

На правах рукописи

Петровский Александр Владимирович

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫЕ
ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ InGaAs/GaAs/AlGaAs ДЛЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ
ЛАЗЕРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 1000-1100 нм**

Специальность:
01.04.21 – лазерная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2009

Работа выполнена в ФГУП «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха

Научный руководитель: доктор технических наук,
лауреат Государственной премии СССР
Дураев Владимир Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Якубович Сергей Дмитриевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Кротов Юрий Александрович

Ведущая организация: ОАО «Центральный научно-
исследовательский технологический
институт «Техномаш» (Москва)

Защита состоится «25» февраля 2009 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.212.156.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9, ауд. 204НК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института (государственного университета).

Автореферат разослан «22» января 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д.212.156.01

Батурин А.С.

Актуальность темы.

С самого момента появления инжекционные полупроводниковые лазеры (ИПЛ) привлекают к себе большое внимание. Возможность напрямую преобразовывать электрическую энергию в оптическую, миниатюрность, малоинерционность, низкая себестоимость при массовом производстве обеспечили ИПЛ самый широкий круг применений. К наиболее массовым относятся оптические системы хранения информации (CD, DVD, Blue-ray Disc), телекоммуникационные волоконные системы, накачка активных сред, медицина. Существуют и другие важные применения ИПЛ – спектроскопия, стандарты частоты, измерительная интерферометрия, голография, интегральная оптика и т.д.

У ИПЛ исследуемого в работе спектрального диапазона 1000-1100 нм существует ряд специфических применений. Зачастую они используются для замещения более дорогостоящих твердотельных и волоконных лазеров. В составе мощных импульсных лазерных систем они выступают в качестве задающих генераторов. ИПЛ исследуемого спектрального диапазона широко применяются в открытых линиях связи и лидарах, поскольку обеспечивают низкий уровень потерь на поглощение и рассеяние излучения. Использование схем с оптическим удвоением или утроением частоты позволяет создавать источники видимого лазерного излучения.

Для создания современных надежных ИПЛ спектрального диапазона 1000-1100 нм необходим учет ряда специфических особенностей исходных лазерных гетероструктур (ГС) InGaAs/(Al)GaAs. В частности, это высокий уровень механических напряжений и возможность образования кристаллических дефектов в активной области. Размытие номинального концентрационного профиля квантово-размерных слоев InGaAs в активной области оказывает существенное влияние на рабочие характеристики лазеров.

К моменту начала работы в литературе существовали качественные модели, описывающие наблюдаемые особенности. Однако их точность недостаточна для практических применений. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований особенностей напряженных квантово-размерных ГС InGaAs/(Al)GaAs. Также эти особенности должны учитываться при разработке лазерных ГС спектрального диапазона 1000-1100 нм.

Целый ряд параметров исходной лазерной ГС и активного элемента неоднозначно влияют на рабочие характеристики ИПЛ. Выбор оптимальной конфигурации ИПЛ, как правило, определяется областью применения разрабатываемых приборов. К настоящему моменту опубликовано большое количество работ, где основным критерием выступали условия снижения порогового тока или увеличения выходной мощности, яркости излучения.

Вместе с тем, в работах [1-2] показано, что особого внимания заслуживает задача улучшения эффективности ИПЛ. Высокая эффективность одновременно обеспечивает как увеличение срока службы, так и сверхлинейный рост максимальной выходной мощности. При этом основные результаты продемонстрированы на многомодовых ИПЛ. В спектральном диапазоне 1000-1100 нм преимущественно находят применение одномодовые ИПЛ. Вопросы увеличения ресурса и выходной мощности являются для них не менее актуальными.

При разработке одномодовых ИПЛ возникает дополнительная задача контроля модового состава излучения в поперечном направлении в широком диапазоне токов накачки. Как следствие, особенно важным становится правильный выбор параметров активного элемента, определяющих модовый состав и в значительной мере влияющих на эффективность ИПЛ.

Таким образом, для одномодовых ИПЛ спектрального диапазона 1000-1100 нм насущной представляется задача повышения эффективности их работы. При разработке лазерных квантово-размерных ГС InGaAs/(Al)GaAs должны учитываться особенности формирования напряженных слоев InGaAs. Помимо достижения высокой эффективности необходимо добиться сохранения режима одномодовой генерации ИПЛ в широком диапазоне токов накачки (вплоть до предельных значений).

Цель работы.

