaP, а также процессов формирования GaAs и GaSb

самоорганизованных островков на поверхности GaP. В то время как, строение и энергетический спектр КТ и одиночных КЯ – захороненных в матрице GaP наноструктур и тонких слоев GaAs и GaSb - экспериментально не изучались.

**Вторая глава** посвящена методическим вопросам исследования. Объектом исследования являются полупроводниковые гетероструктуры GaAs/GaP и GaSb/GaP, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках ориентации (001). Описаны условия синтеза гетероструктур. Обсуждаются методы анализа строения гетероструктур с КТ. Описываются: (1) методика определения степени релаксации механических напряжений в КТ по периоду муара на планарных изображениях гетероструктур, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и (2) методика определения состава твердого раствора опирающаяся на анализ спектров комбинационного рассеяния света (КРС). Приводится методика определения рода энергетического спектра гетероструктур, основанная на измерении интенсивностной зависимости положения полосы в спектрах фотолуминесценции (ФЛ) гетероструктур, предложенная в работе Леденцова с соавторами [4,5]. В гетероструктурах второго рода полоса ФЛ демонстрирует смещение в высокоэнергетическую область спектра, пропорциональное корню кубическому от плотности мощности возбуждения ( $P_{ex}$ ). В то время как в гетероструктурах с энергетическим спектром первого рода при сравнимых значениях  $P_{ex}$ , положение полосы экситонной ФЛ не зависит от  $P_{ex}$ . Описаны экспериментальные установки для измерения стационарной и время-разрешённой ФЛ. Обосновываются условия измерений спектров ФЛ гетероструктур GaAs/GaP, при которых возможно однозначное разделение полос ФЛ, связанных с рекомбинацией носителей заряда в подложке GaP и рекомбинацией экситонов в GaAs КЯ и КТ. Описаны методы расчёта энергетического спектра гетероструктур.

**В третьей главе** описаны результаты экспериментального исследования строения гетероструктур, сформированных на основе GaAs/GaP и GaSb/GaP. **В параграфе 3.1** описывается влияние температуры эпитаксии ( $T_S$ ) на строение гетероструктур, полученных при осаждении на GaP поверхность GaAs слоя с толщиной, эквивалентной 3-м монослоям вещества. Анализ реконструкции ростовой поверхности методом дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) позволил показать, что при температуре  $T_S = 420 \pm 10^0 \text{C}$  имеет место двухмерно-слоевой рост GaAs на GaP, а повышение температуры до  $550^0 \text{C} - 600^0 \text{C}$  приводит к формированию на поверхности GaP трехмерных самоорганизованных островков. При температуре  $550 \pm 10^0 \text{C}$  для формирования островков достаточно 2-х монослоёв GaAs, а при повышении температуры до  $600 \pm 10^0 \text{C}$ , количество высаженного материала, необходимого для формирования островков увеличивается до 3-х монослоёв. На полученных методом ПЭМ планарных изображениях гетероструктур (см. рис.1) в хорошем соответствии с полученными методом ДБЭО данными

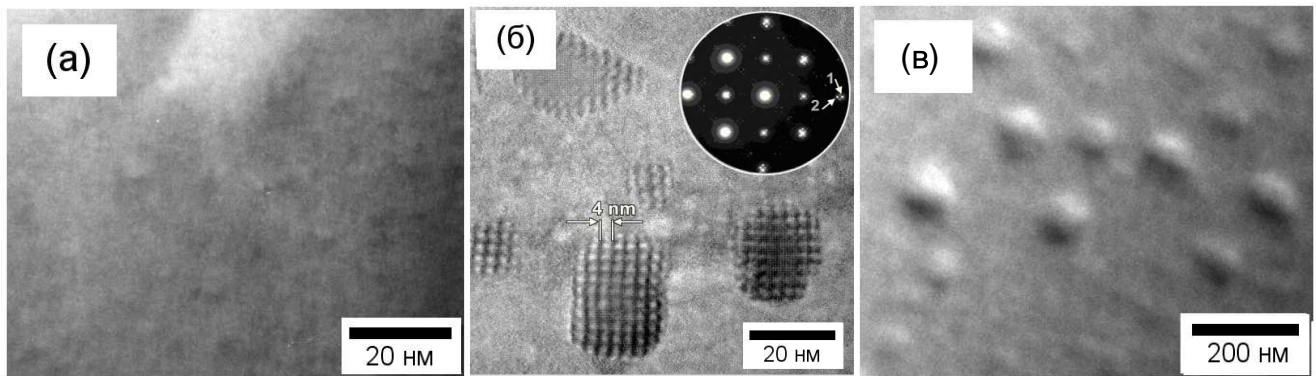


Рис.1. Планарные (100) изображения GaAs/GaP гетероструктур, выращенных при температуре  $T_S$  (а)  $420^\circ\text{C}$ , (б)  $550^\circ\text{C}$  и (в)  $600^\circ\text{C}$ , полученные методом ПЭМ.

видно, что при  $T_S = 420 \pm 10^\circ\text{C}$  GaAs растёт на GaP поверхности в двумерно-слоевом режиме, а при температурах  $550\text{--}600^\circ\text{C}$  происходит переход к росту трёхмерных самоорганизованных островков. С повышением температуры от  $550 \pm 10^\circ\text{C}$  до  $600 \pm 10^\circ\text{C}$  средний латеральный размер островка возрастает от 20 нм до 92 нм, а дисперсия латеральных размеров и плотность уменьшается, соответственно, от 70% до 45% среднего размера и от  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Планарное ПЭМ изображение КТ в гетероструктуре, выращенной при  $T_S = 550 \pm 10^\circ\text{C}$  характеризуется муаром с периодом 4 нм. Анализ периода муара показал, что материал КТ имеет постоянную решётки 0.564 нм, равную постоянной решётки ненапряжённого GaAs. Таким образом, КТ в этой гетероструктуре состоят из GaAs, а механические напряжения в них полностью релаксировали. В тоже время, КТ в гетероструктуре выращенной при  $T_S = 600 \pm 10^\circ\text{C}$  псевдоморфно напряжены, что это следует из отсутствия муара на планарном ПЭМ изображении. Энергетическое положение полосы, обусловленной рассеянием на GaAs-подобном LO фоне в спектре КРС гетероструктуры, выращенной при  $T_S = 600 \pm 10^\circ\text{C}$ , соответствует КТ, состоящим из твёрдого раствора  $\text{GaAs}_{0.68 \pm 0.05}\text{P}_{0.32 \pm 0.05}$ .

