

*На правах рукописи*

МАКСИМОВ Михаил Викторович

**Квантовые точки как активная среда  
оптоэлектронных приборов**

специальность: 01.04.10 – физика полупроводников

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

**Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН**

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор  
Сейсян Рубен Павлович (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

доктор физико-математических наук, профессор  
Воробьев Леонид Евгеньевич (ГОУ «СПбГПУ»)

доктор физико-математических наук, профессор  
Соломонов Александр Васильевич (СПбГЭТУ "ЛЭТИ")

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится 22 октября 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан 21 сентября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.205.02

доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Гетероструктуры с пространственным ограничением носителей заряда во всех трех направлениях (квантовые точки) реализуют предельный случай размерного квантования в полупроводниках, когда модификация электронных свойств материала наиболее выражена. Электронный спектр идеальной квантовой точки (КТ) представляет собой набор дискретных уровней, разделенных областями запрещенных состояний, и соответствует электронному спектру одиночного атома, хотя квантовая точка может при этом состоять из сотен тысяч атомов [1\*]. Интерес к лазерам на КТ в значительной мере был мотивирован ранними теоретическими работами, в которых был предсказан ряд их преимуществ по сравнению с лазерами на основе квантовых проволок, квантовых ям и объемных материалов: более низкая пороговая плотность тока, ее более высокая температурная стабильность, более высокое усиление. Однако, впоследствии детальный теоретический анализ показал, что преимущества лазеров на КТ могут быть реализованы только при тщательной оптимизации как характеристик ансамбля самих точек (плотность, разброс по размеру, глубина локализации основного состояния и т.д.), так и конструкции лазера (толщина волновода, профили легирования и т.д.). В связи с этим, разработка методов управления характеристиками массива КТ, достижение глубокого понимания физических свойств оптоэлектронных приборов на КТ и оптимизация их параметров является чрезвычайно важной и актуальной задачей.

В процессе самоорганизации рост КТ большого размера может сопровождаться формированием дислокаций, которые будут служить центрами безызлучательной рекомбинации, что приводит к существенному ухудшению параметров лазеров на квантовых точках. Таким образом, разработка методов уменьшения плотности дислокаций в процессе роста и систематическое изучение влияния центров безызлучательной рекомбинации на оптические свойства структур с КТ представляется чрезвычайно важными задачами для реализации предсказанных теорией лучших по сравнению с приборами на квантовых ямах характеристик.

Квантовые точки InAs/GaAs на подложках GaAs, излучающие в оптическом диапазоне около 1.3 мкм, представляют особый фундаментальный и практический интерес. С одной стороны, локализация носителей в таких точках достаточно велика и таким образом, уникальные свойства, связанные с дельтаобразной плотностью

состояний могут проявляться вплоть до комнатной температуры. С точки зрения приборных применений сильная локализация носителей в КТ InAs/GaAs позволит улучшить температурную стабильность длинноволновых лазеров, а в идеале полностью отказаться от систем термостабилизации. В структурах, выращенных на подложках GaAs, в отличие от структур на подложках InP разница показателей преломления между материалами достаточно велика и может быть еще более увеличена за счет использования слоев  $(\text{AlGa}_x)\text{O}_y$ . Это открывает широкие возможности для конструирования различных приборов с использованием микрорезонаторов и Брэгговских зеркал, в том числе микродисков и поверхностно-излучающих лазеров.

Квантовые точки являются идеальной активной средой для создания нового поколения нанофотонных приборов. Вследствие трехмерной локализации носителей в квантовых точках транспорт неравновесных носителей структурах на их основе сильно подавлен. Это позволяет резко уменьшить безызлучательную рекомбинацию на открытых поверхностях даже при комнатной температуре. Таким образом, КТ могут использоваться в качестве активной области нанофотонных приборов, у которых травление осуществляется через активную область. Дельтообразная плотность состояний в КТ позволяет реализовать в полупроводниковых устройствах эффекты квантовой электродинамики, характерные для атомной физики, сохраняя при этом возможность токовой инжекции и простой интеграции с другими оптоэлектронными приборами. Разработка таких принципиально новых приборов как беспороговые лазеры, источники одиночных фотонов, источники переплетенных фотонов, квантовые компьютеры в значительной степени будет опираться на использование КТ с заданной зонной диаграммой. Таким образом, разработка методов конструирования энергетических уровней в КТ является важной и актуальной научной задачей.

Лазеры на КТ открывают более широкие возможности управления длиной волны в заданной системе материалов (на данной подложке). Так, например, максимальная длина волны в лазерах на квантовых ямах InGaAs, выращенных на подложках GaAs, составляет около 1.15 мкм, в то время как в лазерах на КТ она может быть увеличена до 1.35 мкм. Дальнейшее увеличение длины излучения в структурах на подложках GaAs возможно в рамках предложенной в данной

диссертационной работе метаморфной концепции роста. Использование оригинальных технологических приемов выращивания буферного слоя InGaAs позволяет перейти от постоянной решетки GaAs к постоянной решетки InGaAs таким образом, что большинство дислокаций не будет распространяться в направлении роста, а будет содержаться внутри переходного слоя. Таким образом, верхняя часть структуры выращивается на свободном от дислокаций слое InGa(Al)As с содержанием индия до 30%, который играет роль новой подложки. Концепция метаморфного роста позволяет исследовать физику формирования КТ на слоях с различной постоянной кристаллической решетки, а также открывает дополнительные возможности для управления параметрами массива КТ и структурой их энергетических уровней. Данный подход перспективен для создания оптоэлектронных приборов диапазона длин волн 1.55 мкм с улучшенными по сравнению с существующими аналогами параметрами. Разработанные методы уменьшения плотности дислокаций перспективны для выращивания структур на подложках с большим рассогласованием кристаллической решетки, в частности структур в системе материалов InGaAlAs на подложках Si.

**Основной целью работы** являлась разработка технологии формирования квантовых точек в системе материалов (In,Ga)As/(Al,Ga)As, излучающих в ближнем инфракрасном диапазоне (1.3–1.55 мкм) и методов управления их энергетическим спектром, детальные оптические исследования структур с квантовыми точками с целью их использования в качестве активной области различных оптоэлектронных приборов нового поколения, а также изучение физических основ лазеров на квантовых точках.

**Объекты и методы исследования.** Объектом исследования были полупроводниковые гетероструктуры с КТ в системе материалов InGaAlAs/AlGaAs на подложках GaAs, а также торцевые и микродисковые лазеры. Структуры выращивались методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Структурные свойства КТ исследовались методом просвечивающей электронной спектроскопии, в том числе высокого разрешения. Оптические исследования проводились методом спектроскопии фотолюминесценции, возбуждения фотолюминесценции и

микрофотолюминесценции в широком диапазоне температур и плотностей фотовозбуждения. Для изготовления лазеров на квантовых точках использовалась оптическая литография, сухое травление, а также в случае микродисковых лазеров селективное окисление. Инжекционные лазеры исследовались методом электролюминесценции в широком диапазоне температур.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Впервые разработан научно-технологический подход для уменьшения плотности дислокаций в структурах с квантовыми точками в процессе их эпитаксиального синтеза.
2. Впервые проведено систематическое экспериментальное и теоретическое исследование особенностей безызлучательной рекомбинации и определены типичные времена безызлучательной рекомбинации в структурах с квантовыми точками, а также предложен способ оценки кристаллического совершенства образца оптическими методами.
3. Впервые экспериментально и теоретически исследован латеральный транспорт носителей в структурах с квантовыми точками.
4. Впервые проведено систематическое исследование влияния степени легирования активной области лазеров с квантовыми точками акцепторной примесью на их температурную стабильность.
5. Впервые обнаружен и объяснен *N*-образный характер температурной зависимости пороговой плотности тока в лазерах на квантовых точках.
6. Впервые разработан способ получения метаморфных слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с содержанием индия до 30%, обладающих высоким структурным и оптическим совершенством на подложках GaAs, а также изучены особенности формирования квантовых точек InAs на таких слоях и их оптические свойства.
7. Впервые на подложках GaAs получены и исследованы метаморфные лазеры с активной областью на основе квантовых точек InAs, излучающие в оптическом диапазоне около 1.5 мкм.
8. Впервые показано, что покрытие квантовых точек InAs тонкими слоями AlAs/InAlAs позволяет управлять их формой, размером и структурой энергетических уровней и достигать степени локализации электронов и дырок,

необходимой для реализации неравновесного распределения носителей при комнатной температуре.

9. Впервые продемонстрированы и исследованы поверхностно-излучающие лазеры на основе вертикального микрорезонатора диапазона 1.3 мкм с активной областью на основе InAs/InGaAs квантовых точек, выращенные на подложке GaAs.

**Практическая значимость** работы состоит в следующем:

1. Разработанные технологические подходы для выращивания квантовых точек, излучающих в оптическом диапазоне около 1.3 мкм на подложках GaAs, а также методы оптимизации конструкции лазеров позволяют создавать приборы с улучшенными характеристиками по сравнению с традиционно используемыми для данного оптического диапазона приборами на основе соединений GaInAsP на подложках InP. В частности, методы уменьшения плотности дефектов при формировании квантовых точек InAs позволяют снизить пороговую плотность тока лазеров, а легирование акцепторной примесью позволяет повысить их температурную стабильность.
2. Предложенная концепция метаморфного роста с использованием оригинальных технологических приемов уменьшения плотности дислокаций в буферном слое перспективна для создания торцевых и монокристаллических поверхностно-излучающих лазеров диапазона 1.5 мкм на подложках GaAs. Продемонстрирована высокая выходная мощность и деградационная стойкость прототипов таких лазеров. Разработанные технологические подходы перспективны для создания оптоэлектронных приборов в системе материалов InGaAlAs на подложках Si.
3. Результаты исследований оптических свойств мез субмикронного размера с квантовыми точками и латерального транспорта в таких структурах важны для разработки будущего поколения приборов на основе микрорезонаторов и фотонных кристаллов, в которых травление осуществляется через активную область. Микродисковые лазеры и поверхностно-излучающие лазеры сверхмалого размера перспективны для создания беспороговых лазеров, а также источников одиночных и переплетенных фотонов.

Все полученные автором научные результаты, вынесенные на защиту, являются новыми.

В результате диссертационной работы сформировалось **новое научное направление** в физике полупроводников – управление структурными свойствами и электронным спектром квантовых точек, а также создание и исследование нанофотонных приборов на их основе.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

**ПОЛОЖЕНИЕ 1.** Варьирование постоянной решетки материала, на котором осаждаются квантовые точки, а также химического состава и ширины запрещенной зоны покрывающих тонких слоев позволяет в широких пределах управлять плотностью, формой, размером, а также спектром энергетических уровней квантовых точек.