Исследование особенностей напряженных квантово-размерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs и разработка с учетом этих особенностей высокоэффективных одномодовых гребневых полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1000-1100 нм.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Исследование влияния условий роста гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs на сегрегационное размытие концентрационных профилей квантово-размерных слоев InGaAs, выращиваемых методом МОС-гидридной эпитаксии.
2. Разработка методики расчета концентрационных профилей гетероструктур с одной и несколькими напряженными квантовыми ямами InGaAs/GaAs.
3. Определение условий начала активного дефектообразования в напряженных квантово-размерных гетероструктурах InGaAs/(Al)GaAs.
4. Исследование влияния сегрегационного размытия концентрационных профилей квантово-размерных слоев InGaAs на спектральные свойства лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs и лазеров на их основе.
5. Оптимизация конфигурации напряженной квантово-размерной активной области лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs спектрального диапа-

зона 1000-1100 нм для создания высокоэффективных полупроводниковых лазеров.

6. Оптимизация геометрии активного элемента гребневого полупроводникового лазера для увеличения его эффективности при сохранении режима одномодовой генерации в широком диапазоне токов накачки (на примере лазеров спектрального диапазона 1060-1070 нм).

Научная новизна.

1. Исследовано влияние механических напряжений на поверхности роста на сегрегационное размытие концентрационных профилей квантово-размерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs, выращиваемых методом МОС-гидридной эпитаксии.
2. Определены общие условия начала дефектообразования в квантово-размерных гетероструктурах InGaAs/(Al)GaAs с произвольной конфигурацией напряженных слоев, выращиваемых методом МОС-гидридной эпитаксии.
3. Изучены спектральные особенности напряженных квантово-размерных лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs спектрального диапазона 1000-1100 нм и полупроводниковых лазеров на их основе.
4. Впервые в работе исследована возможность повышения эффективности полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1000-1100 нм за счет оптимизации активной области гетероструктуры с учетом сегрегационного размытия концентрационных профилей квантовых ям InGaAs/GaAs.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Механические напряжения на поверхности роста оказывают существенное влияние на сегрегационное размытие концентрационных профилей квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs.
2. Определение критических условий на образование дислокаций несоответствия в квантово-размерных гетероструктурах InGaAs/(Al)GaAs возможно только при учете сегрегационного размытия слоев InGaAs, снижающего уровень механических напряжений.
3. Наблюдаемое искажение геометрии активной области лазерных квантово-размерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs приводит к коротковолновому смещению спектра их люминесценции при использовании одной квантовой ямы, а также уширению и расщеплению спектра в случае нескольких ям.
4. Для полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs с двумя квантовыми ямами в активной области появление дополнительной коротковолновой компоненты в спектре при увеличении тока накачки обусловлено вовлечением в генерацию нижней, более размытой квантовой ямы.

- Для лазеров с одной квантовой ямой может наблюдаться скачкообразное укорочение длины волны, величина которого определяется геометрией ямы.
5. Сегрегационное искажение активной области лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs приводит к необходимости дополнительной оптимизации соотношения параметров квантовых ям, а также использования номинально неидентичных квантовых ям для повышения эффективности полупроводниковых лазеров.

Практическая ценность работы:

1. Определены режимы роста гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии, позволяющие снизить сегрегационное размытие концентрационных профилей напряженных квантово-размерных слоев InGaAs.
2. Разработана методика расчета концентрационных профилей квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs с произвольной конфигурацией напряженных слоев InGaAs.
3. Определено критическое значение эффективного напряжения сдвига на образование и распространение дислокаций несоответствия в напряженных гетероструктурах InGaAs/(Al)GaAs. Предложена методика оценки пригодности этих гетероструктур для производства полупроводниковых лазеров.
4. Разработана методика расчета положения максимума спектра электролюминесценции лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs в зависимости от соотношения мольных расходов МОС атомов индия и галлия для эпитаксиальной установки «СИГМОС-130». Точность расчета улучшена с 20 до 2 нм.
5. Достигнуто уменьшение ширины спектра электролюминесценции и увеличение интенсивности в его максимуме на 10-15% для лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs с двумя квантовыми ямами в активной области.
6. Создана лазерная гетероструктура InGaAs/(Al)GaAs с оптимизированной конфигурацией квантово-размерной активной области. Определены параметры активного элемента гребневых лазеров спектрального диапазона 1060-1070 нм на основе этой гетероструктуры, обеспечивающие высокую эффективность в режиме одномодовой генерации.

