

ГЛАДЫШЕВ Андрей Геннадьевич

Оптические и структурные свойства
квантовых точек (In, Ga, Al)As на подложках
арсенида галлия для светоизлучающих приборов
диапазона 1.3-1.55 мкм

(Специальность 01.04.10-физика полупроводников)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2006

Работа выполнена в Физико-Техническом институте им. А.Ф.Иоффе Российской Академии
Наук.

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук
Леденцов Николай Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук
Пихтин Александр Николаевич
кандидат физ.-мат. наук
Берт Николай Алексеевич

Ведущая организация: Санкт Петербургский государственный
политехнический
университет СПбГПУ

Защита состоится _____ 2006 г. в __ час. на заседании диссертационного совета
K002.205.02 при Физико-Техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН по адресу: 194021,
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26, ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-Технического института
им.А.Ф.Иоффе РАН.

Автореферат разослан _____ 2006г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

Г.С.Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы обусловлена необходимостью создания недорогих и эффективных источников и усилителей когерентного излучения диапазона 1.3-1.55 мкм. На настоящий момент в качестве излучателей в этом диапазоне длин волн используются лазеры на основе InGaAsP/InP, которые имеют такие недостатки, как низкая температурная стабильность, трудности при создании вертикально-излучающих лазеров высокая оптическая нелинейность, приводящая к искажению сигнала и др. [1]. В настоящее время усилия многих исследовательских групп сосредоточены на получении лазеров диапазона 1.3 – 1.55 мкм на подложках GaAs. Применение структур на подложках GaAs позволяет достигать более высокой температурной стабильности, благодаря большей энергии локализации носителей заряда в активной области, и использовать бездефектные AlGaAs/GaAs брэгговские зеркала, оксидированные GaAs-AlO₂ зеркала, а также оксидированные AlO₂ апертуры при создании монокристаллических вертикально-излучающих лазеров. В качестве активной области таких лазеров наиболее перспективным представляется использование InAs квантовых точек (КТ), полученных методом самоорганизации. Дело в том, что переходы между уровнями в КТ, будучи аналогичными переходам между строго дискретными уровнями отдельного атома, представляются идеальными для генерации лазерного излучения [2], что повышает температурную стабильность основных характеристик приборов и позволяет кардинально уменьшить эффект оптической нелинейности в оптических усилителях и лазерах. Преимущества метода формирования КТ с помощью самоорганизации заключаются в высокой воспроизводимости, отсутствии дефектов, связанных с постростовой обработкой, а также возможности создания приборной структуры в едином эпитаксиальном процессе.

За последнее десятилетие большой прогресс был достигнут в технологии роста квантовых точек InAs/InGaAs, излучающих в области 1.3 мкм, на подложках GaAs [3]. При этом эффективного излучения на длине волны 1.55 мкм от КТ получить не удавалось вследствие большого рассогласования по постоянным решетки GaAs и InAs. Поэтому нами был предложен новый метод получения длинноволнового излучения от структур с КТ InAs на подложках GaAs, основанный на метаморфной концепции роста. Данный метод основан на получении низкодефектных зародышевых слоев In_xGa_{1-x}As (0<x<30%) на подложках GaAs при низкотемпературном выращивании [4] и методах дефектоубирания в метаморфных слоях и КТ [5] и позволяет получать метаморфные слои In_xGa_{1-x}As с КТ с высоким структурным совершенством [6, 7].

Применение метаморфных слоев In_xGa_{1-x}As в качестве матрицы, окружающей КТ InAs, является весьма перспективным подходом для сдвига длины волны излучения КТ в длинноволновую сторону. Такие КТ являются объектом новым и еще практически не изученным, что делает весьма актуальным исследование их структурных и оптических свойств.

Исследование методов и способов управления процессами формирования массивов самоорганизующихся КТ InAs, позволяющих контролировать такие параметры КТ InAs, как их плотность, размеры, форма, и соответственно, энергетический спектр, является

чрезвычайно важным, как с точки зрения детального изучения процессов самоорганизации в процессе роста, так и для применения квантовых точек в современных полупроводниковых лазерах. Эффективным технологическим приемом, позволяющим контролировать объем и форму КТ In(Ga)As является использование зарастающих слоев InAl(Ga)As [8], [9], [10]. Для повышения температурной стабильности характеристик лазеров существенным является сохранение условий неравновесного распределения носителей по состояниям массива КТ InAs, в частности, с помощью увеличения энергетического интервала между основным и первым возбужденными состояниями. Поэтому разработка методов, позволяющих контролировать энергетический спектр КТ, а также исследования механизмов релаксации носителей в основное состояние КТ и зависимости оптических свойств КТ от температуры являются актуальными для улучшения характеристик приборов на их основе.

Основная цель работы заключается в исследовании оптических и структурных свойств InAs/In(Ga, Al)As квантовых точек, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs, в оптимизации их свойств для использования в качестве активной области излучателей диапазона 1.3-1.55 мкм и разработке метода управления энергетическим спектром состояний носителей заряда в квантовых точках.