Температурная зависимость строения Ga(As,P)/GaP гетероструктур, полученных при осаждении на подложку GaP 3-х мономеров GaAs, описывается следующей качественной моделью: Формирование островков возможно только по достижению некоторого критического значения упругой энергии, запасённой в растущем слое. Величина упругой энергии определяется рассогласованием параметров решёток осаждаемого материала и материала подложки, а также толщиной растущего напряжённого слоя, т.е., количеством адатомов, которые могут собраться в данном месте ростовой поверхности. Формирование островка начинается при достижении напряжённым слоем некоторой критической толщины. Количество адатомов собирающихся в данном месте ростовой поверхности зависит от длины их поверхностной диффузии ( $L_D$ ), которая возрастает с увеличением температуры эпитаксии [6]. При низкой  $T_S$  ( $420^\circ\text{C}$ )  $L_D$  мала, поэтому



осаждения 3 монослоев GaAs недостаточно для формирования КТ и наблюдается двухмерно-слоевой рост GaAs. Увеличение  $L_D$  при повышении  $T_S$  способствует уменьшению количества материала, необходимого для формирования островков, поэтому при  $T_S = 550 \pm 10^0 \text{C}$  островки формируются уже при осаждении 2-х монослоёв GaAs. Дальнейшее осаждение GaAs при этой температуре ведёт к увеличению размера островков и росту напряжений в них [6]. По достижению критического уровня напряжения релаксируют за счет образования дислокаций несоответствия [7]. КТ, сформированные при  $T_S \leq 550^0 \text{C}$  состоят из GaAs. Однако дальнейшее повышение температуры приводит не только к росту  $L_D$  (о чем свидетельствует возрастание латерального размера и снижение плотности островков), но и к перемешиванию материала матрицы и GaAs. В результате, островки, полученные при высокой температуре  $T_S = 600 \pm 10^0 \text{C}$ , состоят из твёрдого раствора GaAsP. Перемешивание материалов ведёт к уменьшению рассогласования параметров решётки материалов КТ и матрицы, поэтому количество осаждённого GaAs, необходимое для начала формирования островков, возрастает до 3-х монослоёв [8]. В то же время перемешивание уменьшает механические напряжения в КТ до значений, лежащих ниже порога введения дислокаций несоответствия, приводя к формированию псевдоморфно напряжённых КТ.

**Параграф 3.2** посвящен изучению строения гетероструктур, сформированных методом МЛЭ в системе GaSb/GaP. Из полученных методом ПЭМ планарных изображений и поперечных сечений выращенных гетероструктур видно, что, осаждение на GaP подложку ориентации (001) слоя GaSb с толщиной, эквивалентной 1÷2-м монослоям вещества при  $T_S$  в диапазоне 420÷470<sup>0</sup>C приводит к формированию самоорганизованных островков. Анализ микроскопических изображений показывает, что, несмотря на значительное рассогласование параметров решеток GaSb и GaP (10.5% [9]), в гетероструктурах GaSb/GaP формируются массивы псевдоморфно напряженных КТ с характерными латеральными размерами ~80÷100 нм и плотностью  $< 10^8 \text{ см}^{-2}$ , в основании которых лежит смачивающий слой. Отсутствие дислокаций несоответствия для КТ в гетеросистеме с большим рассогласованием постоянных решетки свидетельствуют о том, что механические напряжения в КТ ниже порога введения дислокаций. Т.е. КТ состоят из твердого раствора  $\text{GaSb}_{1-x}\text{P}_x$  из-за перемешивания GaSb и GaP. Сдвиг полосы ФЛ в высокоэнергетическую область спектра в гетероструктурах с КТ, выращенных при более высокой температуре (см. рис. 7), при близких размерах КТ указывает на увеличение доли GaP в составе твердого раствора. Связь между атомами Ga и P значительно сильнее, чем между атомами Ga и Sb [10], поэтому в гетеросистеме GaSb/GaP объёмный механизм перемешивания материалов подавлен и основным механизмом перемешивания является поверхностная диффузия. Для ограничения поверхностной диффузии адатомов была приготовлена ростовая поверхность GaP с развитым рельефом. Поверхность, с характерным латеральным размером террас, ограничивающих поверхностную

диффузию адатомов,  $\sim 100$  нм, получалась при выращивании методом МЛЭ слоя GaP толщиной 1.25 мкм на несогласованной подложке GaAs (001). Осаждение слоя GaSb с толщиной, эквивалентной 1-му монослою вещества при  $T_S = 450 \pm 10^0$  C на ростовую поверхность GaP с развитым рельефом приводило к формированию массива КТ с плотностью  $\sim 2 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> (более, чем на порядок величины превышающей плотность КТ, полученных в тех же условиях на гладкой поверхности GaP) и характерными размерами  $\sim 15 \div 60$  нм. Планарное ПЭМ изображение КТ характеризуется муаром с периодом 1.9 нм, соответствующим постоянной решётки 0.609 нм (равной постоянной решётки ненапряжённого GaSb). Следовательно, сформированные на ростовой поверхности GaP с развитым рельефом, КТ состоят из GaSb, а механические напряжения в них полностью релаксировали. Таким образом, ограничение поверхностной диффузией адатомов действительно подавляет перемешивание GaSb и GaP.

**В параграфе 3.3** обсуждаются механизм релаксации механических напряжений в КТ GaSb/GaP и GaAs/GaP. Релаксация механических напряжений в гетероструктурах с КТ происходит за счет введения дислокаций несоответствия (прорастающих и/или краевых) [11]. Анализ темнопольных ПЭМ-изображений структур с релаксированными GaSb/GaP КТ показал, что релаксация механических напряжений произошла за счёт введения сетки краевых ломеровских дислокаций, залегающих в направлениях  $[01\bar{1}]$  и  $[011]$  в плоскости гетерограницы КТ/матрица [11]. Вычисленная по периоду следования дислокаций пластическая деформация равна 0.1055 и практически совпадает с величиной рассогласования GaSb и GaP по параметру решётки [9]. Следовательно, механические напряжения полностью релаксировали за счёт введения сетки ломеровских дислокаций. В GaAs/GaP КТ полная релаксация механических напряжений идет по тому же механизму.

Считается, что ввод дислокаций несоответствия, сопровождающий релаксацию механических напряжений в КТ, приводит к сильному возрастанию темпа безызлучательной рекомбинации в КТ [12]. Однако интегральные интенсивности стационарной ФЛ гетероструктур с КТ GaAs/GaP и GaSb/GaP, механические напряжения в которых полностью релаксировали за счет введения сетки дислокаций, и не содержащих дислокаций тестовых GaP/GaP структур близки, т.е. ввод дислокаций при релаксации напряжений не привёл к значительному возрастанию темпа безызлучательной рекомбинации. Это может быть связано с тем, что ядро ломеровской дислокации (как это было показано для Si, Ge и соединений АЗ-В5 со структурой сфалерита [13]) не содержит «оборванных» атомных связей, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации.