Использование результатов проведенных исследований позволило разработать одномодовые гребневые полупроводниковые лазеры с длиной волны 1060-1070 нм, обладающие высокой эффективностью работы. КПД разработанных лазеров увеличен на 15% и достигает уровня 0,55. При этом максимальная мощность в режиме одномодовой генерации составила 340 мВт, а предварительный ресурс работы с выходной мощностью 250 мВт и температурой теплоотвода 20°C - не менее 50000 часов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы были представлены в 12 докладах на различных всероссийских и международных конференциях. В том числе: 9-й Всероссийский симпозиум по прикладной промышленной математике (Кисловодск, 2008); «Тонкие пленки и наноструктуры» (Москва, 2005); European Materials Research Society Symposium (Warsaw, 2003); International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy XI (Berlin, 2002); European Materials Research Society Symposium (Strasbourg, 2001); XIII International Conference on Crystal Growth / XI International Conference on Vapor Growth and Epitaxy (Kyoto, 2001).

Волоконно-оптические модули на основе разработанных лазеров демонстрировались на международной выставке Фотоника (Москва, 2007)

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 24 научных работах. Их список приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 115 страниц, включающих 6 таблиц и 64 рисунка. Список цитируемой литературы включает в себя 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность исследования и разработки квантово-размерных ГС InGaAs/GaAs/AlGaAs для ИПЛ спектрального диапазона 1000-1100 нм. Сформулирована цель работы, показаны ее научная новизна, практическая ценность и приведены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава

В первой главе дан обзор литературных данных, посвященных характеристикам современных напряженных квантово-размерных лазерных ГС InGaAs/(Al)GaAs, а также основным тенденциям в разработке ИПЛ.

В первом разделе обсуждаются особенности исследуемой системы материалов InGaAs/(Al)GaAs. Вкратце описаны преимущества использования лазерных ГС с квантово-размерной активной областью, представлены основные уравнения методики расчета положения максимума спектров электролюминесценции этих ГС.

Для исследуемой системы материалов характерны высокий уровень механических напряжений и значительное искажение номинальных concentra-

ционных профилей напряженных слоев InGaAs. Представлены основные модели, которые используются для количественного описания поверхностной сегрегации индия в процессе эпитаксиального роста и дефектообразования. На основе экспериментальных данных, представленных в литературе и имевшихся к началу работы, показано, что рассмотренные модели с недостаточной степенью точности описывают характеристики ГС InGaAs/(Al)GaAs и требуют модификации.

Существенным при разработке одномодовых ИПЛ с длиной волны 1000-1100 нм является антиволноводный эффект. Изменение показателя преломления слоев ГС при увеличении концентрации неравновесных носителей может приводить к ослаблению встроенного волновода в плоскости p-n перехода.

Второй раздел посвящен вопросам увеличения эффективности работы ИПЛ. Показана необходимость проведения исследований в этом направлении. Рассмотрены основные механизмы потерь, а также предложены пути повышения КПД ИПЛ.

Вторая глава

Вторая глава посвящена изучению особенностей напряженных квантово-размерных ГС InGaAs/(Al)GaAs. Предлагаются теоретические модели и методики расчета, позволяющие с требуемой точностью оценивать кристаллическое совершенство ГС и описывать сегрегационное размытие концентрационных профилей слоев InGaAs. Обсуждаются особенности спектральных свойств лазерных ГС InGaAs/(Al)GaAs и ИПЛ на их основе.

В первом разделе проведено исследование сегрегационного эффекта в условиях МОС-гидридной эпитаксии для квантово-размерных ГС InGaAs/(Al)GaAs. В первую очередь было изучено влияние режимов эпитаксиального роста на степень сегрегационного размытия слоев InGaAs. В связи с тем, что исследуемые ГС используются для создания ИПЛ, дополнительным критерием при выборе оптимальных условий роста выступали люминесцентные свойства ГС. Для определения концентрационных профилей атомов индия, алюминия и галлия выращиваемых ГС использовалась Оже-спектроскопия с травлением под скользящим углом [3].

Согласно полученным экспериментальным данным сегрегационное размытие слоев InGaAs возрастает с увеличением температуры роста. Зависимость интенсивности электролюминесценции ГС InGaAs/(Al)GaAs от температуры роста является немонотонной и достигает максимума при 670-720°C. Другой способ уменьшения ширины гетерограниц слоя InGaAs состоит в замене прилегающих барьерных слоев GaAs на AlGaAs.