Научная новизна работы:

1. Впервые исследованы оптические и структурные свойства КТ InAs/InGaAs, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs.
2. Предложен метод управления длиной волны люминесценции КТ InAs, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs, позволяющий варьировать ее значение в диапазоне 1.35-1.6 мкм.
3. Впервые продемонстрирована высокая эффективность фотолюминесценции на длине волны 1.5 мкм при комнатной температуре от КТ InAs, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs.
4. Методами возбуждения люминесценции и резонансной фотолюминесценции впервые исследовано влияние покрывающих слоев AlAs/InAlAs на транспорт носителей заряда в КТ InAs, помещенных в матрицу Ga(Al)As.
5. Впервые показано, что в КТ InAs/InAlAs реализуется неравновесное распределение носителей по состояниям ансамбля КТ вплоть до комнатной температуры.
6. Впервые исследованы оптические и структурные свойства КТ InAs/InAlAs, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различного состава.
7. Методами фотолюминесценции и возбуждения люминесценции впервые исследовано влияние покрывающих слоев InAlAs на оптические свойства и транспорт носителей в КТ InAs, помещенных в метаморфную матрицу $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различного состава.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Длина волны излучения структур с квантовыми точками InAs/InGaAs в метаморфной матрице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ может быть контролируемым образом изменена в диапазоне 1.35-1.59 мкм путем вариации состава материала матрицы и параметров осаждения квантовых точек.
2. В квантовых точках InAs/InGaAs при изменении состава метаморфной матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от 0 до 30% происходит уменьшение энергии локализации носителей и энергетического зазора между уровнями размерного квантования вследствие увеличения латерального размера квантовых точек.
3. В квантовых точках InAs/InGaAs при изменении состава матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от 0 до 30% происходит уменьшение скорости изменения длины волны излучения квантовых точек с температурой от 0.37 до 0.27 мЭВ/К, соответственно, в диапазоне температур от 200 до 480К.
4. В квантовых точках InAs/AlAs/InAlAs в матрице Ga(Al)As, благодаря высокой энергии локализации основного состояния относительно состояний матрицы, реализуется неравновесное распределение носителей в широком диапазоне температур, включая комнатную температуру.
5. Заравнивание квантовых точек InAs тонкими слоями AlAs/ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ и $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ различного состава позволяет целенаправленно изменять энергетическое расстояние между основным и первым возбужденными уровнями размерного квантования от 80 мЭВ до 135 мЭВ для КТ в матрице GaAs и от 38 мЭВ до 48 мЭВ для КТ в метаморфной матрице InGaAs, соответственно.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на:

- 10 Международном симпозиуме «Наноструктуры: Физика и Технология» (Санкт Петербург, 2002г), 12 Международном симпозиуме «Наноструктуры: Физика и Технология» (Санкт Петербург, 2004г), 13 Международном симпозиуме «Наноструктуры: Физика и Технология» (Санкт Петербург, 2005г),

- VII Российской конференции по физике полупроводников (Звенигород, 2005г),

- на международной конференции "Trends in Nanotechnology", (Барселона, 2005),

а также на научных семинарах Физико-Технического Института им. А.Ф.Иоффе РАН.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 6 в научных статьях и 5 в материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 148 страницах машинописного текста. Диссертация включает также 43 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 166 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования свойств самоорганизующихся InAs/In(Ga, Al)As квантовых точек (КТ), излучающих в диапазоне 1.3-1.55 мкм, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs, сформулирована цель диссертационной работы, изложены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена обзору имеющейся литературы по свойствам полупроводниковых самоорганизующихся КТ на основе GaAs. Первый раздел главы посвящен обзору методов формирования массивов КТ и влиянию условий осаждения при росте молекулярно-пучковой эпитаксии на параметры массивов КТ. Второй раздел посвящен свойствам самоорганизующихся КТ InAs/GaAs, полученных молекулярно-пучковой эпитаксией. В разделе описываются электронные и оптические свойства КТ InAs/GaAs, способы получения длинноволнового излучения ($\lambda=1.3 - 1.55$ мкм) в структурах с КТ InAs/GaAs, влияние покрывающих слоев и материала матрицы на их свойства. Обсуждается вопрос о температурных зависимостях фотолюминесценции КТ InAs/GaAs от 10К до 500К. Рассмотрены основные механизмы захвата и рекомбинации носителей в КТ. В третьем разделе главы рассмотрены основные характеристики инжекционных лазеров на основе КТ InAs/GaAs.

Во **второй главе** приведено описание методики и установки роста полупроводниковых структур с помощью молекулярно-пучковой эпитаксии, использовавшейся для получения исследованных в работе гетероструктур. Также описаны экспериментальные методики и соответствующие установки, применявшиеся для изучения оптических и структурных свойств образцов: спектроскопия фотолюминесценции (ФЛ) и возбуждения фотолюминесценции (ВЛ) в широком диапазоне температур, просвечивающая электронная микроскопия.

Третья глава посвящена исследованию оптических и структурных свойств квантовых точек InAs, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложках GaAs.

В первой части главы изучено влияние методик уменьшения плотности дислокаций на оптические и структурные свойства гетероструктур, осажденных на метаморфный InGaAs буферный слой. Показано, что использование напряженных слоев и высокотемпературного отжига приводит к уменьшению количества прорастающих дислокаций в активной области метаморфных гетероструктур и, соответственно, увеличению интенсивности их фотолюминесценции более чем на порядок.

Во второй части главы обсуждаются результаты исследований влияния количества осажденного InAs при формировании КТ InAs на оптические свойства метаморфных гетероструктур. По мере увеличения количества осажденного InAs от 2.2 до 2.6 монослоев (МС) происходит увеличение длины волны излучения КТ. Однако, при превышении значения 2.6 МС, наблюдается насыщение зависимости длины волны излучения и резкое падение интенсивности ФЛ, связанные с превышением значения размера КТ критической величины и образованием дефектов. Наибольшая достигнутая длина волны излучения составила 1370 нм при комнатной температуре для 4 МС InAs. Было определено, что оптимальным значением эффективной толщины осажденного InAs для получения

длинноволнового излучения КТ InAs с сохранением структурного качества является 2.6 МС. При дальнейших исследованиях свойств метаморфных гетероструктур с КТ использовали это количество InAs для формирования КТ. Увеличение длины волны излучения КТ возможно при использовании эффекта активированного распада твердого раствора (АРТР) при заравнивании КТ InAs тонким (~ 5 нм) слоем InGaAs [11]. Применение АРТР слоя $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ позволило нам сдвинуть длину волны излучения КТ до 1.48 мкм для случая метаморфной матрицы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ с сохранением интенсивности ФЛ.