**ПОЛОЖЕНИЕ 2.** Неоднородные поля упругих напряжений в кристаллических структурах, содержащих дислокации, позволяют осуществлять селективное зарращивание бездислокационных участков поверхности при осаждении материала с соответствующим параметром решётки. Последующее испарение непокрытых областей дает возможность существенно уменьшать плотность дислокаций в структурах с квантовыми точками, выращивать толстые слои с высоким кристаллическим и оптическим качеством на подложках с большим рассогласованием параметра решетки, существенно уменьшать пороговую плотность тока лазеров, реализовывать длину волны излучения вплоть до 1.55 мкм в структурах, выращенных на подложках GaAs.

**ПОЛОЖЕНИЕ 3.** Латеральный транспорт носителей в структурах с квантовыми точками подавляется при увеличении энергий локализации электронов и дырок относительно состояний смачивающего слоя и матрицы, что приводит к низкой скорости поверхностной рекомбинации в меза-структурах вплоть до комнатной температуры и позволяет использовать квантовые точки в качестве активной области

нанофотонных приборов сверхмалого размера, в которых травление осуществляется через активную область.

**ПОЛОЖЕНИЕ 4.** В случае нелегированных структур с квантовыми точками изменение распределения носителей в ансамбле с неравновесного на равновесное в совокупности с тепловым заселением близко расположенных дырочных уровней приводит к немонотонному  $N$ -образному характеру температурной зависимости пороговой плотности тока.

**ПОЛОЖЕНИЕ 5.** Легирование структур с квантовыми точками акцепторной примесью приводит к заселению дырочных уровней, коротковолновому сдвигу края спектра поглощения и увеличению температурной стабильности пороговой плотности тока лазеров.

Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, представляют как фундаментальный, так и большой практический интерес и могут быть использованы при разработке новых приборов оптоэлектроники и нанофотоники, а также при фундаментальных исследованиях гетероструктур с квантовыми точками в различных системах материалов. Данные результаты могут быть использованы в различных организациях Российской Академии наук (Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; Учреждении Российской академии наук Санкт-Петербургском физико-технологическом научно-образовательном центре РАН, Санкт-Петербург; ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва; ИФТТ, Черноголовка; ИПП, Новосибирск; Институт физики микроструктур, Нижний Новгород; Институт общей физики, Москва; ИРЭ, Москва), в ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом университете и др.

**Апробация работы.** Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: 4–15 Международных симпозиумах Наноструктуры: Физика и Технология (Санкт-Петербург, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003,

2004, 2005, 2007); 23–28 Международных конференциях по физике полупроводников (Берлин, Германия, 1996; Иерусалим, Израиль, 1998; Осака, Япония, 2000; Эдинбург, Великобритания, 2002; Флагстафф, США, 2004, Вена, Австрия 2006); международной осенней конференции Общества исследования материалов (MRS) (Бостон, США, 2001); 23 международном симпозиуме по Полупроводниковым соединениям (Санкт-Петербург, 1996), международных конференциях по Физике полупроводниковых квантовых точек (QD2000 – Мюнхен, Германия, 2000; QD2002 – Токио, Япония 2002); 11 международной конференции по Модулированным Полупроводниковым Структурам (MSS-11 – Нара, Япония 2003); международных конференциях Западная фотоника (Сан Хосе, США 2006, 2007, 2008), Международной конференции по квантовым точкам и лазерным применениям (Вроцлав, Польша 2007), 14 международной конференции по молекулярно-пучковой эпитаксии (Токио, Япония 2006), 5 и 7 международных конференциях по лазерной оптике (Санкт-Петербург, 2006, 2008), международной конференции по полупроводниковым приборам на основе квантовых точек и их применениям (Париж 2006), Научных конференциях общества Александра фон Гумбольта (Санкт-Петербург, 2005, 2008), Симпозиуме Полупроводниковые лазеры: физика и технология (Санкт-Петербург 2008).

Результаты работы, как в целом, так и отдельные ее части докладывались также на физических семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, в Техническом университете г. Берлин, Германия, университете г. Ноттингем, Великобритания, университете г. Вупперталь, Германия.

**Публикации.** По теме диссертации имеется 154 публикации в научных журналах и трудах российских и международных конференций. Основные публикации представлены в автореферате, полный список публикаций приведен в диссертации.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержит 284 страницы, 101 рисунок, 7 таблиц. Список литературы состоит из 154 наименований авторских публикаций и списка цитируемой литературы, включающего 77 наименований.

**Во Введении** обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

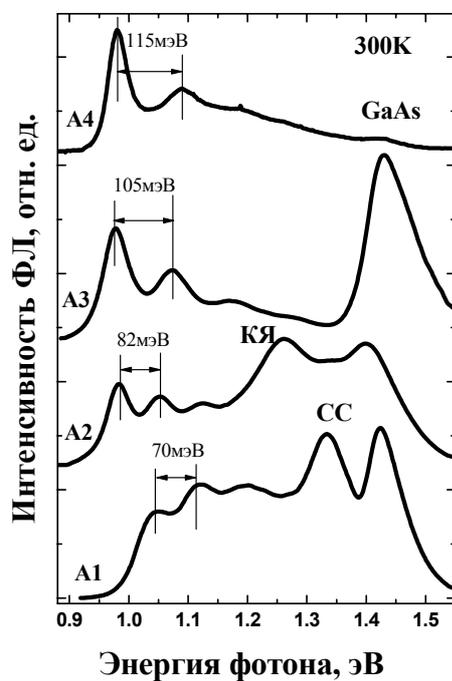
**Первая глава** посвящена исследованию методов управления формой, размером, а также энергетическим спектром носителей заряда в квантовых точках (КТ).

В первой части главы исследовано изменение структурных и оптических свойств КТ InAs, сформированных в режиме роста Странски–Крастанова на подложках GaAs, при покрытии их последовательностью тонких слоев AlAs/In<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As, где состав  $x$  изменялся от 0 до 30%. Известно, что при наращивании КТ слоем GaAs имеет место перемешивание InAs и GaAs, приводящее к размытию профиля КТ, уменьшению их высоты и возникновению вокруг КТ области InGaAs переменного состава. При покрытии КТ тонким слоем AlAs эффекты перемешивания подавляются, и точка сохраняет первоначальную форму. В процессе дальнейшего осаждения тонкого слоя InAlAs происходит направленная миграция атомов In по направлению к КТ, где постоянная решетки ближе к постоянной решетки объемного InAs. Таким образом, область вблизи и над КТ оказывается обогащенной In и обедненной Al. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии при последовательном наращивании начальных КТ, полученных осаждением 2.3 монослоев (МС) InAs тонкими слоями AlAs (2МС) и In<sub>0.25</sub>Al<sub>0.75</sub>As (4 нм) вершина КТ увеличивается практически до размеров ее основания и точка приобретает гантелеобразную форму. Вследствие увеличения объема длина волны излучения КТ сдвигается в длинноволновую сторону.

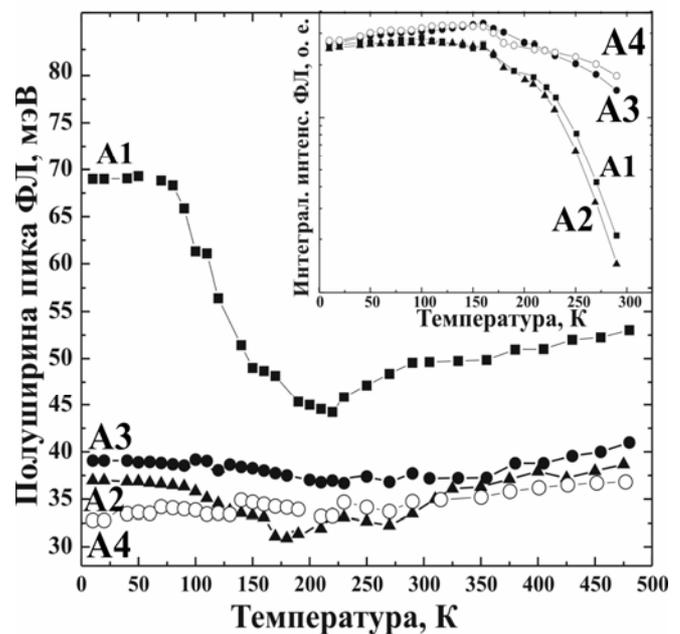
Во второй части главы описаны результаты исследования характера распределения носителей в массиве КТ при различных температурах. С этой целью была исследована серия из четырех структур, во всех случаях начальные КТ формировались путем осаждения 2.3 МС InAs. В структуре А1 начальные КТ покрывались слоем GaAs. В структуре А2 после формирования начальных точек InAs проводилось осаждение слоя In<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As толщиной 40 Å, в структуре А3 – 2 МС AlAs и 40 Å In<sub>0.25</sub>Al<sub>0.75</sub>As. В структуре А4 начальные КТ и покрывающие слои формировались так же, как в структуре А3, но в матрице Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As. На спектрах

фотолюминесценции (ФЛ) структур А1–А4 наблюдается постепенное увеличение энергетического зазора между основным и возбужденным состояниями КТ от 70 мэВ для структуры А1 до 115 мэВ для структуры А4 (рис.1). В спектрах ФЛ структур А3 и А4, в противоположность структурам А1 и А2, не наблюдается линии ФЛ от квантовой ямы, образованной смачивающим слоем и заращивающим слоем  $\text{In}_{0.25}\text{Al}_{0.75}\text{As}$ , что говорит о вытеснении уровня в этой квантовой яме до уровня матрицы.

Для образцов А1 и А2, при росте температуры от 10 до 180 К наблюдается уменьшение ширины спектра фотолюминесценции (рис. 2). Этот эффект обусловлен



**Рис.1** Спектры ФЛ структур А1–А4 при комнатной температуре и высокой плотности оптической накачки ( $10 \text{ МВт}/\text{см}^2$ ). Используемые на графике сокращения: КЯ – квантовая яма, СС – смачивающий слой.

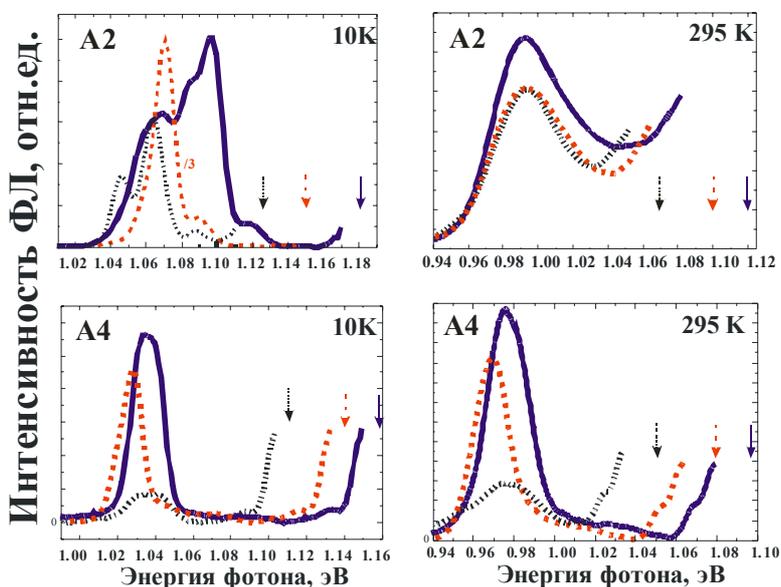


**Рис.2** Температурные зависимости полуширины пика ФЛ и интегральной интенсивности ФЛ (на вставке) структур А1–А4 при плотности оптической накачки  $10 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .

температурным выбросом носителей из КТ малого размера и их захватом в КТ большего размера с последующей излучательной рекомбинацией. В противоположность этому, в массивах КТ с покрывающими слоями  $\text{AlAs}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  (образцы А3 и А4) значение полуширины линии ФЛ основного состояния практически не изменяется в диапазоне температур 7–300 К. Кроме того, падение

интегральной интенсивности ФЛ структур А3 и А4 с увеличением температуры на порядок меньше по сравнению со структурами А1 и А2. Данные свойства структур А3 и А4 объясняются подавлением температурного выброса носителей в матрицу, что обусловлено увеличением энергетического зазора между уровнями основного и возбужденного состояний КТ, отсутствием уровня в  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  квантовой яме, расположенной рядом с КТ, а также увеличением энергии локализации носителей в точках относительно состояний континуума в случае использования  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  матрицы.

Было проведено исследование спектров возбуждения ФЛ и резонансной ФЛ в диапазоне температур от 7 К до комнатной температуры для структур А2 и А4



**Рис.3** Спектры резонансной ФЛ образцов А2 и А4 при температурах 10 К и 295 К при различных энергиях возбуждения (указаны стрелками на графиках).

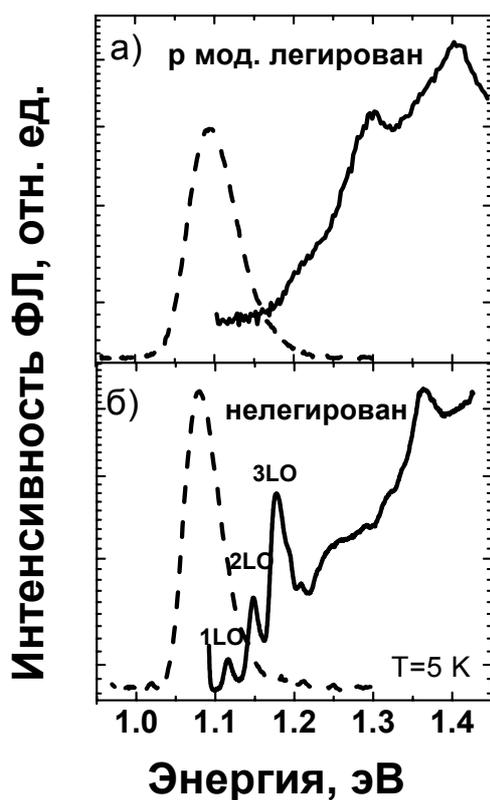
(рис.3). При низких температурах на спектрах обеих структур наблюдаются резонансные линии, отстоящие от энергии возбуждения на кратное количество ЛО фононов [2\*]. Это означает, что носители, селективно возбужденные в КТ с определенной энергией основного состояния, не могут перераспределяться по всему ансамблю, т.е. реализуется неравновесное распределение носителей в ансамбле КТ.

Однако при комнатной температуре резонансных особенностей в структуре А2 не наблюдается, т.е. неравновесное распределение меняется на равновесное, что также подтверждается температурной зависимостью ширины спектра ФЛ (рис. 2). В противоположность этому, в структурах А3 и А4, в силу высокой локализации носителей, резонансные особенности наблюдаются и при комнатной температуре. Таким образом, в данных структурах сохраняется неравновесное распределение

носителей, что согласуется с тем, что полуширина спектра ФЛ не зависит от температуры.

В третьей части главы изучен вопрос о максимальной возможной величине длинноволнового сдвига ФЛ КТ InAs, покрытых слоями AlAs/ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ . Исследовалось влияние количества InAs, осаждаемого для формирования начальных КТ, а также влияние состава и толщины покрывающего слоя  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ . Показано, что наращивание начальных КТ, полученных осаждением 2.5 МС InAs, тонкими слоями AlAs (2МС) и  $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$  (4 нм) позволяет достичь длины волны 1350 нм при сохранении высокого структурного и оптического качества образца. Продемонстрирована лазерная генерация при комнатной температуре на длине волны 1343 нм.

В четвертой части главы было исследовано влияние модулированного легирования на оптические свойства КТ InAs/GaAs. Легирование примесью р-типа



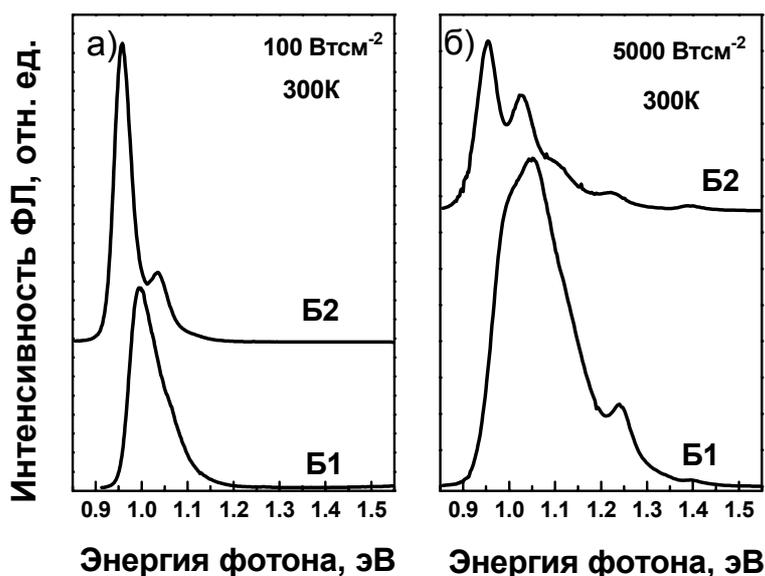
**Рис.4** Спектры фотолюминесценции (пунктирные линии) и возбуждения фотолюминесценции (сплошные линии) образца, легированного примесью р-типа (а), а также нелегированного образца (б) при 5 К.

осуществлялось в слой GaAs, находящийся в непосредственной близости от КТ. На спектре возбуждения ФЛ нелегированного образца (рис.4б) хорошо видны пики, соответствующие LO-фононным репликам. В противоположность, на спектре возбуждения ФЛ модулированно-легированных образцов особенности, связанные с 1LO и 2LO фононами отсутствуют, а пик, соответствующий 3LO реплике, является слабым и широким (рис.4а). Кроме того, основное состояние эффективно возбуждается только в том случае, если энергия фотона превышает энергию перехода, соответствующую основному состоянию, более чем на 150 мэВ. Данный коротковолновый сдвиг в спектре возбуждения говорит о том, что

поглощение на определенных энергиях запрещено вследствие заполнения дырочных подуровней в КТ.

**Вторая глава** посвящена исследованию особенностей безызлучательной рекомбинации и латерального транспорта электронов и дырок в структурах с квантовыми точками.

В первой части главы предложен оригинальный метод уменьшения плотности дислокаций в процессе роста, а также экспериментально и теоретически исследована фотолюминесценция структур с КТ с учетом безызлучательной рекомбинации. Проведено сравнение интенсивности ФЛ двух структур (Б1 и Б2) с КТ. Плотность дислокаций для структур Б1 и Б2 составила  $1.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  и  $2.2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , соответственно. При комнатной температуре и плотности возбуждения  $100 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  обе структуры демонстрируют примерно одинаковую интенсивность ФЛ (рис.5,а) несмотря на худшее кристаллическое качество структуры Б2. Однако при плотности накачки  $5000 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  (рис.5,б.) интенсивность ФЛ структуры Б1 существенно выше, чем структуры Б2. Низкая чувствительность эффективности ФЛ в структурах с квантовыми точками к присутствию дислокаций качественно объясняется тем, что при умеренных плотностях накачки и не слишком высоких температурах концентрация носителей в смачивающем слое и GaAs матрице, которые могли бы



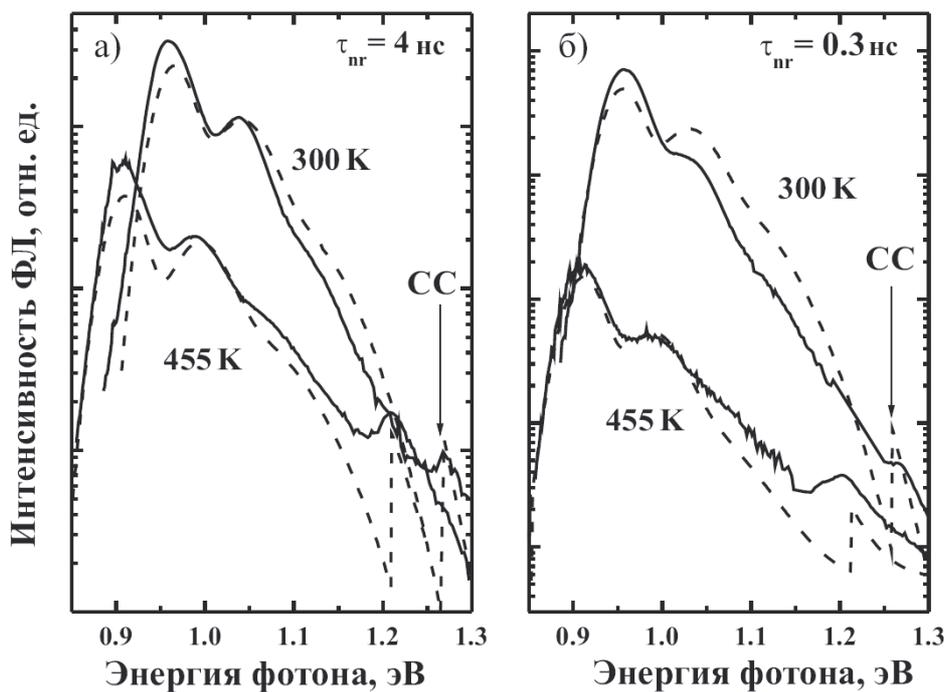
**Рис.5** Спектры фотолюминесценции структур Б1 и Б2 при плотности накачки  $100 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  (а) и  $5000 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$  (б). Спектры сняты при комнатной температуре.

диффундировать к дислокациям, достаточно мала. Таким образом, носители в КТ как бы “не чувствуют” дислокации, и обычные условия эксперимента не позволяют оценить степень кристаллического совершенства структуры.

Для уменьшения плотности дислокаций нами предложен специальный отжиг КТ в процессе роста. Квантовые точки заращаются тонким слоем (несколько нанометров) GaAs при 480°C, и затем температура подложки увеличивается до 600°C. Слой GaAs полностью покрывает упруго-напряженные КТ, в то время как вершина больших дислоцированных объектов остается открытой. При повышении температуры происходит испарение дислоцированных КТ, не полностью покрытых GaAs, а также отжиг структуры. Форма и размер упруго-напряженных точек при отжиге почти не меняется. Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, использование данного метода позволяет уменьшить плотность дислокаций на 1–2 порядка.