Снижение сегрегационного размытия квантовой ямы (КЯ) InGaAs/GaAs может быть достигнуто введением предосаждения индия на нижней гетерогра-

нице (перед началом роста) и остановкой роста на верхней. Остановка роста на нижней гетерогранице КЯ не влияет на ее ширину, но увеличивает интенсивность люминесценции ГС. Лучшие результаты электролюминесцентных измерений были получены при остановках роста на обеих гетерограницах.

На основе анализа концентрационных профилей ряда ГС с одной и двумя КЯ InGaAs/GaAs установлено, что ширина верхней и нижней гетерограницы КЯ не совпадают и имеют различную зависимость от мольной доли InAs в составе КЯ. Ширина нижней гетерограницы растет с увеличением мольной доли InAs, а верхняя – незначительно снижается. В рамках часто используемой модели сегрегации [4] вводится длина сегрегации λ , определяющая вероятность атома индия, находящегося в приповерхностной области в газовой фазе, оставаться в том же состоянии, не встраиваясь в кристаллическую решетку:

$R = e^{-\frac{a_{GaAs}}{2\lambda}}$. Значение λ остается неизменным, а, значит, обе гетерограницы согласно [4] должны иметь одинаковую и постоянную ширину.

Полученные результаты могут быть объяснены непостоянством длины сегрегации при эпитаксиальном росте напряженных слоев InGaAs. Предлагается дополнить модель [4] учетом зависимости значения λ от:

- номинального значения мольной доли InAs в составе КЯ x_{In}^u ;
- периода кристаллической решетки на поверхности роста $a_{нов}$;
- условий роста: при подаче (нижняя гетерограница) и без подачи (верхняя гетерограница) МОС индия в зону роста.

$$\lambda^{ниж} = \lambda_0^{ниж} + k_{In} \cdot x_{In}^u - k_a^{ниж} \cdot \frac{a_{нов} - a_{GaAs}}{a_{GaAs}} \quad (1)$$

$$\lambda^{верх} = \lambda_0^{верх} - k_a^{верх} \cdot \frac{a_{нов} - a_{GaAs}}{a_{GaAs}}$$

где $\lambda_0^{ниж}$, $\lambda_0^{верх}$, k_{In} , $k_a^{ниж}$, $k_a^{верх}$ – подгоночные параметры, которые подбирались на основе сравнения результатов расчета и Оже-профилей ГС, выращенных при оптимизированных условиях (температура роста 720°C, остановки роста на обеих гетерограницах). Для расчета периода решетки на поверхности роста в процессе эпитаксии использовалась модель [5], основанная на разбиении ГС на виртуальные тонкие слои, между которыми рассматривается механическое взаимодействие. Она позволяет рассчитать распределение периодов решетки и механических напряжений в слоях.

Использование описанной методики расчета позволило добиться высокой степени соответствия расчетных и измеренных концентрационных профилей атомов индия. Как следствие, улучшилась точность расчета положения максимума спектра электролюминесценции (± 2 нм). В зависимости от конфигурации

активной области ошибка при использовании оригинальной модели [4] могла составлять до 20 нм (рис. 1).

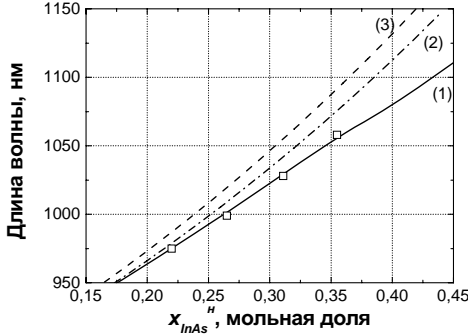


Рис. 1. Расчетная зависимость длины волны электролюминесценции ГС с одной КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ толщиной 66 \AA от номинального значения мольной доли InAs в ее составе.

- (1) – предлагаемая методика;
- (2) – модель сегрегации [4];
- (3) – прямоугольная КЯ.