Третья часть главы посвящена исследованию влияния состава $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ матрицы ($0 \leq x \leq 0.3$) и состава заравнивающего слоя $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y=x+0.2$) на свойства КТ.

Как показали исследования просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), 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} см^{-2} . При увеличении содержания индия в составе матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от 0 до 30% происходит монотонное возрастание длины волны излучения КТ от 1.3 до 1.6 мкм при комнатной температуре (рис.1). При этом интенсивность ФЛ уменьшается примерно в 50 раз вследствие частичного проникновения дислокации из буферного метаморфного слоя. Для концентрации индия в матрице 27% получено эффективное излучение от КТ на длине волны 1.55 мкм при падении интенсивности ФЛ всего лишь в 10 раз при малых плотностях возбуждения по сравнению с псевдоморфными КТ, излучающими в области 1.3 мкм (концентрация индия в матрице 0%).

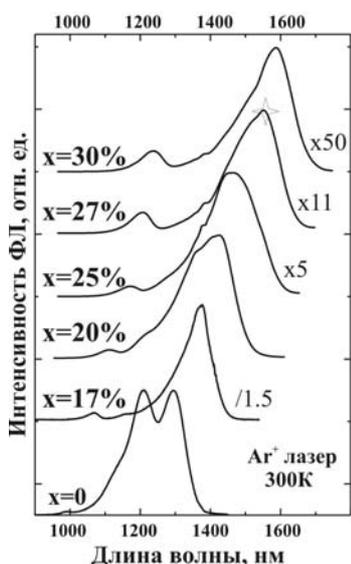


Рис. 1. Спектры ФЛ при комнатной температуре структур с КТ InAs, сформированных в метаморфной матрице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различного состава.

В четвертой части представлены результаты исследования энергетического спектра КТ, сформированных в метаморфной матрице различного состава, методом спектроскопии возбуждения люминесценции. Из анализа полученных спектров возбуждения люминесценции следует, что увеличение содержания индия в метаморфной матрице приводит к уменьшению энергии локализации носителей в КТ и уменьшению энергетического расстояния между уровнями размерного квантования в КТ.

В пятой части представлены результаты исследования температурных зависимостей ФЛ КТ, осажденных в метаморфную матрицу различного состава, в диапазоне температур от 10К до 500К и сравнение их с зависимостями для КТ InAs, сформированными в GaAs матрице. Анализ температурных зависимостей полуширины и положения линии ФЛ КТ позволил сделать вывод об изменении характера распределения носителей заряда по состояниям в ансамбле КТ с неравновесного (нетермализованного) при низкой температуре на равновесный (термализованный) при высокой температуре. Изменение характера

распределения с одного типа на другой (область минимума полуширины) происходит при меньших температурах для структур с бóльшим содержанием индия в матрице вследствие уменьшения энергии локализации носителей заряда в КТ. Показано, что при увеличении состава матрицы по индию от 0 до 30% изменение положения максимума ФЛ КТ с температурой в области равновесного распределения описывается зависимостью для твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, где x меняется от 0.5 до 1. Обнаружено, что уменьшение энергии локализации носителей в КТ, осажденных в метаморфную матрицу, приводит к ухудшению температурной стабильности их оптических свойств.

Данные исследования сыграли важную роль в создании высокоэффективных лазеров диапазона 1.5 мкм на подложках GaAs с высокой деградиационной стабильностью [11].

Четвертая глава посвящена результатам исследований влияния зарращивающих слоев AlAs/ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ на свойства КТ InAs в матрице GaAs и AlGaAs.

Для повышения температурной стабильности характеристик лазеров существенным является сохранение условий неравновесного распределения носителей по состояниям массива КТ, в частности, с помощью увеличения энергетического интервала между основным и первым возбужденным состояниями. Эффективным технологическим приемом, позволяющим контролировать объем и форму InAs КТ является зарращивание КТ тонким слоем (1-2 МС) AlAs [8], [13] и тонким слоем (~10 нм) InGaAlAs [9], [10], [14]. Для улучшения температурной стабильности КТ нами было предложено использование комбинации этих технологических подходов для формирования КТ: островки InAs, сформированные в режиме роста Странского-Крастанова, последовательно зарращивались тонкими слоями AlAs и InAlAs.

В первой части главы изучено влияние зарращивающих слоев AlAs/ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$, где состав x изменялся от 0 до 30%, на структурные и оптические свойства КТ InAs (2.3 МС). Для сравнения также была исследована структура с КТ InAs в матрице GaAs без зарращивания Al-содержащими слоями. Согласно данным ПЭМ, при зарращивании КТ InAs тонким слоем (2МС) AlAs происходит уменьшение латерального размера КТ и увеличение их высоты, а при зарращивании тонкими слоями AlAs (2МС) и $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ (4 нм) вершина КТ увеличивается практически до размеров ее основания и точка приобретает гантелеобразную форму. Подобный эффект наблюдался ранее [13] и заключается в том, что при использовании тонкого AlAs зарращивающего слоя, вследствие низкой подвижности адатомов Al при выбранной температуре роста и эффекта несмачиваемости AlAs и InAs, подавляется диффузия атомов In в латеральном направлении, что приводит к увеличению высоты КТ и эффективной концентрации In в КТ. При зарращивании квантовых точек слоем InAlAs, за счет локальных напряжений, создаваемых КТ в матрице, происходит стимулированное перераспределение In и Al в зарращиваемом слое, таким образом, что область вблизи и над КТ оказывается обогащенной In и обедненной Al [8]. При зарращивании КТ как слоем AlAs, так и InAlAs наблюдается увеличение объема КТ и, как следствие, увеличение длины волны излучения КТ. Нами обнаружено, что при зарращивании КТ комбинацией слоев AlAs/ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ с увеличением состава x длина волны излучения КТ также сдвигается в длинноволновую область и для зарращивающих слоев AlAs/ $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ достигает 1.3 мкм при комнатной температуре без изменения интенсивности ФЛ.