Нами было проведено моделирование спонтанного излучения двух структур с КТ в диапазоне температур 20–175°C. Первая структура была выращена обычным способом, а вторая с использованием описанного выше метода уменьшения плотности дислокаций. Моделирование спонтанного излучения из КТ было основано на теоретическом подходе, предложенном в работе [3\*]. Однако для более точного описания эксперимента нами было предложено дальнейшее развитие модели, в которую была включена реалистическая диаграмма энергетических уровней в КТ, квантовая яма, образованная смачивающим слоем и заращающим слоем InGaAs, а также безызлучательная рекомбинация в квантовой яме и матрице. В качестве подгоночного параметра для описания уменьшения интенсивности ФЛ с ростом температуры было использовано время безызлучательной рекомбинации  $\tau_{nr}$ . В результате подгонки были определены времена безызлучательной рекомбинации для образца, выращенного с использованием метода уменьшения плотности дислокаций, и образца, выращенного обычным способом, которые соответственно составили 4 и 0.3 нс (рис.6). Меньшее время безызлучательной рекомбинации для образца, выращенного без использования метода уменьшения плотности дислокаций, согласуется с наличием в нем дислоцированных КТ. Разница в интегральных интенсивностях ФЛ данных образцов монотонно растет с увеличением температуры.

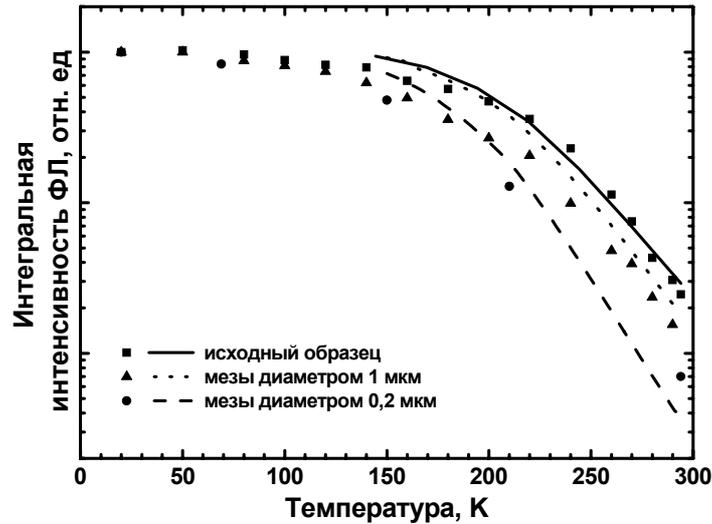
При комнатной температуре и плотности возбуждения  $5000 \text{ Вт}\cdot\text{см}^{-2}$  интегральная интенсивность ФЛ структуры, выращенной обычным способом,



**Рис.6** Спектры фотолуминесценции образцов, выращенных с использованием метода уменьшения плотности дислокаций (а) и обычным способом (б). Спектры, полученные с помощью теоретического моделирования, показаны пунктиром.

примерно в 1.5 раза ниже, чем у структуры, выращенной с использованием метода уменьшения плотности дислокаций. В то же время, при  $140^\circ\text{C}$  разница в интегральных интенсивностях ФЛ структур увеличивается до 11 раз. Таким образом, исследования ФЛ при повышенных температурах позволяют более объективно оценить относительное кристаллическое качество образцов с КТ.

Во второй части главы экспериментально и теоретически исследована ФЛ мез малого размера  $3\text{--}0.2 \text{ мкм}$ , содержащих КТ InAs. Мезы были изготовлены методами электронной литографии и плазмохимического травления. В противоположность мезам с квантовыми ямами, где интенсивность ФЛ сильно падает при повышении температуры выше  $40 \text{ К}$ , ФЛ из мез с КТ остается интенсивной вплоть до комнатной температуры. Так, например, при комнатной температуре ФЛ мез самого малого размера ( $0.2 \text{ мкм}$ ) всего лишь в 3.5 раза слабее ФЛ исходного (нетравленного) образца (рис. 7). Для объяснения данного результата было проведено моделирование ФЛ из мез. В модель для ФЛ из объемной структуры были добавлены диффузионные уравнения, описывающие пространственное распределение носителей в мезе с учетом



**Рис.7** Температурная зависимость интегральной интенсивности ФЛ для исходного образца, в котором мезы не были сформированы, и для массивов мез диаметром 1 мкм и 0.2 мкм. Экспериментальные результаты показаны символами, результаты расчетов показаны линиями.

их безызлучательной рекомбинации на боковых поверхностях мезы. Моделирование показало, что при рассматриваемых плотностях накачки концентрация носителей в смачивающем слое и матрице мала по сравнению с концентрацией носителей в КТ. Таким образом, доля носителей, которые могут диффундировать к боковым поверхностям мезы и безызлучательно рекомбинировать там, мала. Моделирование температурных зависимостей интенсивности ФЛ позволило определить коэффициент диффузии для носителей в структурах с КТ, который составил  $0.05 \text{ см}^2\text{с}^{-1}$ .

**Третья глава** посвящена исследованию пороговых, температурных и спектральных характеристик лазеров на основе квантовых точек InAs/InGaAs, излучающих в диапазоне 1.3 мкм. КТ формировались на подложках GaAs путем зарастивания начальных островков InAs, сформированных в режиме роста Странски–Крастанова, тонким слоем InGaAs.

В первой части главы представлены результаты исследования спектров усиления лазера на основе трех слоев КТ InAs/InGaAs, а также зависимостей его основных характеристик от длины резонатора. Спектры модального усиления исследовались методом варьирования длины лазерного резонатора [4\*]. При плотностях тока около  $900 \text{ А/см}^2$  наблюдается насыщение усиления основного

состояния КТ. Эффект насыщения усиления является следствием конечной плотности КТ, неоднородного уширения линии излучения и сравнительно большого времени излучательной рекомбинации. Максимальное модальное усиление основного состояния для исследуемого лазера на основе 3 слоев КТ составило  $12 \text{ см}^{-1}$ .

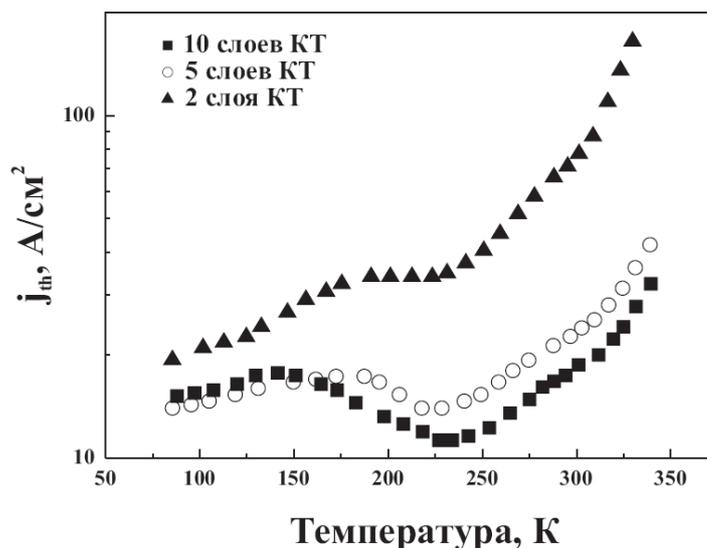
Во второй части главы проводится численное моделирование спектров усиления и пороговых характеристик лазеров на КТ, а также сопоставление результатов моделирования с экспериментом. Результаты расчетов хорошо описывают все основные характеристики лазеров на КТ: форму спектров усиления, перескок лазерной генерации с основного на первое и затем второе возбужденные состояния с уменьшением длины резонатора и т.д. При этом, чем больше максимальное усиление основного состояния, тем позже (т.е. при меньших длинах резонатора) происходит перескок на возбужденное состояние. В случае, когда усиление второго возбужденного состояния достаточно велико, генерация может непосредственно переключаться с основного на второе возбужденное состояние. Пороговые характеристики лазеров на КТ также очень чувствительны к величине фактора оптического ограничения ( $\Gamma$ ). Сравнительно небольшое изменение в  $\Gamma$ -факторе (на 25 процентов) может вызывать рост пороговой плотности тока более чем на порядок или даже приводить к невозможности достижения лазерной генерации. Действительно, максимальное модальное усиление пропорционально  $\Gamma$ -фактору. Таким образом, в лазерах на КТ, в которых максимальное усиление основного состояния достаточно мало, чрезвычайно важно оптимизировать параметры оптического волновода. Результаты такой оптимизации будут представлены ниже.

Для достижения количественного соответствия теоретической и экспериментальной зависимостей пороговой плотности тока от длины резонатора необходимо учесть безызлучательную рекомбинацию в квантовой яме и волноводном слое. Наилучшее соответствие достигается в случае, если выбрать время безызлучательной рекомбинации равным 1 нс.

В третьей части главы рассматриваются низкопороговые лазеры на КТ. Для уменьшения пороговой плотности тока нами использовалась методика уменьшения плотности дислокаций, описанная в главе 2, а также оптимизация параметров роста, направленная на достижение высокой степени планарности интерфейса между эмиттером AlGaAs и волноводом GaAs. Лазеры, выращенные в оптимизированных

условиях с применением методики уменьшения плотности дислокаций демонстрируют в несколько раз меньшие пороговые плотности тока по сравнению с лазерами, выращенными в обычных условиях, причем разница в пороговых плотностях тока резко увеличивается с ростом числа слоев точек в активной области. Действительно, в случае сильно напряженных структур плотность дислокаций может увеличиваться при осаждении последующих слоев КТ и тем самым, наличие даже малой плотности дислокаций в нижних слоях является чрезвычайно критичным в случае лазеров с несколькими слоями КТ. Минимальная пороговая плотность тока  $30 \text{ А/см}^2$  была достигнута в полосковом лазере длиной 4 мм с двумя сколотыми гранями, при этом дифференциальная квантовая эффективность составила 44%.

В четвертой части главы рассмотрены температурные зависимости характеристик лазеров на основе КТ InAs/GaAs. Температурная зависимость пороговой плотности для лазеров с 2, 5 и 10 слоями КТ, нормированная на количество слоев КТ, представлена на рис. 8. Как видно из рисунка, зависимость носит немонотонный *N*-образный характер, наиболее ярко выраженный для лазеров с 5 и 10 слоями КТ. Для объяснения *N*-образной зависимости, необходимо учесть, что разница энергий уровней размерного квантования дырок в КТ излучающих в диапазоне 1.3 мкм составляет всего лишь 8–13 мэВ [5\*]. Увеличение температуры приводит к росту

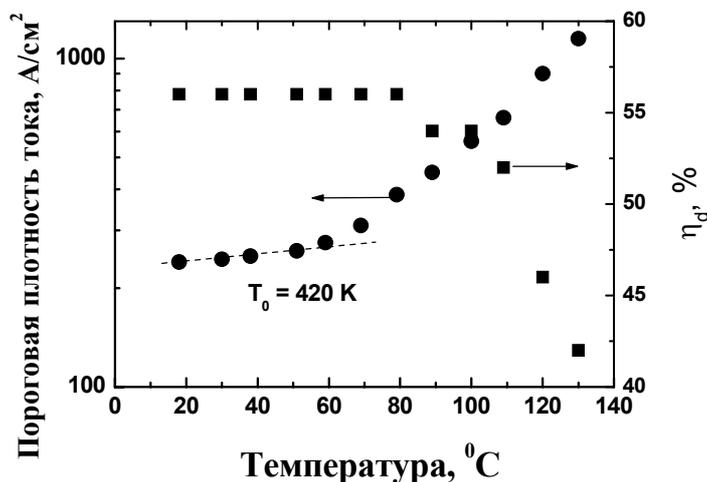


**Рис.8** Температурная зависимость пороговой плотности тока ( $j_{th}$ ) лазерных гетероструктур с 2, 5 и 10 слоями квантовых точек в качестве активной области, нормированная на число слоев КТ. Во всех случаях длина резонатора равнялась 1.5 мм.