□ – экспериментальные данные

Во втором разделе рассмотрены критические условия на начало активного дефектообразования в напряженных квантово-размерных ГС $\text{InGaAs}/(\text{Al})\text{GaAs}$. Процесс дефектообразования вследствие высоких механических напряжений в исследуемых ГС происходит путем генерации сетки дислокаций несоответствия и является пороговым. Критические условия определялись с использованием модели [6], в которой вводится эффективное напряжение сдвига τ_{eff} :

$$\tau_{eff} = A \left[\mu_{xy} \left| \int_{z-h}^z \varepsilon(z') \frac{dz'}{h} \right| - \frac{B}{h} \left(\ln \frac{\beta}{b} (h+z) + \ln \frac{\beta}{b} z + 2 \ln \left(\frac{h}{h+z} \right) \right) \right] \quad (2)$$

где A , B и β – коэффициенты, определяемые системой материалов. b – величина вектора Бюргерса дислокации. μ_{xy} – среднее значение модуля сдвига для напряженного слоя и подложки. h – суммарная толщина напряженных слоев. z – толщина прикрывающего слоя. ε – рассогласование периодов решетки. В зависимости от значения τ_{eff} ГС попадает в одну из трех областей: дислокации несоответствия не образуются; дислокации образуются, но их плотность невелика, или образуются с высокой плотностью.

При использовании данных о реальных ГС $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ необходимо учитывать сегрегационное размытие их концентрационных профилей. Для таких ГС особенно важной становится возможность модели [6] работать со слоями переменного состава. На основании расчета показано, что сегрегационное размытие слоев InGaAs приводит к эффективному снижению механических напряжений в ГС.

Анализ данных по электролюминесцентным измерениям ГС с одной, двумя и пятью КЯ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ позволил определить критическое значение эффективного напряжения сдвига в ГС $\tau^{meta} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot \mu_{\text{GaAs}}$, превышение которого приводит к увеличению плотности дефектов и резкому росту оптических по-

ть (рис. 2). Следует особо отметить, что величина τ^{meta} с хорошей точностью совпадает для ГС с различным числом КЯ.

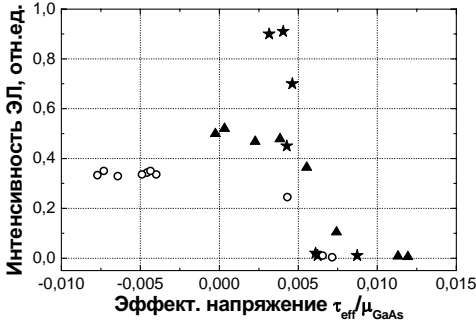


Рис. 2. Зависимость сигнала электролюминесценции лазерных ГС InGaAs/(Al)GaAs от τ_{eff} .

○, ▲, ★ – ГС с одной, двумя и пятью КЯ соответственно

$\tau_{eff} < 0$ – дислокации не образуются;
 $\tau^{meta} > \tau_{eff} > 0$ – дислокации могут образовываться, но в рамках используемой технологии их плотность мала;
 $\tau_{eff} > \tau^{meta}$ – плотность дислокации несоответствия велика.

В третьем разделе обсуждаются спектральные свойства напряженных квантово-размерных лазерных ГС InGaAs/(Al)GaAs. Внимание уделяется спектральным особенностям ГС, обусловленным сегрегационным искажением концентрационного профиля квантово-размерной активной области.

Сегрегация приводит к изменению зонной диаграммы активной области и соответствующему смещению энергетического спектра лазерных ГС. В результате нарушаются приводимые в литературе [8] расчетные зависимости длины волны межзонного перехода от состава активной области. Кроме того, для рассматриваемых ГС задача определения состава активной области затруднена, поскольку мольная доля InAs в составе КЯ постоянно изменяется, и ее классическая зависимость от мольного расхода МОС атомов индия [9] не выполняется.

На основе анализа спектров электролюминесценции целого ряда лазерных ГС с одной и двумя КЯ InGaAs/GaAs в активной области в сопоставлении с режимами их эпитаксиального роста определено значение коэффициента пропорциональности номинального значения мольной доли InAs и мольного расхода МОС атомов индия. Для установки МОС-гидридной эпитаксии «СИГМОС-130» его значение составило 0,92. Показано, что без учета сегрегационного эффекта погрешность определения коэффициента значительно возрастает. Таким образом, реализована методика расчета, позволяющая для требуемого положения максимума спектра электролюминесценции определить необходимый мольный расход МОС атомов индия и время роста квантово-размерного слоя InGaAs.