Исследования спектров ФЛ, полученных при высокой плотности оптической накачки (10 МВт/см^2), и спектров возбуждения люминесценции при 77К показали, что при наращивании КТ слоями $\text{AlAs/In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ происходит увеличение энергетического зазора между пиками основного и первого возбужденного состояний от 80 мэВ для структуры с КТ InAs в матрице GaAs до 135 мэВ для структуры с КТ InAs, покрытыми слоем $\text{AlAs/In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$. Также было обнаружено, что на спектрах ФЛ, полученных при высоких плотностях возбуждения, и на спектрах ВЛ для структур с наращиванием КТ слоями $\text{AlAs/In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ отсутствует максимум, соответствующий смачивающему слою (СС), в то время как на спектрах ФЛ и СВЛ структуры с КТ InAs в матрице GaAs этот пик четко различим. Этот факт мы связываем с вытеснением уровня в СС до уровня матрицы.

Во второй части главы описаны результаты исследования модификации электронного спектра КТ при использовании покрывающих слоев $\text{AlAs/In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ и изучения температурной стабильности свойств КТ InAs в матрице GaAs и $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

С этой целью была исследована серия из четырех структур с КТ InAs (2.3 МС), выращенных на подложках GaAs. В структуре Б1 КТ покрывались слоем GaAs. В структуре Б2 после формирования InAs точек проводилось осаждение слоя $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ толщиной 40 Å, в структуре Б3 – 2 МС AlAs и 40 Å $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ с мольной долей арсенида индия 25%. В структуре Б4 слои с КТ и покрывающие слои формировались так же как в структуре Б3, но в матрице $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

По результатам спектроскопии ФЛ длина волны излучения структур Б2-Б4 с покрывающими КТ слоями сдвинуты в длинноволновую сторону примерно на 70 мэВ по сравнению со структурой Б1. Интересно отметить, что увеличение ширины запрещенной зоны матрицы в случае использования матрицы $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (структура Б4), не приводит к коротковолновому сдвигу линии ФЛ КТ. По всей видимости, это обусловлено сильной локализацией волновых функций электронов и дырок основного состояния в КТ и их слабым проникновением в материал матрицы и тем самым слабой «чувствительности» к ширине ее запрещенной зоны.

Исследования температурных зависимостей ФЛ структур, показали, что в массивах КТ с покрывающими слоями $\text{AlAs/In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ значение полуширины линии ФЛ основного состояния практически не изменяется в диапазоне температур 7-300К, т.е. отсутствует транспорт носителей между точками и, соответственно, реализуется неравновесное распределение носителей. Падение интегральной интенсивности ФЛ КТ InAs/InAlAs с увеличением температуры на порядок меньше по сравнению с КТ InAs/Ga(In)As, что связано с подавлением механизмов термического перераспределения носителей между точками и выброса носителей в матрицу. Подавление температурных выбросов носителей из квантовых точек обусловлено увеличением энергетического зазора между уровнями основного и возбужденного состояний, отсутствием уровня смачивающего слоя, 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.

На спектрах ВЛ при 7К структур Б2-Б4 наблюдается постепенное увеличение энергетического зазора между основным и возбужденным состояниями КТ от 80 мэВ для структуры Б2 до 135 мэВ для структуры Б4. Во всех структурах наблюдаются фоновые

линии, которые отстоят друг от друга на энергию ~ 32 мэВ, что соответствует энергии ЛО фонона КТ InAs. Помимо линий ЛО фонона КТ InAs, в структурах Б3 и Б4 наблюдаются фоновые резонансы с энергией около 40 мэВ, что соответствует ЛО фоновой моде слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$. Линии, связанные с поглощением в смачивающем слое и квантовой яме, наблюдаются лишь в структуре Б2.

Было проведено исследование спектров ВЛ и резонансной ФЛ в диапазоне температур от 7К до 300 К для структур Б2-Б4. При регистрации спектров энергия детектирования соответствовала энергии максимума спектра ФЛ при данной температуре. На спектрах возбуждения фотолюминесценции и резонансной ФЛ структуры Б2 с увеличением температуры наблюдается постепенное падение интенсивности резонансных линии и практически полное их гашение при $T=270\text{К}$. При комнатной температуре на спектрах возбуждения и резонансной ФЛ отсутствуют какие-либо особенности. Это означает, что термический выброс электронов и дырок и их латеральный транспорт становится настолько эффективным, что носители фотовозбужденные в точках с определенной энергией перераспределяются по всему ансамблю и возбуждение больше не является селективным для точек с энергией основного перехода соответствующей энергии детектирования. На спектрах ВЛ структуры Б3, резонансная линия, соответствующая поглощению в возбужденном состоянии сохраняется вплоть до комнатной температуры. Изменение формы спектров резонансной ФЛ при $T=300\text{К}$ с изменением энергии возбуждения и наличие ЛО-фононных линий свидетельствует о подавлении термического выброса носителей из КТ с последующим латеральным транспортом и захватом в другую квантовую точку и сохранению условий селективного возбуждения КТ. Увеличение энергии локализации при использовании матрицы $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ в структуре Б4 приводит к усилению эффектов характерных для структуры Б3. Резонансные линии на спектре возбуждения ФЛ сохраняются до комнатной температуры во всем диапазоне энергий. Также сохраняется сильная модуляция спектров резонансной ФЛ при 300К. Таким образом, при комнатной температуре в структуре Б4 носители, захваченные в КТ, полностью изолированы и распределение носителей по состояниям имеет неравновесный характер вследствие отсутствия термических выбросов носителей из КТ и их дальнейшего латерального транспорта.