термического заселения близкорасположенных уровней размерного квантования дырок и тем самым уменьшает концентрацию дырок на основном состоянии. Для компенсации ухода дырок и достижения порогового усиления требуется дополнительная инжекция электронно-дырочных пар, что и обуславливает увеличение порога лазерной генерации в области низких температур. Дальнейший рост температуры ведет к увеличению скорости выброса электронов и дырок из КТ малого размера с малой энергией локализации, и их захвату в КТ большего размера (переходу от неравновесного к равновесному распределению носителей в массиве КТ). Этот процесс приводит к заужению спектра усиления и уменьшению уровня накачки, требуемого для достижения порогового усиления. Дальнейшее увеличение температуры приводит к росту выброса электронов и дырок в матрицу из точек как малого, так и большого размера. Таким образом, концентрация носителей и соответственно интенсивность их излучательной и безызлучательной рекомбинации в матрице возрастает, что и приводит к увеличению пороговой плотности тока. *N*-образный вид температурной зависимости наиболее ярко выражен для структур с 5 и 10 слоями точек, имеющих низкую пороговую плотность тока. При более высоком пороговом токе (структура с 2 слоями КТ) число носителей в КТ больше, и эффекты перераспределения носителей между точками менее выражены.

В пятой части главы исследовано влияние *p*-легирования активной области на температурную стабильность пороговой плотности тока лазеров. Показано, что увеличение степени заселенности дырками основного состояния КТ может быть достигнуто при помощи легирования «спейсерных» областей GaAs вблизи КТ акцепторной примесью. Дырки из легированных областей захватываются в КТ, и тем самым компенсируется эффект их термического ухода с основного состояния КТ. Увеличение степени легирования приводит к росту характеристической температуры и увеличению диапазона температурной стабильности пороговой плотности тока. В лазере со степенью легирования порядка  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  акцепторов на одну плоскость КТ получено значение характеристической температуры 1200 К в диапазоне температур 15–75 °С, а также постоянное значение дифференциальной квантовой эффективности в диапазоне температур 15–65 °С. В то же время, слишком высокая степень легирования приводит к увеличению пороговой плотности тока и внутренних потерь. Оптимизация уровня легирования, толщины и расположения легированных GaAs

слоев, а также использование около активной области ультратонких барьеров  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ , препятствующих уходу носителей в эмиттеры позволило реализовать высокую дифференциальную квантовую эффективность 56 %, высокую характеристическую температуру 420 К (рис. 9) и максимальную оптическую мощность 4.4 Вт.



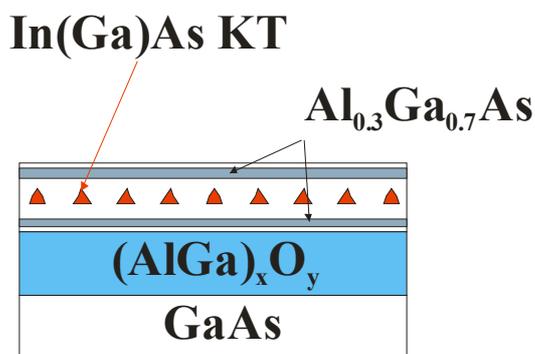
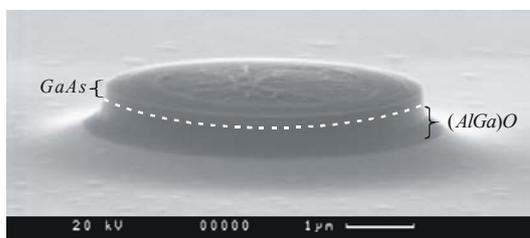
**Рис.9** Температурная зависимость пороговой плотности тока ( $j_{th}$ ) и дифференциальной квантовой эффективности ( $\eta_d$ ) структуры с оптимизированным легированием активной области.

В пятой части главы представлены результаты оптимизации лазера на КТ для достижения высокого модального усиления. Увеличение мольной доли Al в эмиттерных слоях AlGaAs с 30 до 80% привело к росту фактора оптического ограничения с 0.09 до 0.13, кроме того, была увеличена плотность КТ в активной области. В результате, максимальное усиление составило  $46 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 1325 нм при пороговой плотности тока  $520 \text{ А/см}^2$ . Достигнута выходная мощность в непрерывном режиме более 2.5 Вт. Использование КТ позволило реализовать широкий спектр усиления. Модальное усиление превышает  $20 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне длин волн 1315–1345 нм при плотности тока  $500 \text{ А/см}^2$

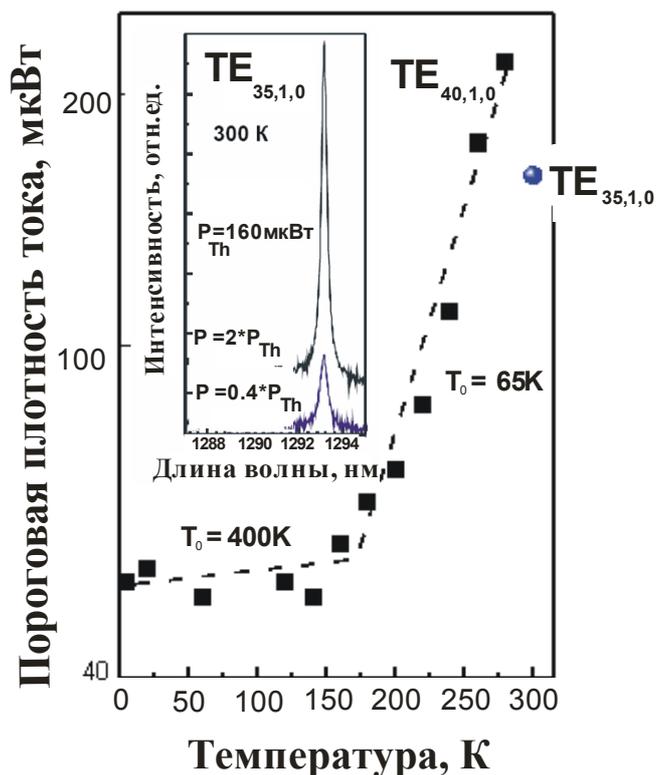
**Четвертая глава** посвящена исследованию поверхностно-излучающих лазеров на основе вертикального микрорезонатора, а также микродисковых лазеров с активной областью на основе квантовых точек.

В первой части рассматривается аналитическая модель микродискового резонатора. С помощью метода эффективного показателя преломления трехмерная

система приведена к двумерной системе, в которой микродиск можно представить в виде цилиндрического волновода, внутри которого волна распространяется вдоль периферии диска, а в направлении роста образуется стоячая волна. Моды диска могут быть найдены из граничного условия первого рода (поле на границе диска равно нулю).



а)



б)

**Рис.10** Микрофотография микродиска, полученная методом растровой электронной микроскопии (сверху), и его схематическое изображение (снизу) (а); температурная зависимость пороговой плотности фотовозбуждения микродиска с активной областью на основе InAs/InGaAs КТ для моды  $TE_{40,1,0}$ , отдельно показана пороговая плотность фотовозбуждения для моды  $TE_{35,1,0}$  (б). На вставке изображены спектры микрофотолюминесценции для моды  $TE_{35,1,0}$  при 300 К.

Во второй части исследованы характеристики микродисковых лазеров с активной областью на основе КТ InGaAs излучающих в диапазоне 0.98 мкм и КТ InAs/InGaAs, излучающих в диапазоне 1.3 мкм. Микродиски с ассиметричным волноводом воздух/GaAs/(AlGa)<sub>x</sub>O<sub>y</sub> диаметром 4–7 мкм были изготовлены с использованием селективного окисления слоя AlGaAs (рис.10, а). Получена лазерная генерация спектрального диапазона 0.98 мкм в микродисковых лазерах диаметром 5–

6 мкм с КТ InGaAs при оптической накачке в диапазоне температур 5–180 К. Исчезновение генерации при температурах выше 180 К обусловлено температурным выбросом носителей из КТ в матрицу вследствие сравнительно слабой локализации носителей в КТ InGaAs с последующей безызлучательной рекомбинацией в матрице GaAs и на границах микродиска. Применение InAs/InGaAs квантовых точек с большей, по сравнению с КТ InGaAs, глубиной локализации носителей позволило получить лазерную генерацию в диапазоне температур от 4 до 280 К через моду  $TE_{40,1,0}$  положение которой при 4 К совпадало с максимумом спектра усиления КТ. Однако увеличение рассогласования данной моды и максимума спектра усиления привело к увеличению пороговой мощности оптической накачки при температурах выше 170 К (рис.10,б). При комнатной температуре лазерная генерация была достигнута на резонансной моде  $TE_{35,1,0}$ , положение которой было близко к максимуму спектра усиления.

В третьей части главы приведены результаты исследования поверхностно-излучающих лазеров на основе вертикального микрорезонатора (ПИЛВМ) диапазона 1.3 мкм с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs. Структуры выращивались на подложках GaAs. В ПИЛВМ использовались окисленные Брэгговские зеркала  $GaAs-(AlGa)_xO_y$  и окисленные токовые апертуры разного диаметра. Максимальная дифференциальная эффективность составила 64%, максимальная выходная мощность 650 мкВт. Длина волны лазерной генерации находилась в диапазоне 1.28–1.306 мкм в зависимости от геометрического положения прибора на пластине. Вследствие эффекта подавления латерального транспорта носителей в структурах с КТ пороговый ток (1.2 мА) остается постоянным при уменьшении диаметра апертуры от 8 до 0.5 мкм, что согласуется с результатами исследования ФЛ из мез. Наличие окисленной апертуры приводит к трехмерному ограничению электромагнитной волны в активной области лазера, что проявляется в формировании дискретных трехмерных мод. В случае апертуры размером 0.5 мкм спектральное расщепление между фундаментальной и первой поперечной модами составляет 30 нм.