Для лазерных ГС с одной и двумя КЯ InGaAs/GaAs в активной области рассчитаны зависимости положения максимума спектра люминесценции от номинальной мольной доли InAs в составе КЯ (рис. 3). Показано, что наблю-

даемое длинноволновое смещение спектра люминесценции ГС с двумя КЯ относительно спектра ГС с одной КЯ при идентичности номинальных концентрационных профилей КЯ обусловлено влиянием механических напряжений в процессе роста на параметры поверхностной сегрегации.

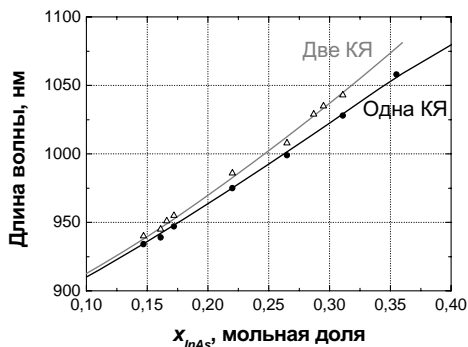


Рис. 3. Зависимость положения максимума спектра электролюминесценции ГС с одной и двумя КЯ InGaAs/GaAs от номинального значения мольной доли InAs в КЯ. Толщина КЯ 66 Å.

● и Δ — экспериментальные данные для ГС с одной и двумя КЯ соответственно.

Четвертый раздел посвящен исследованию спектральных особенностей ИПЛ на основе квантово-размерных ГС InGaAs/(Al)GaAs. Для ряда ИПЛ спектрального диапазона 1000-1100 нм наблюдалось скачкообразное коротковолновое переключение длины волны генерации. В зависимости от конфигурации активной области варьировался диапазон и характер переключения.

Для ИПЛ на основе ГС с одной КЯ в активной области переключение длины волны происходит на 50-100 нм в зависимости от толщины и состава КЯ. При этом происходит насыщение усиления на переходе между подзонами $1e-1hh$, и в генерации начинает участвовать переход между подзонами $1e-3hh$. Для ГС с тонкой КЯ (76 Å) в спектре генерации наблюдается вклад от перехода $1e-3lh$. Только учет сегрегационного эффекта обеспечивает требуемую точность расчета энергетического спектра ГС.

Для ИПЛ на основе ГС с двумя КЯ в активной области наблюдалось переключение длины волны на 10-15 нм и одновременная генерация двух групп мод в широком диапазоне токов накачки. Такое поведение обусловлено вовлечением в лазерную генерацию нижней КЯ. Для ГС с номинальным концентрационным профилем активной области такого переключения происходить не должно. Появления в спектре генерации полосы, связанной с переходами $1e-3hh$ для этих ИПЛ не отмечалось.

Третья глава

Третья глава посвящена оптимизации активной области лазерных ГС InGaAs/(Al)GaAs для высокоэффективных ИПЛ спектрального диапазона 1000-1100 нм. Рассмотрены конфигурации, обеспечивающие снижение плот-

ности носителей в активной области, уменьшение величины пороговых токов, увеличение внутренней квантовой эффективности ИПЛ. Учет особенностей используемой системы материалов приводит к необходимости внесения коррективов в геометрию квантово-размерной активной области.

В первом разделе обсуждаются общие подходы и принципы при разработке квантово-размерной области лазерных ГС. Проведен анализ литературы по вопросам влияния геометрии активной области лазерной ГС на характеристики ИПЛ. Указаны критерии выбора ширины и состава КЯ, обеспечивающие минимизацию пороговых токов ИПЛ [10]. В частности, эффективная плотность состояний в зоне проводимости в КЯ должна быть снижена, а величина интеграла перекрытия огибающих волновых функций нижних подзон размерного квантования для электронов и тяжелых дырок должна быть близка к единице.

Показано, что оптимальное количество КЯ в активной области зависит в том числе и от типа разрабатываемого ИПЛ (высокая выходная мощность, низкий порог, высокое быстродействие в импульсном режиме работы и т.д.). В частности, для мощных ИПЛ предпочтительно использовать ГС с двумя КЯ в активной области. Описана возможность дополнительного увеличения внутренней квантовой эффективности ИПЛ за счет введения дополнительных барьерных слоев вокруг квантово-размерной активной области.

Во втором разделе проводится оптимизация конфигурации квантово-размерной активной области лазерных ГС InGaAs/(Al)GaAs с целью снизить пороговые токи и обеспечить соответствующее увеличение эффективности работы ИПЛ.