**В четвёртой главе** представлены результаты анализа энергетического спектра гетероструктур Ga(As,P)/GaP и Ga(Sb,P)/GaP. Определению энергетического спектра GaAs/GaP и

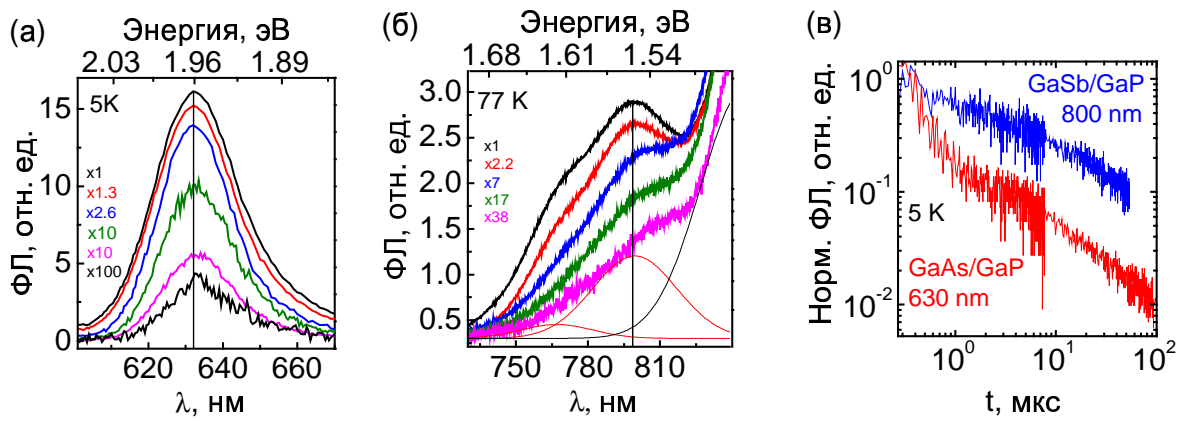


Рис.2. Спектры стационарной ФЛ гетероструктур с КТ с полной релаксацией механических напряжений, измеренные при различных плотностях мощности возбуждения: (а) GaAs/GaP КТ,  $P_{ex}$  снизу вверх 0.17÷25 Вт/см<sup>2</sup>; (б) GaSb/GaP КТ,  $P_{ex}$  снизу вверх 0.45÷30 Вт/см<sup>2</sup>; (в) Кинетика затухания ФЛ гетероструктур с GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ, измеренная на длинах волн, соответствующих максимуму полос ФЛ.

GaSb/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений посвящен **параграф 4.1**. Для определения рода энергетического спектра КТ использовалось описанная во второй главе методика измерения интенсивностной зависимости положения максимума полосы экситонной ФЛ. Спектры стационарной ФЛ гетероструктур с КТ GaAs/GaP и GaSb/GaP, измеренные при различных плотностях мощности возбуждения, приведены на рис. 2 (а) и (б), соответственно.

Положения полос в спектрах ФЛ практически не изменяется при повышении плотности мощности возбуждения на 2 порядка величины, что свидетельствует о первом роде энергетического спектра КТ. Несмотря на первый род энергетического спектра полностью релаксированные GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ демонстрируют длительную кинетику ФЛ, как видно

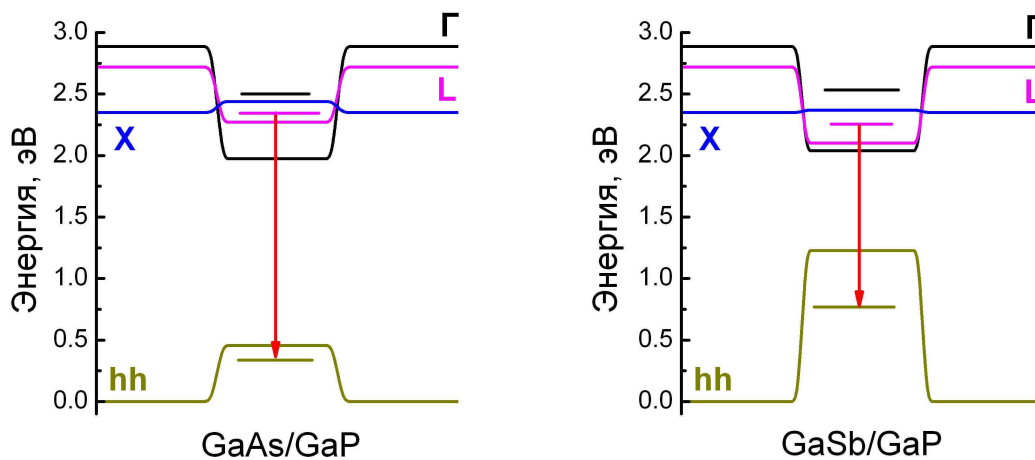


Рис. 3. Результаты расчёта зонных диаграмм гетероструктур GaAs/GaP и GaSb/GaP с полной релаксацией механических напряжений. Стрелкой отмечены состояния, участвующие в излучательных переходах.

на рис. 2 (в). ФЛ наблюдается даже спустя время порядка 100 мкс после импульса возбуждения, что значительно дольше, чем время жизни экситона в прямозонных гетероструктурах первого рода (таких как (In,Ga)As/GaAs), которое составляет порядка 1 нс [14]. Таким образом, носители заряда, из которых образованы экситоны в релаксированных КТ GaAs/GaP и GaSb/GaP первого рода, разделены в пространстве квазиимпульсов. Действительно, квазиимпульс такого экситона, существенно больше, чем импульс фотона с равной энергией, поэтому закон сохранения квазиимпульса накладывает ограничения на скорость их излучательной рекомбинации. Таким образом, КТ GaAs/GaP и GaSb/GaP с полной релаксацией механических напряжений имеют энергетический спектр первого рода с непрямой запрещенной зоной. Дырка в этих КТ, находится в  $\Gamma$  долине валентной зоны, а электрон может находиться как в  $X$ , так и в  $L$  долине зоны проводимости.