В третьей части главы изучен вопрос о возможности длинноволнового сдвига ФЛ КТ InAs, покрытых слоями AlAs/ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$. Было исследовано влияние состава и толщины зарращивающего слоя InAlAs и изучено влияние количества осажденного InAs на длину волны излучения КТ.

Методом спектроскопии ФЛ было изучено влияние на длину волны излучения КТ вариации состава зарращивающего слоя $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ по индию от 30% до 60%. Для компенсации возникающих из-за рассогласования постоянных решетки материала матрицы и зарращивающего слоя напряжений при изменении состава зарращивающего слоя уменьшалась его толщина. Обнаружено, что при увеличении состава зарращивающего слоя по индию с 30% до 40% происходит сдвиг максимума ФЛ КТ с 1.32 мкм до 1.34 мкм. При дальнейшем увеличении состава максимум ФЛ начинает сдвигаться в коротковолновую сторону, принимая значение 1.32 мкм и 1.28 мкм для 50% и 60%, соответственно. При возрастании

мольной доли InAs в заращающем слое уменьшается энергетический зазор между основным и возбужденным состоянием, за исключением случая с 60% слоем. Коротковолновый сдвиг максимума ФЛ КТ и уменьшение энергетического зазора между основным и возбужденным состояниями является следствием увеличения состава заращающего слоя по индию и уменьшения его толщины. На спектрах ФЛ структур с 50% и 60%-ыми заращающими слоями обнаружены пики на 1.35 и 1.33 эВ, соответствующие излучению из смачивающего слоя. Это находится в соответствии со сделанным нами ранее предположением о вытеснении уровня смачивающего слоя в структурах с большим значением потенциального барьера (состав заращающего слоя <30% по индию).

Методом спектроскопии ФЛ было изучено влияние на длину волны излучения КТ количества осажденного при их формировании InAs. Обнаружено, что длина волны излучения КТ монотонно сдвигается в длинноволновую область при увеличении количества осажденного InAs с 2.3 до 2.8 МС и составляет 1.31 и 1.35 мкм, соответственно. При этом постепенно уменьшается интенсивность ФЛ, которая меньше у образца с КТ 2.8 МС примерно в два раза по сравнению с образцом с КТ 2.3 МС. Уменьшение интенсивности ФЛ говорит о том, что размеры части КТ в ансамбле становятся больше критического значения, что приводит к образованию дислоцированных КТ [15]. Таким образом, было сделано предположение, что дальнейшее увеличение количества осажденного в КТ материала приведет к значительному падению интенсивности ФЛ без существенного изменения длины волны излучения КТ.

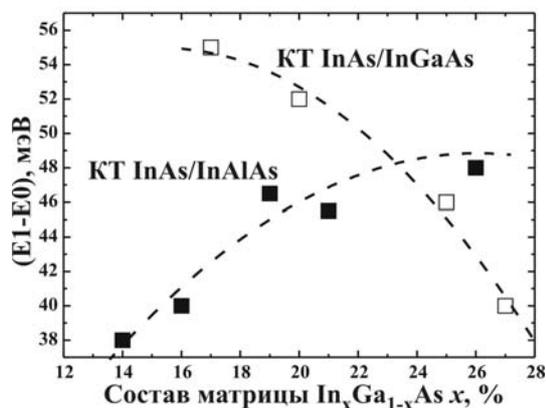
В пятой главе приведены результаты исследований оптических свойств КТ InAs, сформированных в метаморфных матрицах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ различного состава и покрытых слоем $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$, выращенных на подложках GaAs.

Первая часть главы посвящена исследованию влияния состава матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.14 \leq x \leq 0.28$) и состава заращающего слоя $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ ($y=x+0.2$) на оптические свойства КТ. По мере увеличения состава матрицы по индию происходит длинноволновый сдвиг максимума ФЛ КТ, но после достижения состава ~19 % происходит насыщение зависимости максимума ФЛ от состава матрицы при значении 1.42 мкм, чего не наблюдалось для КТ в метаморфной матрице, покрытых слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Наблюдаемое насыщение зависимости не связано с образованием дислоцированных КТ, т.к. при этом бы существенно (на несколько порядков) уменьшилась бы интенсивность ФЛ. В нашем случае интенсивность ФЛ падает меньше чем на порядок при увеличении мольной доли InAs в составе матрицы, что объясняется частичным проникновением прорастающих дислокаций из буферного слоя в активную область. Поэтому нами было сделано предположение, что причиной насыщения зависимости является изменение химического состава КТ в результате процессов интердиффузии во время роста структуры и/или изменение формы КТ при вариации состава матрицы и заращающего слоя.

Для выяснения причин насыщения зависимости максимума ФЛ КТ от состава матрицы было проведено исследование температурной зависимости положения пика ФЛ КТ в диапазоне температур от 300 до 480К, когда распределение носителей является равновесным, и по сдвигу пика ФЛ можно судить о химическом составе, характерном для данного ансамбля КТ. По полученным зависимостям был сделан вывод о том, что

характерный состав КТ InAs/InAlAs меняется от 70 до 80% при изменении состава матрицы от 14 до 28%, соответственно, что меньше, чем в случае КТ InAs/InGaAs (от 50% до 100%). Это может быть связано с наличием Al-содержащего слоя вблизи КТ. Однако, объяснить наличие насыщения только малым изменением состава КТ нельзя, т.к. состав КТ имеет тенденцию к увеличению содержания индия или остается постоянным при увеличении мольной доли InAs в матрице, что должно приводить к монотонному длинноволновому сдвигу максимума ФЛ КТ.