В первую очередь исследованы лазерные ГС с одной КЯ InGaAs/GaAs в активной области. Сегрегационное размытие вызывает существенное искажение ее зонной диаграммы. В результате параметры КЯ, рассчитанные в предположении прямоугольности концентрационного профиля, требуют уточнения.

Результаты соответствующего расчета приведены на рис. 4 (кривая 1). Общая тенденция к снижению оптимальной толщины с увеличением глубины реальных КЯ сохраняется, как и для КЯ номинального профиля. Однако абсолютные значения толщины отличаются. В зависимости от состава КЯ разница может достигать 30 Å. Экспериментальная проверка расчетной зависимости подтвердила, что соответствующий выбор геометрии одиночной КЯ в активной области обеспечивает уменьшение пороговых токов на 10-20%.

При рассмотрении вопроса оптимального количества КЯ предполагалось, что концентрационный профиль КЯ в активной области является прямоугольным, а КЯ идентичны. Вместе с тем, КЯ InGaAs/GaAs вырастают неидентичными, их энергетические спектры различаются. В результате, для ИПЛ спектрального диапазона 1000-1100 нм с двумя КЯ в активной области в лазерной

генерации преимущественно принимает участие только одна КЯ (верхняя, более глубокая). В определенных условиях генерация происходит на обоих межзонных переходах в обеих КЯ, однако в этом случае спектр излучения расщеплен на две компоненты (раздел 2.4). Кроме того, при такой конфигурации активной области увеличиваются пороговые токи, снижается внутренняя квантовая эффективность, растут оптические потери.

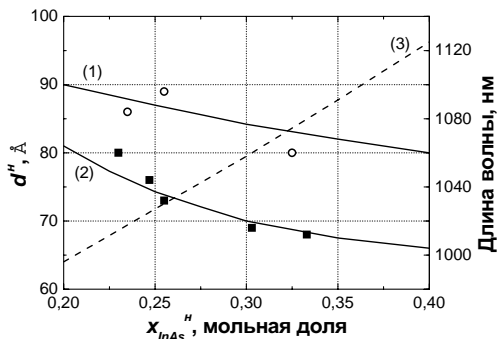


Рис. 4. Расчетная зависимость номинального значения толщины нижней (1) и верхней (2) КЯ от номинального значения мольной доли InAs в их составе, соответствующая условию минимизации пороговой плотности тока. (3) – соответствующая зависимость длины волны излучения на пороге генерации. \circ и \blacksquare – результаты оптимизации для ГС с одной и двумя КЯ.

Чтобы исправить эту ситуацию, необходимо корректировать режим роста одной КЯ относительно другой так, чтобы положения максимумов спектров усиления обеих КЯ совпадали. Особенности используемой системы МОСГЭ «СИГМОС-130» позволяют добиться необходимого положения нижних энергетических подзон, изменяя номинальную толщину КЯ при неизменности номинального значения мольной доли InAs в обеих КЯ. Поскольку нижняя КЯ имеет такой же концентрационный профиль, как и одиночная КЯ, ее толщина/состав выбирались в соответствии с рис. 4 (кривая 1). Результаты расчета для оптимальной толщины верхней КЯ представлены на рис. 4 (кривая 2).

Электролюминесцентные исследования ряда тестовых образцов с различным соотношением толщин верхней и нижней КЯ в активной области подтвердили правильность расчетной зависимости. Результатом оптимизации стало устранение расщепления (уширения) спектра усиления и дополнительное увеличение интенсивности в максимуме спектра электролюминесценции.

Согласно [10] при использовании нескольких КЯ в активной области связь между ними должна отсутствовать. В противном случае величина модового усиления уменьшается [11], а положения подзон размерного квантования смещаются. Вместе с тем, следствием сегрегационного размывания КЯ является эффективное уменьшение ширины барьерного слоя GaAs. Результаты расчета показывают, что для лазерных ГС спектрального диапазона 1000-1100 нм использование барьера толщиной 200 Å позволяет исключить связь между КЯ InGaAs/GaAs.

В третьем разделе исследованы возможности по увеличению внутренней квантовой эффективности ИПЛ при использовании ступенчатого волновода с двойным ограничением носителей. Введение дополнительных потенциальных барьеров вокруг активной области позволяет улучшить захват носителей в активную область, а также уменьшает токовые утечки в волноводные слои [12].