Для выяснения, того, какой боковой долине зоны проводимости принадлежит основное электронное в GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений, были проведены расчёты энергетического спектра таких КТ. Результаты расчётов представлены на рис. 3. Энергетическая структура первого рода в таких КТ может реализоваться в случае, если основное электронное состояние будет принадлежать, либо  $\Gamma$  долине, либо  $L$  долине зоны проводимости GaAs и GaSb, соответственно. Следовательно, основное электронное состояние полученных полностью релаксированных GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ принадлежит  $L$  долине зоны проводимости. Как видно из рисунка 3, смещение уровней размерного квантования вследствие изменения размеров КТ может привести к тому, что основным электронным состоянием КТ станет  $\Gamma$  состояние. Расчёты показывают, что КТ с высотой больше 3 нм, имеют прямую запрещённую

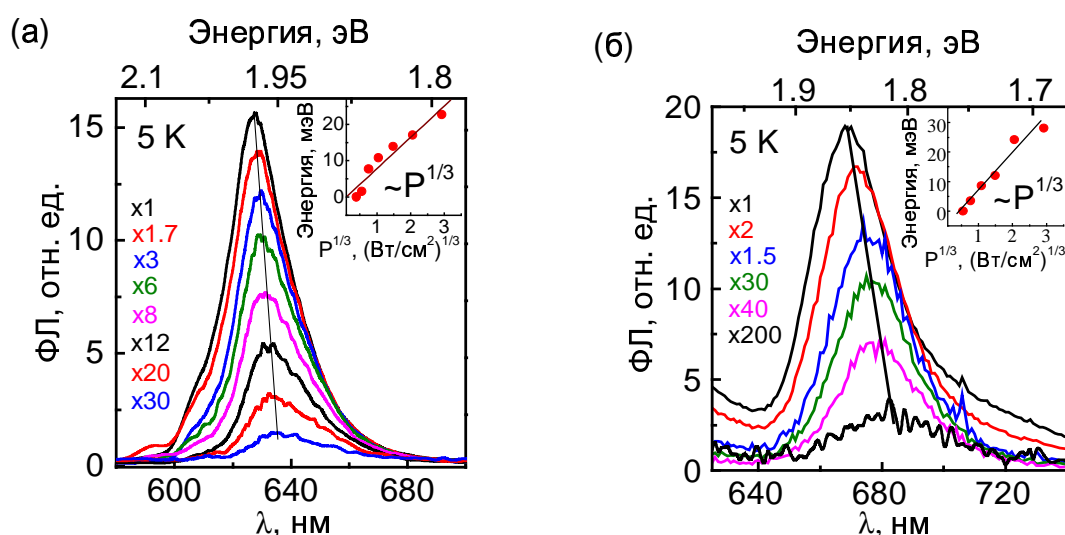


Рис. 4. Спектры стационарной ФЛ структур с псевдоморфно напряжёнными (а) GaAs/GaP КЯ,  $P_{ex}$  снизу вверх 0.014÷25 Вт/см<sup>2</sup>; (б) GaAsP/GaP КТ,  $P_{ex}$  снизу вверх 0.17÷25 Вт/см<sup>2</sup>. На вставках приведены зависимости положения максимумов полос от  $P_{ex}^{1/3}$ .

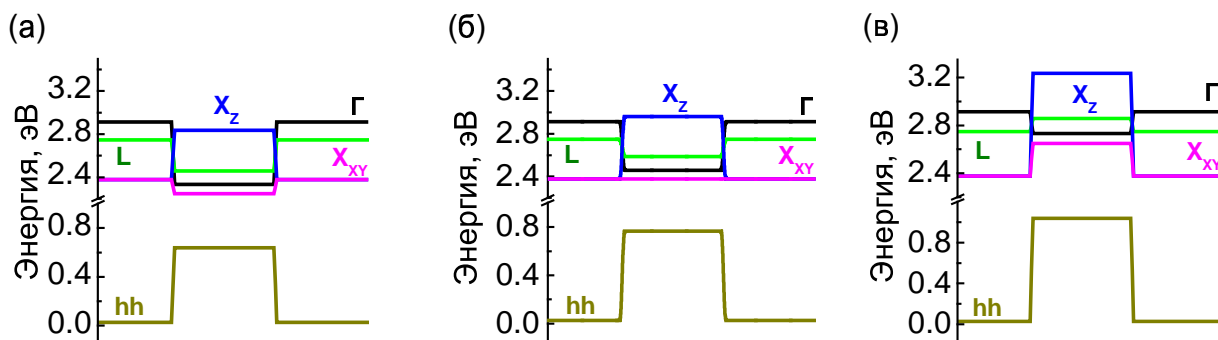


Рис.5. Результаты расчёта структуры энергетических зон псевдоморфно напряженной КЯ GaAs/GaP, для значений VBO, эВ: (а) 0.343, (б) 0.470 и (в) 0.743.

зону.

**Параграф 4.2** посвящен определению энергетического спектра псевдоморфно напряжённых Ga(As,P)/GaP и Ga(Sb,P)/GaP гетероструктур. В **параграфе 4.2.1.** рассматриваются спектры стационарной ФЛ гетероструктур с Ga(As,P)/GaP КЯ и КТ, измеренные при различных плотностях мощности возбуждения, приведенные на рис. 4 (а) и (б), соответственно. С повышением  $P_{ex}$ , связанные с рекомбинацией экситонов, полосы ФЛ смещаются в высокоэнергетическую область спектра пропорционально корню кубическому от  $P_{ex}$  (см. вставки на рис. 4). Следовательно, псевдоморфно напряжённые КЯ и КТ Ga(As,P)/GaP имеют энергетический спектр второго рода, с основным состоянием электрона, принадлежащим X долине зоны проводимости GaP.

Результаты расчета энергетического спектра псевдоморфно напряжённых КЯ и КТ Ga(As,P)/GaP приведены в **параграфе 4.2.2.** КЯ GaAs/GaP, в соответствии с полученными в главе 3, данными об её структуре, задавалась как псевдоморфно напряжённый слой GaAs с резкими границами. При расчете зонной структуры использовались параметры GaAs и GaP, приведённые в [9]. Литературные данные для значения разрыва валентных зон (VBO) на гетерогранице GaAs/GaP (здесь и далее под VBO понимается усреднённое значение разрыва зон тяжёлых, лёгких и спин-отщеплённых дырок) лежат в диапазоне 0.343 – 0.743 эВ [9,15-18], поэтому расчеты энергетического спектра GaAs/GaP КЯ проводились для различных значений этого параметра. Результаты расчётов приведены на рис. 5.