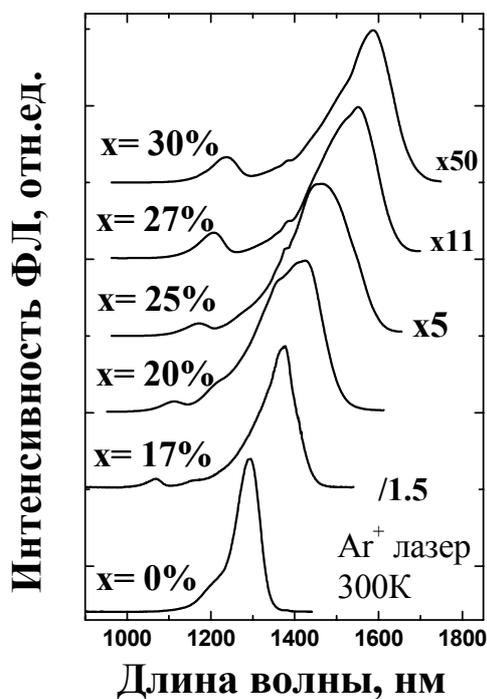
**Пятая глава** посвящена получению КТ InAs, сформированных в метаморфных матрицах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на подложках GaAs, и исследованию оптических и структурных свойств этих КТ.

В первой части главы описаны методы синтеза метаморфных структур. Предложенный подход основан на использовании оригинальных технологических приемов выращивания буферного слоя InGaAs на подложке GaAs, которые позволяют перейти от постоянной решетки GaAs к постоянной решетки InGaAs таким образом, что большинство дислокаций не распространяется в направлении роста, а остается внутри переходного слоя. Метод уменьшения плотности дислокаций в случае выращивания метаморфных слоев состоит в следующем: на слой  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  осаждается тонкий напряженный слой  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y > x$ ), который затем покрывается слоем AlAs, имеющим высокую температурную стойкость. Вблизи выхода дислокаций постоянная решетки материала близка к постоянной решетки объемного  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ , тогда как в областях между дислокациями она меньше. Слой AlAs ложится на участки с наиболее близкой постоянной решетки и не покрывает дислоцированные участки  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ . При дальнейшем высокотемпературном отжиге неприкрытые дефектные области испаряются или растравливаются в зависимости от их размеров. В растравленных областях происходит изменение поля напряжения дислокаций, что может приводить к изменению направления их распространения при последующем выращивании. После процесса высокотемпературного отжига производится дальнейшее осаждение  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на поверхность с меньшей плотностью дислокаций. Данная процедура повторяется вплоть до получения слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , обладающего высоким кристаллическим совершенством, на котором выращивается остальная часть структуры, например лазер. Эффективность предложенного метода подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии и результатами оптических исследований. Интенсивность ФЛ образца, выращенного с применением данного подхода, примерно в 40 раз больше, чем у образца, выращенного обычным способом.

Во второй части главы обсуждаются результаты оптимизации количества осажденного InAs при формировании КТ на поверхности метаморфного слоя  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  с целью достижения максимально возможной длины волны ФЛ при сохранении высокого структурного и оптического качества образца. По мере увеличения количества осажденного InAs от 2.2 до 2.6 монослоев (МС) наблюдается

увеличение размеров КТ и соответствующий длинноволновый сдвиг линии ФЛ. Однако, при превышении значения 2.6 мс, происходит резкое падение интенсивности ФЛ, и длина волны излучения перестает расти, что объясняется превышением КТ критического размера и образованием дислокаций. Таким образом, при данных условиях роста оптимальное количество InAs для формирования начальных КТ равно 2.6 мс. Дальнейшее увеличение длины волны излучения было достигнуто путем зарастивания начальных КТ тонким слоем InGaAs. В частности, покрытие начальных КТ, полученных осаждением 2.6 мс InAs, слоем  $In_{0.4}Ga_{0.6}As$  толщиной 5 нм позволило реализовать яркую ФЛ на линии волны 1.48 мкм.

Третья часть главы посвящена исследованию структурных и оптических свойств метаморфных КТ в  $In_xGa_{1-x}As$  матрицах различного состава. Синтез КТ

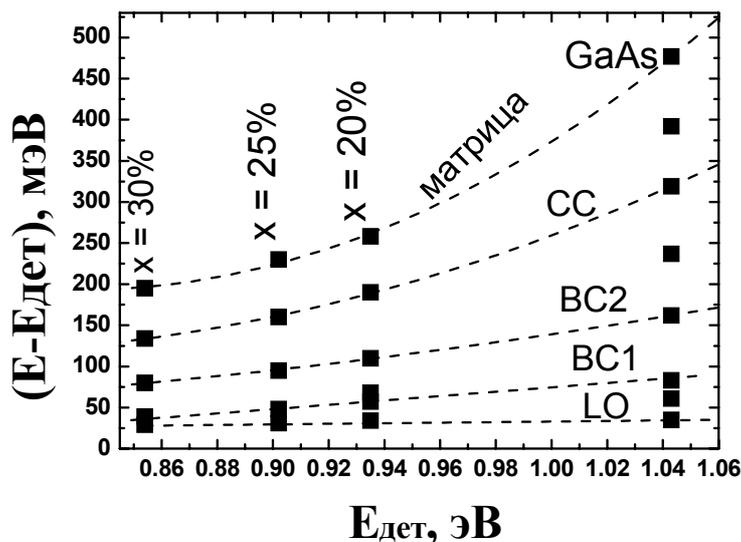


**Рис.11** Спектры фотолуминесценции структур с КТ в метаморфных матрицах различного состава при 300 К.

включает в себя формирование начальных островков InAs на поверхности  $In_xGa_{1-x}As$  ( $x=0 - 30\%$ ), которые затем покрываются слоем  $In_yGa_{1-y}As$  ( $y=x+0.2$ ) средней толщиной 2–5 нм. При увеличении концентрации индия в матрице от 0 до 20% происходит увеличение латерального размера КТ с 19 до 26 нм и поверхностной плотности массива КТ с  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  до  $10^{11} \text{ см}^{-2}$ . При увеличении содержания индия в матрице  $In_xGa_{1-x}As$  от 0 до 30% происходит монотонное возрастание длины волны излучения КТ от 1.3 до 1.6 мкм при комнатной температуре (рис. 11). Однако при этом интенсивность ФЛ уменьшается примерно в 50 раз вследствие частичного проникновения дислокации из буферного метаморфного слоя в слои с КТ.

В четвертой части представлены результаты исследования энергетического спектра КТ, сформированных в метаморфных матрицах различного состава, методом спектроскопии ФЛ и возбуждения люминесценции. На рис. 12 представлены положения энергий возбужденных состояний и матрицы для структур с КТ в

метаморфных матрицах различного состава, отсчитанных от энергии основного состояния. Положение максимума спектра ФЛ, которое соответствовало энергии детектирования, отложено по оси абсцисс. Как видно из рис. 12, увеличение содержания индия в метаморфной матрице приводит к уменьшению энергии локализации носителей в КТ относительно матрицы, а также к уменьшению энергетического расстояния между уровнями размерного квантования в КТ.



**Рис.12** Относительные положения максимумов линий на спектрах возбуждения ФЛ для структур с КТ в метаморфных матрицах различного состава. Показано положение линий, связанных с LO фононной репликой, первым и вторым возбужденными состояниями (BC1, BC2), смачивающем слое и матрицей.

В пятой части представлены результаты исследования метаморфных лазеров на КТ. Для лазера с активной областью на основе десяти слоев КТ минимальная пороговая плотность тока составила  $800 \text{ А/см}^2$ , длина волны генерации  $1490 \text{ нм}$ . В лазерах с широким контактом продемонстрирована выходная мощность  $7 \text{ Вт}$  в импульсном режиме, характеристическая температура  $T_0$  составила  $65 \text{ К}$ . В одномодовых лазерах с шириной гребешка  $6 \text{ мкм}$  достигнута выходная мощность более  $220 \text{ мВт}$  в непрерывном режиме.

## Основные результаты работы

1. Исследованы особенности безызлучательной рекомбинации в структурах с квантовыми точками. Показано, что при температурах ниже комнатной и умеренных плотностях фотовозбуждения ( $0.5\text{--}500\text{ Вт/см}^2$ ) структуры, в которых плотность дислоцированных квантовых точек отличается более, чем в два раза, могут иметь одинаковую интегральную интенсивность фотолюминесценции. В противоположность этому, интегральная интенсивность фотолюминесценции таких структур при высоких плотностях фотовозбуждения (выше  $5000\text{ Вт/см}^2$ ) и/или повышенных температурах (более  $150^\circ\text{C}$ ) коррелирует с плотностью дислоцированных квантовых точек, полученной по данным электронной микроскопии, и тем самым позволяет оценить кристаллическое совершенство образца.

2. Разработана методика уменьшения плотности дислоцированных квантовых точек непосредственно в процессе роста. Показано, что покрытие массива точек InAs слоем GaAs толщиной несколько нанометров с последующим повышением температуры подложки до  $600^\circ\text{C}$  приводит к селективному испарению дислоцированных точек большого размера и в то же время не влияет на упруго-напряженные точки. Сравнение результатов моделирования спектров фотолюминесценции с экспериментальными данными показало, что времена безызлучательной рекомбинации в структурах, выращенных с использованием метода уменьшения плотности дислоцированных квантовых точек, на порядок больше, чем в структурах, выращенных в стандартных условиях.

3. Экспериментально и теоретически исследована фотолюминесценция мез малого размера  $3\text{--}0.2\text{ мкм}$ , содержащих квантовые точки InAs. Показано, что при использованных плотностях накачки концентрация носителей в смачивающем слое и матрице мала по сравнению с концентрацией носителей в квантовых точках, что объясняется очень быстрым захватом носителей в квантовые точки и их сильной локализацией. Таким образом, доля носителей, которые могут диффундировать к боковым поверхностям мезы и безызлучательно рекомбинировать там, мала, что обуславливает слабую зависимость нормированной на площадь интегральной интенсивности фотолюминесценции от диаметра мез. На основе сравнения

экспериментальных результатов и данных теоретического моделирования определены коэффициенты диффузии носителей в структурах с квантовыми точками.

4. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование усиления и пороговых характеристик длинноволновых лазеров на квантовых точках с учетом безызлучательной рекомбинации в волноводном слое и квантовой яме, окружающей квантовые точки. Показано, что безызлучательная рекомбинация приводит к увеличению пороговой плотности тока в несколько раз по сравнению с теоретическим пределом. Удовлетворительное согласие теории и эксперимента достигается, если выбрать время безызлучательной рекомбинации в квантовой яме и волноводном слое около 1 нс.

5. Показано, что в квантовых точках InAs/GaAs, излучающих в диапазоне около 1.3 мкм, температурная зависимость пороговой плотности тока имеет  $N$ -образный характер. Основной вклад в увеличение пороговой плотности тока при низких температурах вносит заселение низших возбужденных дырочных уровней. При дальнейшем росте температуры уменьшение пороговой плотности тока обусловлено изменением распределения носителей в ансамбле квантовых точек с неравновесного на равновесное. В области температур, близких к комнатной, резкий рост пороговой плотности тока связан с выбросом носителей на более высокие уровни в КТ, а также в квантовую яму и матрицу.