Для дальнейшего изучения оптических свойств КТ InAs/InAlAs были проведены исследования спектров ВЛ образцов при температуре 77К. Спектры ВЛ можно использовать для определения спектра энергетических состояний КТ. Для этого необходимо точно определить энергетического положение максимума на спектрах ВЛ, соответствующего тому или иному переходу. В нашем случае пики на спектрах ВЛ имели большую ширину, что делало невозможным точное определение положения максимумов. Для более корректного определения положения пиков спектры ВЛ были сопоставлены со спектрами ФЛ, измеренными при высокой плотности мощности оптической накачки $\sim 1.5 \text{ МВт/см}^2$ и той же температуре. Спектры ФЛ были описаны с помощью серии гауссовых пиков, соответствующих оптическим переходам в КТ. Количество гауссовых пиков, используемых для описания спектров ФЛ, выбиралось минимально возможным для точного совпадения экспериментального спектра и спектра, полученного в результате подгонки. Процедура сопоставления спектров ФЛ и ВЛ была проведена для всех структур с КТ InAs/InAlAs, а также для четырех образцов с КТ InAs/InGaAs с составом метаморфной матрицы 17, 20, 25 и 27%.



По результатам проведенного исследования были построены зависимости энергетического зазора между основным и первым возбужденным состоянием (E_1-E_0) от состава матрицы для данных структур (рис.2).

Рис.2. Зависимости энергетического зазора между основным и первым возбужденным состоянием (E_1-E_0) от состава метаморфной матрицы для структур с КТ InAs/InGaAs и InAs/InAlAs.

Обнаружено, что для образцов с КТ InAs/InGaAs (E_1-E_0) монотонно уменьшается с ростом состава матрицы по индию, что связано с увеличением латерального размера КТ. В то же время зависимость (E_1-E_0) от состава матрицы для КТ InAs/InAlAs имеет характер монотонно возрастающей зависимости и для состава матрицы 28% (E_1-E_0) для образцов с КТ InAs/InAlAs становится примерно на 10 мэВ больше, чем для образцов с КТ InAs/InGaAs. Увеличение (E_1-E_0) в КТ может быть связано с увеличением отношения высоты КТ к размеру ее основания [16]. Следует также отметить, что при увеличении отношения высоты КТ InAs/GaAs к размеру ее основания с 0.15 до 0.5 наблюдался коротковолновый сдвиг

максимума ФЛ КТ приблизительно на 50 мэВ [16]. Таким образом нами был сделан вывод об изменении формы КТ InAs/InAlAs при увеличении мольной доли InAs в составе матрицы, проявляющимся в виде увеличения соотношения между высотой и латеральным размером КТ, что является причиной наблюдаемого насыщения длины волны излучения КТ.

Во второй части главы проведено сравнение энергии локализации носителей и температурных зависимостей интегральной интенсивности ФЛ для трех пар образцов с КТ InAs/InAlAs и КТ InAs/InGaAs, сформированных в схожих по составу метаморфных матрицах.

Обнаружено, что бóльшая энергия локализации носителей в образцах с КТ InAs/InAlAs по сравнению с КТ InAs/InGaAs наблюдается только для составов матрицы меньше 20%. При составах матрицы выше 20% по индию локализация носителей становится либо сравнимой для обеих серий образцов, либо больше в образцах с КТ InAs/InGaAs. Соотношение энергий локализации для образцов из различных серий, но со схожими составами матрицы, закономерно отразилось на температурных зависимостях их интегральной интенсивности ФЛ. Образцы с большей энергией локализации носителей показали лучшую температурную стабильность интенсивности ФЛ. При схожем значении энергии локализации температурная стабильность была лучше у структур с большим значением энергетического зазора между основным и возбужденным состояниями в КТ.

В **заключении** приводятся основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Методами просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии ФЛ показано, что применение методик дефектоубирания в метаморфных буферных слоях больше чем на порядок увеличивает их интенсивность ФЛ.
2. Методом спектроскопии ФЛ исследован спектральный диапазон излучения гетероструктур с КТ InAs, сформированных в метаморфном слое твердого раствора $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, при изменении количества осажденного InAs. Обнаружен эффект насыщения длины волны излучения и резкого падения интенсивности ФЛ при превышении количества осажденного InAs, формирующего массив КТ, 2.6 МС.
3. Методом спектроскопии ФЛ исследован спектральный диапазон излучения гетероструктур с КТ InAs в матрице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 0.3$). Увеличение концентрации индия в слое матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ приводит к сдвигу линии фотолюминесценции КТ от 1.3 мкм до 1.59 мкм, и при концентрации индия 27% длина волны максимума линии фотолюминесценции составляет 1.55 мкм при комнатной температуре.
4. Методами просвечивающей электронной микроскопии показано, что поверхностная плотность и латеральный размер КТ InAs, сформированных в метаморфном слое $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, увеличиваются по сравнению со случаем КТ InAs в матрице GaAs.
5. Исследования электронного спектра КТ методом спектроскопии ВЛ позволили сделать вывод об уменьшении разности энергий между подуровнями носителей заряда в квантовых точках и уменьшении энергии локализации носителей в КТ при увеличении концентрации индия в матрице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