В зависимости от значения VBO расчеты предсказывают КЯ с энергетический спектром первого рода (для  $VBO < 0.470$  эВ) и второго рода ( $VBO > 0.470$  эВ). Сравнение рассчитанной при различных значениях VBO энергии оптического перехода с положением полосы в спектре ФЛ псевдоморфно напряжённой GaAs/GaP КЯ позволило оценить значение VBO на гетерогранице GaAs/GaP, равное 0.49 эВ. Полученное значение VBO было использовано для расчётов структуры энергетических зон псевдоморфно напряжённых КТ GaAsP/GaP. Для расчета форма КТ задавалась

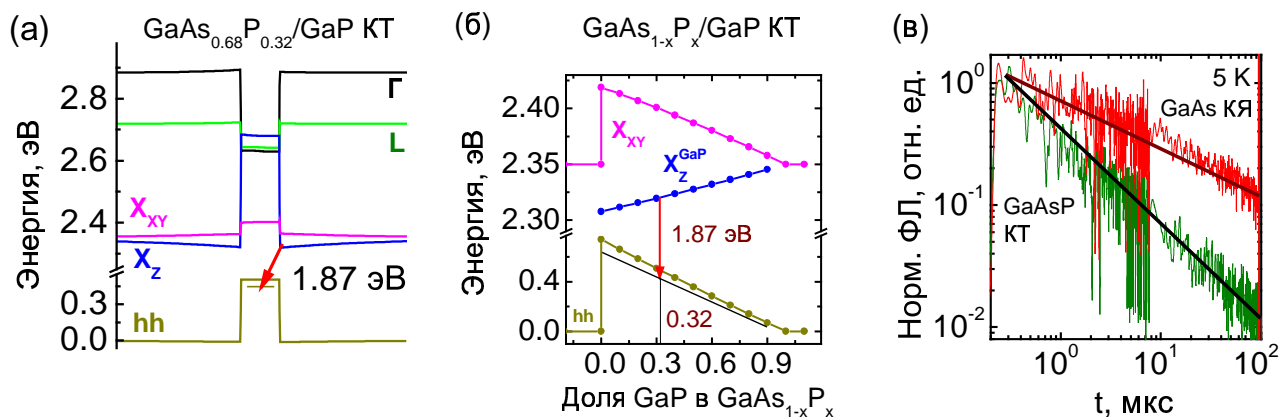


Рис. 6. (а) Результаты расчёта структуры энергетических зон псевдоморфно напряженных GaAs<sub>0.68</sub>P<sub>0.32</sub>/GaP КТ. (б) Структура энергетических зон псевдоморфно напряжённых GaAsP/GaP КТ с учетом размерного квантования тяжелых дырок в зависимости от состава твёрдого раствора. (в) Кинетика затухания ФЛ псевдоморфно напряжённых GaAs/GaP КЯ и GaAs<sub>0.68</sub>P<sub>0.32</sub>/GaP КТ.

в виде псевдоморфно напряжённого полуэллипсоида вращения, состоящего из твердого раствора GaAsP. Размеры КТ были взяты из полученных методом ПЭМ планарных изображений и поперечных сечений. Параметры твёрдого раствора GaAsP определялись как линейная комбинация параметров GaAs и GaP, приведенных в [9]. Изменения величины VBO на гетерогранице GaAsP/GaP учитывалось в линейном приближении.

Строение энергетических зон псевдоморфно напряженных GaAs<sub>0.68</sub>P<sub>0.32</sub>/GaP КТ представлено на рис. 6 (а). В отличие от КЯ, где деформации полностью локализованы в слое GaAs, в случае КТ деформированными оказываются также и близлежащие области GaP матрицы. Деформации GaP имеют противоположный знак, по отношению к деформациям в КТ, что приводит к уменьшению энергии электронов, находящихся в X<sub>Z</sub> подзоне X долины зоны проводимости GaP. Энергетический спектр GaAsP/GaP КТ, рассчитанный в зависимости от состава твёрдого раствора GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>, показан на рис. 6 (б). С увеличением доли GaP в материале КТ - x от 0 до 1 энергетические зоны GaAsP стремятся к положению зон в ненапряжённом GaP, однако, для любого x имеет место энергетический спектр второго рода с основным электронным состоянием в X<sub>Z</sub> долине зоны проводимости GaP. Принадлежность электрона X<sub>Z</sub> долине зоны проводимости GaP приводит к ускорению динамики экситонной ФЛ в гетероструктурах с КТ GaAsP/GaP, по сравнению с таковой в гетероструктурах с КЯ GaAs/GaP, как это показано на рисунке 6 (в). Это ускорение обусловлено тем, что вероятность рассеяния перпендикулярного гетерогранице квазиимпульса X<sub>Z</sub> электрона в гетероструктурах с КТ GaAsP/GaP значительно больше, чем вероятность рассеяния параллельного гетерогранице квазиимпульса у электронов X<sub>XY</sub> в гетероструктурах с КЯ GaAs/GaP [19].

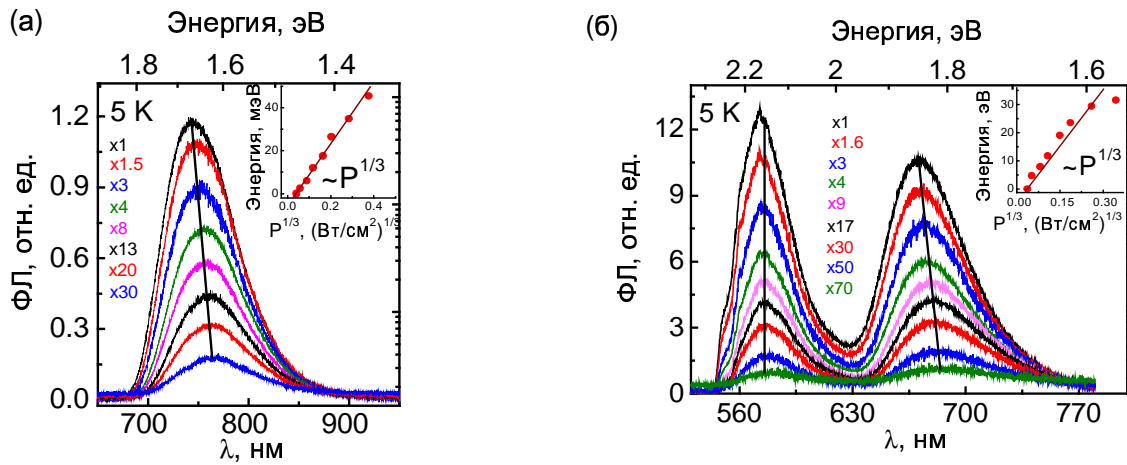


Рис. 7. Спектры стационарной ФЛ структур с псевдоморфно напряжёнными GaSbP/GaP КТ, измеренные при температуре 5 К. Для структуры, выращенной при  $T_S = 420^{\circ}\text{C}$  (а) и  $T_S = 470^{\circ}\text{C}$  (б).  $P_{\text{ex}}$  снизу вверх 0.06-53.4 мВт/см<sup>2</sup>. На вставках приведены зависимости положения максимумов полос от  $P_{\text{ex}}^{1/3}$ .