6. Легирование GaAs между слоями с квантовыми точками InAs акцепторной примесью приводит к заселению основного дырочного состояния в точках и коротковолновому сдвигу в спектре поглощения. В лазерах на квантовых точках легирование активной области акцепторной примесью позволяет увеличить температурную стабильность пороговой плотности тока (характеристическую температуру  $T_0$ ). Чем выше степень легирования, тем больше  $T_0$ , однако при этом наблюдается увеличение пороговой плотности тока, внутренних потерь и уменьшение дифференциальной квантовой эффективности. Оптимизация уровня легирования, толщины и расположения легированных GaAs слоев, а также использование ультратонких барьеров  $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ , препятствующих уходу носителей в эмиттеры, позволило реализовать высокую дифференциальную квантовую эффективность 56 %, высокую характеристическую температуру 420 К и максимальную оптическую мощность 4.4 Вт.

7. Использование эмиттеров  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ , а также оптимизация толщины лазерного волновода и плотности квантовых точек в активной области, позволили реализовать максимальное усиление  $46 \text{ см}^{-1}$  на длине волны 1325 нм при пороговой плотности тока  $520 \text{ А/см}^2$ . Модальное усиление превышает  $20 \text{ см}^{-1}$  в широком диапазоне длин волн 1315–1345 нм при плотности тока  $500 \text{ А/см}^2$ .

8. Показано, что осаждение на подложку GaAs периодической последовательности слоев, состоящей из слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0\text{--}30\%$ ) толщиной порядка 0.1–1 мкм, слоя  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  ( $y > x$ ) толщиной порядка 10 нм и нескольких монослоев AlAs с последующим отжигом при температуре 500–600°C, позволяет уменьшить плотность прорастающих дислокаций и достичь высокого структурного совершенства последующего метаморфного слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0\text{--}30\%$ ).

9. Исследованы структурные и оптические свойства квантовых точек InAs в метаморфной матрице  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . С ростом состава по In в метаморфной матрице  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  происходит увеличение плотности и латерального размера квантовых точек, а также уменьшение разности энергий между подуровнями носителей заряда в точках и уменьшение энергии локализации носителей относительно континуума. Увеличение концентрации индия в матрице  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  от 0 до 30% приводит к сдвигу максимума линии фотолюминесценции квантовых точек от 1.3 до 1.59 мкм. Метаморфные лазеры с квантовыми точками, полученные при оптимальных режимах роста, демонстрируют длину волны излучения вплоть до 1.5 мкм, пороговую плотность тока менее  $800 \text{ А/см}^2$ , выходную мощность более 220 мВт для одномодового лазера в непрерывном режиме.

10. Исследованы способы управления формой, размером и спектром энергетических уровней квантовых точек InAs в матрицах GaAs или  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , излучающих в диапазоне длин волн, близком к 1.3 мкм. Показано, что при зарастивании квантовых точек InAs тонкими слоями AlAs/InAlAs происходит изменение формы квантовых точек и сдвиг линии ФЛ в сторону больших длин волн вплоть до 1.35 мкм, а также увеличивается энергетический зазор между основным и возбужденным состояниями квантовых точек ( $\Delta_{\text{EX}}$ ). В массивах квантовых точек, покрытых тонкими слоями AlAs и InAlAs, вследствие высокой энергии локализации носителей ( $\Delta_{\text{EX}}$  до 115 мэВ), а также присутствия барьеров AlAs около смачивающего слоя, реализуется неравновесное распределение носителей в диапазоне температур от 10 до 300 К.

11. Созданы высокодобротные полупроводниковые микродиски с активной областью на основе самоорганизующихся In(Ga)As квантовых точек различных типов с асимметричным волноводом воздух/GaAs/(AlGa)<sub>x</sub>O<sub>y</sub>. Продемонстрирована лазерная генерация спектрального диапазона 0.98 мкм вплоть до температуры 180 К при оптической накачке в микродисках с активной областью на основе квантовых точек InGaAs, полученных методом субмонослойных осадений. Применение квантовых точек InAs/InGaAs, полученных наращиванием начальных островков InAs тонким слоем InGaAs и имеющих большую энергию локализации носителей, позволило получить непрерывную лазерную генерацию в области 1.3 мкм вплоть до комнатной температуры.

12. Получены и исследованы поверхностно-излучающие лазеры на основе вертикального микрорезонатора с окисленными Брэгговскими зеркалами GaAs-(AlGa)<sub>x</sub>O<sub>y</sub>, окисленными токовыми апертурами и активной областью, содержащей три слоя квантовых точек InAs/InGaAs, излучающих в диапазоне 1.3 мкм. Показано, что за счет подавления латерального транспорта носителей пороговая плотность тока в поверхностно-излучающих лазерах на основе вертикального микрорезонатора с активной областью на квантовых точках при уменьшении диаметра токовой апертуры растет значительно слабее, чем в случае лазеров с активной областью на квантовых ямах.

### **Список основных публикаций по теме диссертации**

1. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, И.Г. Табатадзе, П.С. Копьев. Оптические свойства гетероструктур с квантовыми кластерами InGaAs–GaAs. // ФТП, **28**(8), 1483–1487 (1994).
2. N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, D. Bimberg, V.M. Ustinov, S.S. Ruvimov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, U. Richter, P. Werner, U. Gosele, and J. Heydenreich. Low threshold, large  $T_0$  injection laser emission from InGaAs quantum dots. // Electron. Lett., **30**, 1416–1417, 1994.
3. V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Yu. Egorov, N.N. Ledentsov, M.V. Maksimov, A.F. Tsatsul'nikov, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, and Zh.I. Alferov. MBE growth of (In,Ga)As self-assembled quantum dots for optoelectronic applications. // in *Devices*

*Based on Low-Dimensional Semiconductor Structures*, ed. by M. Balkanski, **14**, 91–94 (Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series 3: High Technology, 1996).

4. N. Kirstaedter, O.G. Schmidt, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, and Zh.I. Alferov. Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers. // *Appl. Phys. Lett.* **69**(9), 1226–1228 (1996).
5. O.G. Schmidt, N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, M.H. Mao, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov. Prevention of gain saturation by multi-layer quantum dot lasers. // *Electron. Lett.* **32**(14), 1302–1304 (1996).
6. М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, С.В. Зайцев, Н.Ю. Гордеев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, П.С. Копьев, А.О. Косоков, А.В. Сахаров, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Ф. Цацуньников, Ж.И. Алферов, J. Bohrer, D. Bimberg. Оптические свойства вертикально связанных квантовых точек InGaAs в матрице GaAs. // *ФТП*, **31**(6), 670–673 (1997).
7. D. Bimberg, N. Kirstaedter, N.N. Ledentsov, Zh.I. Alferov, P.S. Kop'ev, V.M. Ustinov, S.V. Zaitsev, M.V. Maximov. InGaAs/GaAs Quantum Dots Lasers. // in *Optical properties of Low Dimensional Semiconductors*, eds. G. Abstreiter, A. Aydinli, and J.–P. Leburton, **344**, 315–330 (NATO ASI Series. Series E: Applied Sciences – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1997).
8. M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, A.F. Tsatsul'nikov, A.V. Lunev, A.V. Sakharov, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, P.S. Kop'ev, L.V. Asryan, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, A.O. Kosogov and P. Werner. High-power continuous-wave operation of a InGaAs/AlGaAs quantum dot laser. // *J. Appl. Phys.*, **83**(10), 5561–5563 (1998).
9. A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, N.A. Maleev, N.N. Ledentsov, A.F. Tsatsul'nikov, M.V. Maximov, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, D. Bimberg, and Zh.I. Alferov. Control of the emission wavelength of self-organized quantum dots: main achievements and present status. // *Semicond. Sci. Technol.*, **14**(6), 575–581 (1999).
10. Yu.M. Shernyakov, D.A. Bedarev, E.Yu. Kondrat'eva, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, M.V. Maximov, S.S. Mikhlin, A.F. Tsatsul'nikov, V.M. Ustinov,

- B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, and D. Bimberg. 1.3  $\mu\text{m}$  GaAs-based laser using quantum dots obtained by activated spinodal decomposition. // *Electron. Lett.*, **35**(11), 898–900 (1999).
11. Б.В. Воловик, А.Ф. Цацульников, Д.А. Бедарев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, Ю.Г. Мусихин, А.А. Суворова, В.М. Устинов, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг, П. Вернер. Длинноволновое излучение в структурах с квантовыми точками, полученными при стимулированном распаде твердого раствора на напряженных островках. // *ФТП*, **33**(8), 990–995 (1999).
12. A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, Yu.M. Shernyakov, S.S. Mikhrin, N.A. Maleev, E.Yu. Kondrat'eva, D.A. Livshits, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. Continuous wave operation of long-wavelength quantum dot diode laser on a GaAs substrate. // *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**(11), 1345–1347 (1999).
13. M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, D.A. Bedarev, E.Yu. Kondrat'eva, P.S. Kop'ev, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhrin, A.F. Tsatsul'nikov, V.M. Ustinov, B.V. Volovik, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Single transverse mode operation of long wavelength ( $\sim 1.3 \mu\text{m}$ ) InAs GaAs quantum dot laser. // *Electron. Lett.*, **35**(23), 2038–2039 (1999).
14. J. A. Lott, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, M.V. Maximov, B.V. Volovik, Zh.I. Alferov, and D. Bimberg. InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ . // *Electron. Lett.*, **36**(16), 1384–1385 (2000).
15. M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, T. Maka, and C. M. Sotomayor Torres. Carrier relaxation in InGaAs-GaAs quantum dots formed by activated alloy phase separation. // *Nanotechnology*, **11**(4), 309–313 (2000).
16. M.V. Maximov, I.L. Krestnikov, Yu.M. Shernyakov, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, Yu.G. Musikhin, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, A. Yu. Chernyshov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, T. Maka, C. M. Sotomayor Torres. InGaAs-GaAs Quantum Dots for application in longwavelength (1.3 micron) resonant vertical cavity enhanced devices. // *J. Electron. Mat.*, **29**(3), 487–494 (2000).