6. Показано, что при изменении состава матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от 0 до 30% происходит уменьшение скорости изменения длины волны излучения КТ с температурой от 0.37 до 0.27 мэВ/К, соответственно, в диапазоне температур от 200 до 480К.
7. Обнаружено, что уменьшение энергии локализации носителей в КТ приводит к ухудшению температурной стабильности интенсивности ФЛ КТ.
8. В работе показано, что при наращивании КТ InAs слоями AlAs/InAlAs происходит изменение формы КТ и сдвиг линии ФЛ в сторону больших длин волн, увеличивается энергетический зазор между основным и возбужденным состояниями КТ (Δ_{EX}). Так, применение $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ наращивающего слоя позволило получить излучение КТ на 1.3 мкм и увеличить Δ_{EX} с 80 мэВ (КТ InAs/InGaAs) до 135 мэВ.
9. Показано, что в массивах КТ, выращенных тонкими слоями AlAs и InAlAs, в матрицах GaAs или $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ отсутствует транспорт носителей между КТ в диапазоне температур от 10 до 300К и, соответственно, реализуется неравновесное распределение носителей. Падение интегральной интенсивности ФЛ КТ InAs/InAlAs с увеличением температуры существенно меньше по сравнению с КТ InAs/Ga(In)As.
10. Методом спектроскопии ФЛ исследована возможность длинноволнового сдвига максимума ФЛ образцов с КТ InAs/InAlAs при изменении состава наращивающего слоя $\text{In}_x\text{Al}_{(1-x)}\text{As}$ в диапазоне от 30 до 60%. Обнаружено, что при увеличении мольной доли InAs в составе наращивающего слоя до 40% происходит длинноволновый сдвиг. При дальнейшем увеличении состава максимум ФЛ начинает сдвигаться в коротковолновую сторону. Максимальная полученная длина волны излучения КТ – 1.34 мкм.
11. Методом спектроскопии ФЛ исследована возможность длинноволнового сдвига максимума ФЛ образцов с КТ InAs/InAlAs при изменении количества осажденного при формировании квантовых точек InAs от 2.3 до 2.8 МС. Обнаружено, что длина волны излучения КТ монотонно сдвигается в длинноволновую область при увеличении количества осажденного InAs с 2.3 до 2.8 МС и составляет 1.31 мкм и 1.35 мкм, соответственно. При этом постепенно уменьшается интенсивность ФЛ, что указывает на образование дислоцированных КТ.
12. Впервые исследован спектральный диапазон излучения гетероструктур с квантовыми точками InAs/InAlAs, помещенными в метаморфный слой твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Обнаружен эффект насыщения длины волны излучения при увеличении мольной доли InAs в составе матрицы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ больше 19%. Максимальная полученная длина волны излучения КТ InAs/InAlAs составила 1.41 мкм.
13. Исследования электронного спектра КТ методами спектроскопии ВЛ и ФЛ при высоких уровнях накачки позволили сделать вывод об увеличении разности энергий между подуровнями носителей заряда в КТ InAs/InAlAs от 38 до 48 мэВ при увеличении концентрации индия в матрице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ от 14 до 28%. Это свидетельствует о возможности управления энергетическим спектром КТ при использовании покрывающих КТ слоев $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ не только в структурах с КТ InAs в

матрице GaAs, но также в структурах с КТ InAs, осажденных в метаморфную матрицу

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$.

14. Обнаружено уменьшение энергии локализации носителей заряда в КТ InAs/InAlAs при увеличении концентрации индия в матрице $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, что привело к ухудшению температурной стабильности оптических свойств КТ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. D. S. Sizov, N. V. Kryzhanovskaya, A. G. Gladyshev, Yu. B. Samsonenko, G. E. Cirilin, N. K. Polyakov, V. A. Egorov, A. A. Tonkih, Yu G. Musikhin, A.F. Tsatsul'nikov, N. N. Ledentsov, and Victor M. Ustinov, «Investigation of the formation of InAs QDs in a AlGaAs matrix», Proceedings of SPIE, Vol. 5023, 10th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, Zhores I. Alferov, Leo Esaki, Editors, June 2002, pp. 52-55.
2. А.Е.Жуков, А.Р.Ковш, С.С.Михрин, Е.С.Семенова, Н.А.Малеев, А.П.Васильев, Е.В.Никитина, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, Ю.М.Шерняков, Ю.Г.Мусихин, М.В.Максимов, Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, Ж.И.Алферов, «Метаморфные лазеры спектрального диапазона 1.3 мкм, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs», Физика и техника полупроводников, 2003, том 37, выпуск 9, стр. 1143-1147.
3. А.Е.Жуков, А.П.Васильев, А.Р.Ковш, С.С.Михрин, Е.С.Семенова, А.Ю.Егоров, В.А.Однородов, Н.А.Малеев, Е.В.Никитина, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, Ю.М.Шерняков, М.В.Максимов, Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, Ж.И.Алферов, «Лазерная генерация на длине волны 1.5 мкм в структурах с квантовыми точками на подложках GaAs», Физика и техника полупроводников, 2003, том 37, выпуск 12, стр. 1461-1464.
4. 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», Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, выпуск 6, стр. 763-766.
5. N. V. Kryzhanovskaya, A. G. Gladyshev, S.A.Blokhin, Yu.G.Musikhin, A.E.Zhukov, M.V.Maximov, N.D.Zakharov, A.F.Tsatsul'nikov, N.N.Ledentsov, P.Werner, F.Guffart, and D.Bimberg «Optical and structural properties of InAs quantum dot arrays grown in InGaAs matrix on GaAs substrate», Proceedings 12th International Symposium on Nanostructures: Physics and Technology, June 2004, pp. 227-228.
6. 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 InAs квантовых точек, осажденных в матрицу $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ на подложке GaAs», Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, выпуск 7, стр.867-871.
7. А.Г.Гладышев, Н.В.Крыжановская, С.С. Михрин, А.Е. Жуков, М.В. Максимов, Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов «Зависимости интенсивности фотолуминесценции InAs

квантовых точек от плотности оптического возбуждения и температуры», Тезисы докладов VI Российской конференции по физике полупроводников, 19-25 сентября 2005 года, Звенигород, стр. 250

8. 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», Физика и техника полупроводников, 2005, том 39, выпуск 10, стр.1230-1235.

9. A. G. Gladyshev, A. V. Savelyev, N. V. Kryzhanovskaya, S. A. Blokhin, A. P. Vasil'ev, E.S. Semenova, A.E. Zhukov, R.P.Seisyan, M.V.Maximov, N.N.Ledentsov, V.M.Ustinov, «Modeling of excitation dependences of the photoluminescence from InAs quantum dots», Proceedings 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology" St. Petersburg, Russia, June 20–25, 2005, 14-15.