Спектры стационарной ФЛ гетероструктур с псевдоморфно напряжёнными КТ Ga(Sb,P)/GaP, измеренные при различных плотностях мощности возбуждения (см. рис.7 (а) и (б) для структур, выращенных при  $T_S = 420 \pm 10^{\circ}\text{C}$  и  $470 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , соответственно) анализируются в **параграфе 4.2.3**. В спектрах ФЛ гетероструктур, выращенных при  $T_S = 420 \pm 10^{\circ}\text{C}$  наблюдается полоса, обусловленная рекомбинацией экситонов в КТ, а в спектрах гетероструктур, выращенных при  $T_S = 470 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , в дополнение к этой полосе появляется высокоэнергетическая полоса (СС),

связанная с рекомбинацией экситонов в смачивающем слое. Появление полосы СС связано с уменьшением концентрации локализованных в смачивающем слое дефектов – центров безызлучательной рекомбинации при повышении температуры роста гетероструктур, подобно тому, как это наблюдалось в непрямозонных гетероструктурах первого рода InAs/AlAs [3,20]. Действительно, интегральная интенсивность ФЛ Ga(Sb,P)/GaP гетероструктур, выращенных при  $T_S = 470 \pm 10^{\circ}\text{C}$ , на два порядка величины больше, чем гетероструктур, выращенных при  $T_S = 420 \pm 10^{\circ}\text{C}$ .

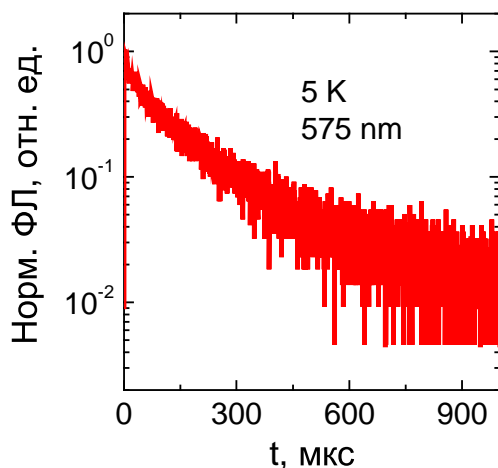


Рис. 8. Кинетика затухания ФЛ СС, в гетероструктуре с КТ Ga(Sb,P)/GaP измеренная на длине волны, соответствующей максимуму полосы ФЛ.

Сдвиг полос ФЛ КТ в высокоэнергетическую область спектра, пропорциональный корню кубическому от  $P_{ex}$  (см. вставки в рис. 7), свидетельствует о втором роде энергетического спектра псевдоморфно напряжённых КТ Ga(Sb,P)/GaP [4,5]. Полоса ФЛ СС, напротив, практически не смещается при изменении  $P_{ex}$  почти на 4 порядка величины и демонстрирует длительное затухание ФЛ (вплоть до сотен микросекунд) после импульса возбуждения (см. рис. 8). Таким образом, смачивающий слой, представляющий собой квантовую яму, имеет энергетический спектр первого рода с непрямой запрещенной зоной.

Результаты расчета энергетического спектра псевдоморфно напряжённых КЯ и КТ Ga(Sb,P)/GaP приведены в параграфе 4.2.4. GaSbP/GaP КЯ задавалась как псевдоморфно напряжённый слой, а КТ моделировалась в виде псевдоморфно напряжённого полуэллипсоида вращения, состоящего из твердого раствора GaSbP. Информация о толщине КЯ (1 нм) и размерах КТ бралась из полученных методом ПЭМ планарных изображений и поперечных сечений гетероструктур. Параметры твёрдого раствора GaSbP определялись как линейная комбинация параметров GaSb и GaP, приведенных в [9]. Энергетические спектры, рассчитанные для псевдоморфно напряжённых КЯ и КТ, состоящих из твердого раствора  $GaSb_{1-x}P_x$  различного состава  $x$ , приведены на рис. 9 (а) и (б), соответственно. Видно, что для любых значений состава твердого раствора  $x$  КЯ имеют энергетический спектр первого рода с основным электронным состоянием, принадлежащим  $X_{XY}$  долине зоны проводимости, а дырочным – зоне тяжёлых дырок GaSbP. В случае КТ расщепление состояний  $X$  долины зоны проводимости GaSbP также приводит к формированию мелкой потенциальной ямы для электронов находящихся в  $X_{XY}$  подзоне. Однако из-за деформации прилегающего к КТ слоя GaP основным электронным состоянием при любых

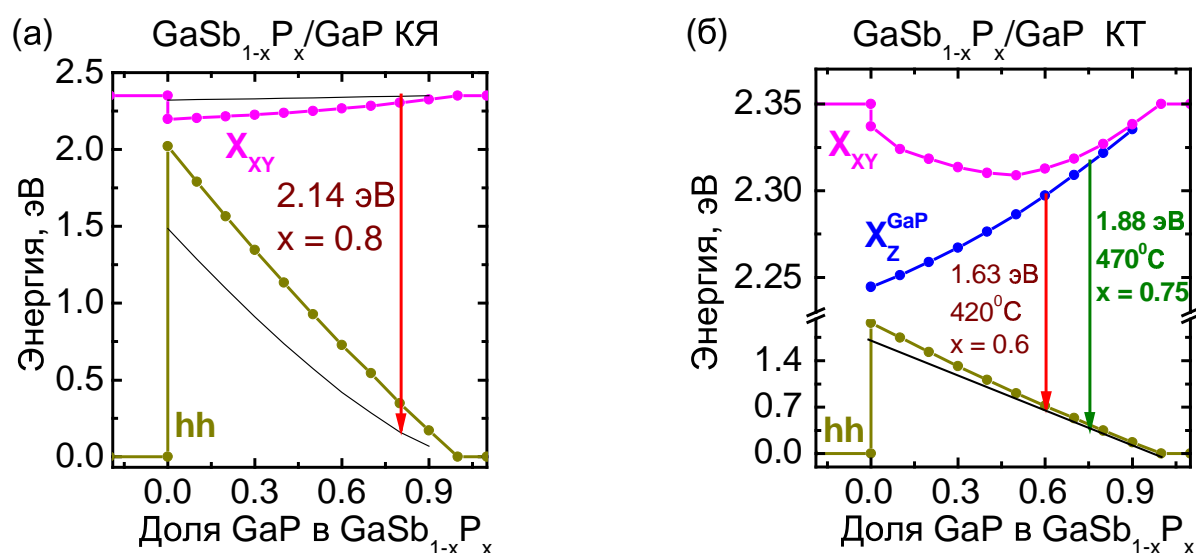


Рис. 9. Структура энергетических зон псевдоморфно напряжённых (а) GaSbP/GaP КЯ и (б) GaSbP/GaP КТ в зависимости от состава твёрдого раствора.



значениях состава твёрдого раствора становится  $X_Z$  подзона зоны проводимости GaP, как это показано на рис. 9 (б).