17. M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, E.Yu. Kondrat'eva, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, Yu.G. Musikhin, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, R. Heitz, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Optical properties of quantum dots formed by activated spinodal decomposition for GaAs-based lasers emitting at  $\sim 1.3$  micron. // *Microelectronic Engineering*, **51–52**, 61–72 (2000).
18. N.N. Ledentsov, M. Grundmann, F. Heinrichsdorff, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, Zh.I. Alferov, and J.A. Lott. Quantum-dot heterostructure lasers. // *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.*, **6(3)**, 439–451 (2000).
19. M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, D.S. Sizov, Yu.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, R. Heitz, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Yu.G. Musikhin and W. Neumann. Tuning quantum dot properties by activated phase separation of an InGa(Al)As alloy grown on InAs stressors. // *Phys. Rev. B*, **62(24)**, 16671–16680 (2000).
20. M.V. Maximov, L.V. Asryan, Yu.M. Shernyakov, A.F. Tsatsul'nikov, I.N. Kaiander, V.V. Nikolaev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, and D. Bimberg. Gain and threshold characteristics of long wavelength lasers based on InAs/GaAs quantum dots formed by activated alloy phase separation. // *IEEE J. Quantum Electron.*, **37(5)**, 676–683 (2001).
21. A.R. Kovsh, N. Maleev, A.E. Zhukov, S.S. Mikhrin, A.P. Vasil'ev, Yu.M. Shernyakov, M.V. Maximov, D.A. Livshits, V.M. Ustinov, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. InAs/InGaAs/GaAs quantum dot lasers of  $1.3 \mu\text{m}$  range with high (88%) differential efficiency. // *Electronics Letters*, **38**, 1104–1106 (2002).
22. Д.С. Сизов, М.В. Максимов, А.Ф. Цацульников, Н.А. Черкашин, Н.В. Крыжановская, А.Б. Жуков, Н.А. Малеев, С.С. Михрин, А.П. Васильев, Р. Селин, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг, Ж.И. Алферов. Влияние условий отжига на испарение дефектных областей в структурах с квантовыми точками InGaAs в матрице GaAs. // *ФТП*, **36(9)**, 1097–1023 (2002).
23. M.V. Maximov, D.A. Bedarev, V.V. Nikolaev, C.M. Sotomayor Torres, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Experimental and Theoretical Studies of Carrier Lateral Transport from Small ( $3\text{--}0.2 \mu\text{m}$ ) Mesas with Self-Organized Quantum Dots. //

*Proceedings 26th International Conference on the Physics of Semiconductors.*  
Edinburgh, UK, (July 29 – August 2, 2002).

24. M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, I.N. Kajander, Yu.M. Shernyakov, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, N.A. Maleev, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, N.A. Cherkashin, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. Reduction of dislocation density during epitaxial growth of self-organised quantum dots. // *Proceedings 26th International Conference on the Physics of Semiconductors.* Edinburgh, UK, (July 29 – August 2, 2002).
25. N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, N.A. Maleev, S.S. Mikhlin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, V.M. Ustinov, D. Bimberg. High performance quantum dot lasers on GaAs substrates operating in 1.5  $\mu\text{m}$  range. // *Electronics Letters*, **39**(24), 1729–1730 (2003).
26. И.И. Новиков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, С.С. Михрин, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Ж.И. Алферов, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг. Температурные характеристики низкопороговых высокоэффективных лазеров на квантовых точках, излучающих в диапазоне длин волн 1.25–1.29  $\mu\text{m}$ . // *ФТП*, **37**(10), 1239–1242 (2003).
27. Ch. Ribbat, R.L. Sellin, I. Kaiander, F. Hopfer, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, M.V. Maximov. Complete suppression of filamentation and superior beam quality in quantum-dot lasers. // *Appl. Phys. Lett.*, **82** (6), 952–954 (2003)
28. И.И. Новиков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.Ю. Гордеев, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, С.С. Михрин, Н.А. Малеев, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Ж.И. Алферов, Н.Н. Леденцов, Д. Бимберг. Температурные характеристики низкопороговых высокоэффективных лазеров на квантовых точках, излучающих в диапазоне длин волн 1.25–1.29  $\mu\text{m}$ . // *ФТП*, **37**(10), 1270–1273 (2003).
29. М.В. Максимов, Д.С. Сизов, А.Г. Макаров, И.Н. Каяндер, Л.В. Асрян, А.Е. Жуков, В.М. Устинов, Н.А. Черкашин, Н.А. Берг, Н.Н. Леденцов, D. Bimberg. Влияние центров безызлучательной рекомбинации на эффективность фотолюминесценции структур с квантовыми точками. // *ФТП*, **38**(10), 1245–1249 (2004).
30. Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, С.А. Блохин, Ю.Г. Мусихин, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, Н.Д. Захаров, А.Ф. Цацульников, Н.Н. Леденцов, P. Werner, F. Guffart, D. Bimberg. Оптические и структурные свойства массивов квантовых

точек InAs, осажденных в матрицу  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на подложке GaAs. // ФТП, **38**(7), 867–870 (2004).

31. М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Ю.Г. Мусихин, Н.Н. Леденцов, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А. Малеев, Е.В. Никитина, В.М. Устинов, Ж.И. Алферов. Мощные лазеры на квантовых точках InAs–InGaAs спектрального диапазона 1.5 мкм, выращенные на подложках GaAs. // ФТП, **38**(6), 763–766 (2004).
32. M.V. Maximov, N.N. Ledentsov. Quantum Dot Lasers. // in *Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, Ed. James A. Schwarz, Cristian I. Contescu, and Karol Putyera, 3109–3126 (Marcel Dekker, Inc.: New York, 2004).
33. И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, Л.Я. Карачинский, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, А.Р. Ковш, И.Л. Крестников, А.В. Кожухов, С.С. Михрин, Н.Н. Леденцов. Влияние  $p$ -легирования активной области на температурную стабильность характеристик лазеров на InAs/GaAs-квантовых точках. // ФТП, **39**(4), 502–506 (2005).
34. Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, С.А. Блохин, М.В. Максимов, Е.С. Семенова, А.П. Васильев, А.Е. Жуков, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Д. Бимберг. Неравновесный характер распределения носителей при комнатной температуре в квантовых точках InAs, покрытых тонкими слоями AlAs/InAlAs. // ФТП, **39**(10), 1230–1235 (2005).
35. Л.Я. Карачинский, Т. Kettler, Н.Ю. Гордеев, И.И. Новиков, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков, Е.С. Семенова, А.П. Васильев, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, А.Р. Ковш, В.А. Щукин, С.С. Михрин, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, D. Bimberg. Непрерывный режим генерации одномодовых метаморфных лазеров на квантовых точках спектрального диапазона 1.5 мкм. // ФТП, **39**(12), 1464–1468 (2005).
36. I.I. Novikov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, N.D. Zakharov, P. Werner. Ultrahigh gain and non-radiative recombination channels in 1.5  $\mu\text{m}$  range metamorphic InAs–InGaAs quantum dot lasers on GaAs substrates. // *Semicond. Sci. Technol.*, **20**(1), 33–37 (2005).
37. S.S. Mikhrin, A.R. Kovsh, I. L. Krestnikov, A. V. Kozhukhov, D.A. Livshits, N.N. Ledentsov, Yu.M. Shernyakov, I. I. Novikov, M.V. Maximov, V.M. Ustinov,

- Zh.I. Alferov. High power temperature-insensitive 1.3  $\mu\text{m}$  InAs/InGaAs/GaAs quantum dot lasers. // *Semicond. Sci. Technol.*, **20**(5), 340–342 (2005).
38. L.Ya. Karachinsky, T. Kettler, N.Yu. Gordeev, I.I. Novikov, M.V. Maximov, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, A.R. Kovsh, V.A. Shchukin, S.S. Mikhrin, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, D. Bimberg. High-Power Single Mode CW Operation of 1.5 $\mu\text{m}$ -Range Quantum Dot GaAs-based Laser. // *Electronics Letters*, **41**(8), 478–480 (2005).
39. D. Bimberg, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, F. Heinrichsdorf, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, M.V. Maximov, Zh.I. Alferov. Optical Properties and Lasing in Self-Organised Quantum Dots. // in *Optics of Quantum Dots and Wires*, ed. Garnett W. Bryant and Glenn S. Solomon (Artech House, Boston/London, 2005).
40. Н.В. Крыжановская, С.А. Блохин, А.Г. Гладышев, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Е.М. Аракчеева, Е.М. Танклевская, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Э. Шток, Д. Бимберг. Лазерная генерация на длине волны 1.3  $\mu\text{m}$  при комнатной температуре в микродиске с квантовыми точками. // *ФТП*, **40**(9), 1128–1132 (2006).
41. С.А. Блохин, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Е.М. Аракчеева, Е.М. Танклевская, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Э. Шток, Д. Бимберг. Оптические исследования микродисков на основе субмонослойных квантовых точек InGaAs с асимметричным волноводом, сформированным методом селективного окисления. // *ФТП*, **40**(4), 482–487 (2006).
42. T. Kettler, L.Y. Karachinsky, N.N. Ledentsov, V.A. Shchukin, G. Fiol, M. Kuntz, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, K. Posilovic, D. Bimberg, I.I. Novikov, Yu.M. Shernyakov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh. Degradation-robust single mode continuous wave operation of 1.46  $\mu\text{m}$  metamorphic quantum dot lasers on GaAs substrate. // *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 041113 (2006).
43. L.Y. Karachinsky, T. Kettler, I.I. Novikov, Y.M. Shernyakov, N.Y. Gordeev, M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, E.S. Semenova, A.P. Vasil'ev, V.M. Ustinov, G. Fiol, M. Kuntz, A. Lochmann, O. Schulz, L. Reissmann, K. Posilovic,

- A.R. Kovsh, S.S. Mikhlin, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg. Metamorphic 1.5  $\mu\text{m}$ -range quantum dot lasers on a GaAs substrate. // *Semicond. Sci. Technol.*, **21**(5), 691–696 (2006).
44. N.V. Kryzhanovskaya, A.G. Gladyshev, S.A. Blokhin, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, N.N. Ledentsov, V.M. Ustinov, T. Warming, W. Wiczorek, D. Bimberg. High temperature stability of optical properties of InAs quantum dots realized by controlling of quantum dots electronic spectrum. // *Int. J. Nanoscience*, **6**(3–4), 283–286 (2007).
45. M.V. Maximov, A.E. Zhukov, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya, A.S. Payusov, V.M. Ustinov, I.I. Novikov, N.Yu. Gordeev. 1.32  $\mu\text{m}$  quantum dot laser with a  $46\text{ cm}^{-1}$  modal gain. // *Semicond. Sci. Technol.*, **23** (10) 105004 (4pp) (2008)

#### **Список цитируемой литературы.**

- 1\*. Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, В.А. Щукин, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, Д. Бимберг. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры. Обзор. // *ФТП*, **32**(4), 385–410 (1998).
- 2\*. R. Heitz, M. Grundmann, N.N. Ledentsov, L. Eckey, M. Veit, D. Bimberg, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, P.S. Kop'ev and Zh.I. Alferov. Multiphonon-relaxation processes in self-organized quantum dots. // *Appl. Phys. Lett.*, **68**(3), 361–363 (1996).
- 3\*. L.V. Asryan, R.A. Suris. Inhomogeneous line broadening and the threshold current density of a semiconductor quantum dot laser. // *Semiconductor Science and Technology*, **11**(4), 554–567 (1996).
- 4\*. A. Oster, F. Bugge, G. Erbert, H. Wenzel. Gain Spectra Measurement of Strained and Strain-Compensated InGaAsP–AlGaAs Laser Structures for  $\lambda \approx 800\text{ nm}$ . // *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 5, 631–636, (1999).
- 5\*. O.B. Shchekin and D.G. Deppe. 1.3  $\mu\text{m}$  InAs quantum dot laser with  $T_0 = 161\text{ K}$  from 0 to  $80^\circ\text{C}$ . // *Appl. Phys. Lett.*, **80** (18), 3277–3279 (2002).