10. N. V. Kryzhanovskaya, A. G. Gladyshev, S. A. Blokhin, A. P. Vasil'ev, E. S. Semenova, A.E. Zhukov, M.V.Maximov, V.M.Ustinov, N.N.Ledentsov, D.Bimberg, «Temperature stability of optical properties of InAs quantum dots overgrown by AlAs/InAlAs layers» Proceedings 13th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology" St. Petersburg, Russia, June 20–25, 2005, pp. 18-19.

11. A. G. Gladyshev, N. V. Kryzhanovskaya, A.M. Nadtochy, E. S. Semenova, A.E. Zhukov, A. P. Vasil'ev, V.S.Mikhrin, Yu.G. Musikhin, M.V. Maximov, N.N.Ledentsov, V.M.Ustinov, «Comparative study of GaAs-based 1.5micron-range InAs/InGaAs and InAs/InAlAs self-assembled quantum dots», Phys.Stat.Sol (a), 2006, 203, No. 6, pp. 1359–1364.

Цитированная литература:

[1] D.I.Babic, K.Streubel, R.P.Mirin, N.M.Margalit, J.E.Bowers, E.L.Hu, D.E.Mars, L.Yang, K.Carey «Room-temperature continuous-wave operation of 1.54 μm vertical-cavity lasers», IEEE Photon. Technol. Lett., 7, pp. 1225-1227, (1995).

[2] Л.В. Асрян, Р.А. Сурис «Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках. Обзор», ФТП 38 (1). С. 3-25 (2003).

[3] N.N.Ledentsov «Long-wavelength quantum-dot lasers on GaAs substrates: from media to device concepts», IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., 8, pp. 1015-1017, (2002).

[4] А.Е.Жуков, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, Н.А.Малеев, А.П.Васильев, Е.В.Никитина, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, Ю.М.Шерняков, Ю.Г.Мусихин, М.В.Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И.Алферов, «Метаморфные лазеры спектрального диапазона 1.3 мкм, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs» ФТП 37 (9), стр. 1143-1147, (2003).

[5] N.N. Ledentsov and V.A. Shchukin "Novel Approaches to Semiconductor Lasers" (invited paper), in: Proceedings Asia Pacific Optical and Wireless Communications Conference, Shanghai, China, 14-18 October 2002 (APOC 2002, Photonics Asia). Materials and Devices for Optical and Wireless Communications, Constance J. Chang-Hasnain, Yuxing Xia, Kenichi Iga, Editors, Proceedings of SPIE, Vol. 4905 (2002) pp. 222-234.

- [6] 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. Shemyakov, N.V. Kryzhanovskaya, V.M. Ustinov, D. Bimberg "High performance quantum dot lasers on GaAs substrates operating in 1.5 μm range", *Electronics Letters* 39, pp.1126- 1128, (2003)
- [7] А.Е.Жуков, А.П.Васильев, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Е.С. Семенова, А.Ю.Егоров, В.А.Однoблюдов, Н.А.Малеев, Е.В.Никитина, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, Ю.М.Шерняков, М.В.Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Ж.И.Алферов, «Лазерная генерация на длине волны 1,5 мкм в структурах с квантовыми точками на подложках GaAs» ФТП, Т. 37(12), стр. 1461-1464, (2003).
- [8] A.F.Tsatsul'nikov, A.R.Kovsh, A.E.Zhukov, Yu.M. Shernyakov, Yu.G. Musikhin, V.M.Ustinov, N.A.Bert, P.S.Kop`ev, and Zh. I. Alferov «Volmer–Weber and Stranski–Krastanov InAs-(Al,Ga)As quantum dots emitting at 1.3 μm », *J.Appl.Phys.*, 88, pp. 6272-6275, (2000).
- [9] 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 островах», ФТП, 33 (8), стр. 990-995 (1999).
- [10] Z.Y.Zhang, B.Xu, P.Jin, X.Q.Meng, Ch.M.Li, X.L.Ye, D.B.Li, Z.G.Wang «Effect of InAlAs/InGaAs cap layer on optical properties of self-assembled InAs/GaAs quantum dots», *J.Cr.Gr.*, 241, pp. 304-308, (2002).
- [11] N. N. Ledentsov «MBE-grown metamorphic lasers for applications at telecom wavelengths» in: *Proceedings The 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Tokyo, Japan, 3-8 September 2006*, p.99.
- [12] 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. Mikhlin, V. M. Ustinov, Yu. G. Musikhin R. Heitz, V. A. Shchukin, W. Neumann, N. N. Ledentsov, Zh. I. Alferov, D. Bimberg «Tuning quantum dot properties by activated phase separation of an InGa(Al)As alloy grown on InAs stressors», *Phys. Rev. B.*, 62 (24), pp. 16671-16680, (2000).
- [13] V. Tokranov, M. Yakimov, A. Katsnelson, M. Lamberti, and S. Oktyabrsky «Enhanced thermal stability of laser diodes with shape-engineered quantum dot medium», *Appl.Phys.Lett.*, 83 (54), pp. 833-835, (2003).
- [14] I.R.Sellers, H.Y.Liu, M.Hopkinson, D.J.Mowbray and M.S.Skolnik «1.3 μm lasers with AlInAs-capped self-assembled quantum dots», *Appl.Phys.Lett.*, 83, pp. 4710-4712, (2003).
- [15] А.Ю. Егоров, А.Е.Жуков, П.С. Копьев, Н.Н.Леденцов, М.В.Максимов, В.М.Устинов, А.Ф. Цацульников, Д.Л. Федеров, Д. Бимберг, Ж.И. Алферов «Оптический диапазон излучения структур с напряженными квантовыми точками InAs в GaAs», ФТП 30 (8), стр. 1345-1350, (1996).
- [16] R.Heitz, O.Stier, I.Mukhametzhanov, A.Madhukar, D.Bimberg «Quantum size effect in self-organized InAs/GaAs quantum dots», *Phys.Rev.B*, 62 (16), pp. 11017-11028, (2000).