Сравнение энергетических положений полос в спектрах ФЛ (показаны вертикальными стрелками на рис. 9), с рассчитанными энергиями оптических переходов, позволило оценить значения  $x$  состава твердых растворов, из которых состоят псевдоморфно напряжённые Ga(Sb,P)/GaP КЯ и КТ. Смачивающий слой состоит из твердого раствора  $\text{GaSb}_{0.2}\text{P}_{0.8}$ . Доля GaP -  $x$  в составе твердого раствора  $\text{GaSb}_{1-x}\text{P}_x$ , из которого состоят КТ возрастает от  $x = 0.6$  до  $x = 0.75$ , для гетероструктур, выращенных при  $T_S = 420 \pm 10^\circ\text{C}$  и  $T_S = 470 \pm 10^\circ\text{C}$ , соответственно.

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы работы:

1. Показано, что в зависимости от температуры эпитаксии осаждение 3-х монослоёв GaAs на подложку GaP ориентации (001) позволяет формировать гетероструктуры с: (i) псевдоморфно напряженными КЯ, состоящими из GaAs, при  $T_S = 420 \pm 10^\circ\text{C}$ ; (ii) GaAs/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений при  $T_S = 550 \pm 10^\circ\text{C}$  и (iii) псевдоморфно напряженными КТ, состоящими из твердого раствора  $\text{GaAs}_{0.68 \pm 0.05}\text{P}_{0.32 \pm 0.05}$ , при  $T_S = 600 \pm 10^\circ\text{C}$ .
2. Обнаружено, что, несмотря на значительное рассогласование параметров решеток GaSb и GaP (10,5%), в гетероструктурах GaSb/GaP, выращенных на подложках GaP ориентации (001) в диапазоне температур  $T_S = 420^\circ\text{C} \div 470^\circ\text{C}$  формируются массивы псевдоморфно напряженных КТ  $\text{GaSb}_{1-x}\text{P}_x$  (с  $x > 0,6$ ), расположенные на смачивающем слое, представляющем собой тонкую КЯ.
3. Установлено, что в гетероструктурах GaSb/GaP, выращенных при температуре  $T_S = 450 \pm 10^\circ\text{C}$  на подложках GaP ориентации (001) с развитым рельефом, ограничивающим диффузию адатомов расстояниями  $\sim 100$  нм, формируются GaSb/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений.
4. Показано, что полная релаксация механических напряжений в КТ состоящих из GaAs и GaSb в матрице GaP идёт за счёт ведения сетки ломеровских дислокаций и не приводит к возрастанию темпа безызлучательной рекомбинации экситонов в КТ.
5. Показано, что полученные GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений обладают энергетическим спектром первого рода с основным электронным состоянием, принадлежащим  $L$  долине зоны проводимости. Увеличение размеров КТ может привести к тому, что основным электронным состоянием в КТ становится состояние, принадлежащее  $\Gamma$  долине зоны проводимости.

6. Установлено, что псевдоморфно напряженная КЯ GaAs/GaP имеет энергетическую структуру второго рода с основным электронным состоянием, принадлежащим X долине зоны проводимости GaP.
7. Показано, что состоящие из твердого раствора GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> псевдоморфно напряжённые КТ в матрице GaP, при любом составе твердого раствора  $0 < x < 1$  имеют энергетический спектр второго рода с основным электронным состоянием, принадлежащим X<sub>Z</sub> долине зоны проводимости GaP.
8. Показано, что состоящая из твердого раствора GaSb<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> псевдоморфно напряжённая КЯ в матрице GaP при любом составе твердого раствора  $0 < x < 1$  имеет энергетический спектр первого рода с основным электронным состоянием, принадлежащим X<sub>XY</sub> долине зоны проводимости.
9. Показано, что состоящие из твердого раствора GaSb<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> псевдоморфно напряжённые КТ в матрице GaP, при любом составе твердого раствора  $0 < x < 1$  имеют энергетический спектр второго рода с основным электронным состоянием, принадлежащим X<sub>Z</sub> долине зоны проводимости GaP.

**Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:**

1. Shamirzaev T. S. High quality relaxed GaAs quantum dots in GaP matrix / T. S. Shamirzaev, D. S. Abramkin, A. K. Gutakovskii, M. A. Putyato // Appl. Phys. Lett. – 2010. – Vol. 97,N.2. - P. 023108-1-3.
2. Абрамкин Д.С. Новая система GaAs квантовых точек в матрице GaP / Д. С. Абрамкин, А. К. Гутаковский, М. А. Пулято, В. В. Преображенский, Т. С. Шамирзаев // Известия вузов Физика. – 2011. – Т. 54,№2/2. - С. 18-21.
3. Абрамкин Д.С. Новая система самоорганизованных квантовых точек GaSb/GaP / Д.С. Абрамкин, М. А. Пулято, А. К. Гутаковский, Б. Р. Семягин, В. В. Преображенский, Т. С. Шамирзаев // Физика и техника полупроводников. – 2012. Т. 46,№12. – С. 1571-1575.
4. Abramkin D. S. Atomic structure and energy spectrum of Ga(As,P)/GaP heterostructures / D. S. Abramkin, M. A. Putyato, S. A. Budennyu, A. K. Gutakovskii, B. R. Semyagin, V. V. Preobrazhenskii, O. F. Kolomys, V. V. Strelchuk, T. S. Shamirzaev // J. Appl. Phys.– 2012. – Vol.112,N8. – P.083713–1–10.
5. Абрамкин Д.С. Новая система GaAs квантовых точек в матрице GaP / Д. С. Абрамкин, А. К. Гутаковский, М. А. Пулято, В. В. Преображенский, Т. С. Шамирзаев // Труды XII Международной школы-семинара по люминесценции и лазерной физике ЛЛФ-2010 (Хужир, Россия, 26-31 июля 2010). С.23-25.

6. Abramkin D. S. Energy structure of novel GaSb/GaP quantum dots system / D. S. Abramkin, M. A. Putyato, T. S. Shamirzaev // Proceedings of 19th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, (Ekaterinburg, Russia, June 20–25, 2011). - P. 173-174.
7. Шамирзаев Т.С. / Высококачественные однородно релаксированные слои GaP выращенные на несогласованных подложках GaAs методом МЛЭ // Т. С. Шамирзаев, Д. С. Абрамкин, А. К. Гутаковский, М. А. Путято, А. Б. Талочкин, В. В. Преображенский // Труды Российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011» (Новосибирск, Россия, 22-26 августа 2011). С. 95-96.
8. Abramkin D. S. Novel system of GaSb/GaP quantum dots grown on mismatched GaAs substrate / D. S. Abramkin, M. A. Putyato, T. S. Shamirzaev // Proceedings of Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials (Vladivostok, Russia, 21 – 28 August, 2011). - P. 95-96.
9. Абрамкин Д.С. Атомное и энергетическое строение GaAs/GaP гетероструктур / Д. С. Абрамкин, Т. С. Шамирзаев // Труды XIII Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, Россия, 21-25 ноября 2011). С. 21.
10. Абрамкин Д.С. Новая система квантовых точек GaSb/GaP / Д. С. Абрамкин, М. А. Путято, В. В. Преображенский, А. К. Гутаковский, Т. С. Шамирзаев // Труды XVI международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Россия, 12-16 марта, 2012). Т. 2. С. 432-433.
11. Абрамкин Д.С. Атомная структура и люминесцентные свойства GaSb/GaP квантовых точек / Д. С. Абрамкин, М. А. Путято, А. К. Гутаковский, Б. Р. Семягин, В. В. Преображенский, Т. С. Шамирзаев // Труды XIII Международной школы-семинара по люминесценции и лазерной физике ЛЛФ-2012 (Иркутск, Бухта «Песчаная», Россия, 16-22 июля 2012). С. 24-25.
12. Абрамкин Д.С. Фотолюминесценция полупроводниковых гетероструктур, сформированных в матрице GaP / Д. С. Абрамкин, М. А. Путято, Б. Р. Семягин, В. В. Преображенский, Т. С. Шамирзаев // Труды XIII Международной школы-семинара по люминесценции и лазерной физике ЛЛФ-2012 (Иркутск, Бухта «Песчаная», Россия, 16-22 июля 2012). С. 27-28.

## Список цитируемой литературы

1. Шамирзаев Т.С. Полупроводниковые гетероструктуры первого рода с непрямой зоной проводимости // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т.45, №1. – С. 97-103.
2. Pistol M.-E. Band structure of segmented semiconductor nanowires / M.-E. Pistol, C. E. Pryor. // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol.80 – P.035316-035330.
3. Shamirzaev T.S. Energy spectrum and structure of thin pseudomorphic InAs quantum wells in an AlAs matrix: Photoluminescence spectra and band-structure calculations / T.S. Shamirzaev, A. M. Gilinsky, A. K. Kalagin, A. V. Nenashev, K.S. Zhuravlev // Phys. Rev. B. – 2007. - Vol. 76. – P. 155309-1-9.
4. Ledentsov N. N. Radiative states in type-II GaSb/GaAs quantum wells / N. N. Ledentsov, J. Bohrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg, S. V. Ivanov, B. Ya. Meltser, S. V. Shaposhnikov, I. N. Yassievich, N. N. Faleev, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov // Phys. Rev. B. – 1995. – Vol. 52. – P. 14058-14066.
5. Hatami F. Radiative recombination in type-II GaSb/GaAs quantum dots / F. Hatami, N. N. Ledentsov, M. Grundmann, J. Bohrer, F. Heinrichsdorff, M. Beer, D. Bimberg, S. S. Ruvimov, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich, U. Richter, S. V. Ivanov, B. Ya. Meltser, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov // Appl. Phys. Lett. – 1995. - Vol. 67. – P. 656-658.
6. Dubrovskii V. G. Kinetics of the initial stage of coherent island formation in heteroepitaxial systems / V. G. Dubrovskii, G. E. Cirlin, V. M. Ustinov // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 68. – P. 075409-1-9.
7. LeGoues F.K. Relaxation mechanism of Ge islands/Si(001) at low temperature / F.K. LeGoues, J. Tersoff, M. C. Reuter, M. Hammar, R. Tromp // Appl. Phys. Lett. - 1995. – Vol. 67.N.16. – P. 2317-2319.
8. Snyder C.W. Kinetically controlled critical thickness for coherent islanding and thick highly strained pseudomorphic films of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  on GaAs(100) / C.W. Snyder, J.F. Mansfield, B.G. Orr // Phys. Rev. B. – 1992. – Vol. 46. – P. 9551-9554.
9. Vurgaftman I. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys / I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan // J. Appl. Phys. – 2001. – Vol. 89. – P. 5815-5875.
10. Harrison W. A. Electronic Structure and Properties of Solids / W. A. Harrison. San Francisco: W. H. Freeman, 1980. - 838 p.
11. Ван дер Мерве Дж. Х. Несоответствие кристаллических решеток и силы связи на поверхности раздела между ориентированными пленками и подложками. // В кн.: Монокристаллические пленки. М.: Мир, 1966, с.172-201.

12. Lang D. V. Nonradiative Recombination at Deep Levels in GaAs and GaP by Lattice-Relaxation Multiphonon Emission / D. V. Lang, C. H. Henry // *Phys. Rev. Lett.* – 1975. – Vol. 35. – P. 1525-1528.
13. Vila A. Atomic core structure of lomer dislocation at GaAs(001)/Si interface / A. Vila, A. Cornet, J. R. Morante, P. Ruterana, M. Loubradou, R. Bonnet, Y. Gonzalez, L. Gonzalez // *Philosophical magazine. A: Physics of condensed matter. Defects and mechanical properties.* – 1995. – Vol. 71. – P. 85-103.
14. Tomm J. W. Transient luminescence of dense InAs/GaAs quantum dot arrays / J. W. Tomm, T. Elsaesser, Yu. I. Mazur, H. Kissel, G. G. Tarasov, Z. Ya. Zhuchenko, W. T. Masselink // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 67. – P. 045326-045333.
15. Gourley P. L. Quantum size effects in GaAs/GaAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> strained layer superlattices / P. L. Gourley, R. M. Biefeld // *Appl. Phys. Lett.* - 1984. - Vol. 45,N.7. - P.749-751.
16. Recio M. Optical properties of GaAs/GaP strained-layer superlattice / M. Recio, G. Armelles, J. Melendez, F. Briones // *J. Appl. Phys.* – 1989. – Vol. 67.№4 – P. 2044-2050.
17. Katnani A. D. Microscopic study of semiconductor heterojunctions: Photoemission measurement of the valance-band discontinuity and of the potential barriers / A. D. Katnani, G. Margaritondo // *Phys. Rev. B.* – 1983. – Vol. 28. – P. 1944-1956.
18. Davis M. E. GaAs-GaP Heterojunctions M. E. Davis, G. Zeidenbergs, R. L. Anderson // *Phys. Status Solidi.* – 1969. – Vol. 34. – P. 385-393.
19. Braginsky L. S. Kinetics of exciton photoluminescence in type-II semiconductor superlattices / L. S. Braginsky, M. Yu. Zaharov, A. M. Gilinsky, V. V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, K. S. Zhuravlev // *Phys. Rev. B.* – 2001. – Vol. 63. – P. 195305-1-10.
20. Shamirzaev T. S. Carrier dynamics in InAs/AlAs quantum dots: lack in carrier transfer from wetting layer to quantum dots / T. S. Shamirzaev, D. S. Abramkin, A. V. Nenashev, K. S. Zhuravlev, F F. Trojanek, B. Dzur ak, P. Maly // *Nanotechnology.* - 2010. – Vol. 21. – P. 155703-1-7.