С использованием программы компьютерного моделирования работы оптоэлектронных приборов Crosslight PICS3D проведен расчет по подбору параметров барьерных слоев, обеспечивающих получение высокой внутренней квантовой эффективности ИПЛ. Расчет проведен во всем спектральном диапазоне 1000-1100 нм, чтобы учесть влияние глубины КЯ. По результатам расчета с точки зрения снижения оптических потерь и получения резкой гетерограницы между волноводом и барьерным слоем ширина последнего выбрана равной 100 Å.

С увеличением длины волны (глубины КЯ) необходимая высота потенциального барьера снижается. Для ИПЛ с длиной волны на пороге генерации 1000 нм мольная доля AlAs в составе волноводных слоев, определяющая высоту барьера, должна быть не менее 0,17. Для ИПЛ с длиной волны 1060 нм минимально допустимое значение снижается до 0,12. При длинах волн более 1090 нм возможно использование в качестве волновода слоев GaAs.

Четвертая глава

Четвертая глава посвящена разработке и экспериментальному исследованию характеристик высокоэффективных одномодовых гребневых ИПЛ спектрального диапазона 1060-1070 нм. ИПЛ разработаны на основе ГС с конфигурацией активной области, оптимизированной согласно результатам Главы 3. Эффективным путем дальнейшего улучшения характеристик ИПЛ является правильный подбор конфигурации активного элемента.

В первом разделе описаны используемые методики экспериментального исследования характеристик разрабатываемых ИПЛ. При разработке измерительного комплекса стояла задача обеспечения точности и воспроизводимости результатов, высокой скорости измерений и возможности сохранения результатов. С целью более тщательного изучения характеристик ИПЛ для ряда методик реализованы измерения в режиме «реального времени».

В работе проводились измерения вольт- и ватт-амперных характеристик ИПЛ в непрерывном режиме генерации. Исследовалось поведение спектра лазерной генерации при изменении тока накачки. Измерялось распределение интенсивности излучения в дальней зоне, определялась расходимость выходного пучка. Разработанные ИПЛ проходили ресурсные испытания для определения срока службы.

Второй раздел посвящен оптимизация конфигурации активного элемента одномодовых гребневых ИПЛ с длиной волны 1060-1070 нм. В работе использовалась лазерная ГС с оптимизированной конфигурацией активной области. Для волноводных и эмиттерных слоев использовалась традиционная геометрия, позволяющая добиться требуемой расходимости лазерного излучения и улучшения эффективности стыковки с волоконными световодами. Помимо повышения эффективности работы для разрабатываемых ИПЛ решалась задача обеспечения стабильной генерации на основной поперечной моде в широком диапазоне токов накачки.

В зависимости от ширины гребня и остаточной толщины волновода вне гребня с помощью программы Crosslight PICS3D выделено четыре области с различными режимами работы ИПЛ [13]. В частности, gain-guiding, многомодовая и одномодовая генерация, а также переходная область, где волновод поддерживает более одной поперечной моды, но отношение коэффициентов усиления для нулевой моды и мод высшего порядка значительно больше единицы. Далее рассматривались ИПЛ, относящиеся к двум последним областям. Общая тенденция состоит в том, что максимальное значение КПД η_c^{\max} растет при увеличении ширины гребня и ослаблении волновода в плоскости p-n перехода.

При выбранной конфигурации активного элемента ИПЛ попадает в переходную область с преобладанием нулевой моды. По сравнению с традиционно используемой конфигурацией, обеспечивающей исключительно одномодовую генерацию, выбранная геометрия волновода отличается увеличенной до 4 мкм шириной гребня и усилением встроенного волновода. Увеличение ширины гребня дополнительно обеспечивает улучшение эффективности работы ИПЛ при высоких токах накачки.

Соответствующий расчет показал, что дополнительного увеличения η_c^{\max} можно добиться при правильном подборе длины и коэффициента отражения переднего зеркала лазерного резонатора. В результате для разработанного одномодового ИПЛ с длиной резонатора 600 мкм получено 15%-ное увеличение значения η_c^{\max} , составившего 0,55. Для ИПЛ с длиной резонатора 1000 мкм максимальная мощность излучения в одномодовом режиме генерации достигла 342 мВт (рис. 5).

В третьем разделе приведены результаты исследования основных характеристик разработанных высокоэффективных одномодовых гребневых ИПЛ спектрального диапазона 1060-1070 нм. Отличительной особенностью исследованных ИПЛ являются низкие значения плотности порогового тока. Минимальное значение 430 А/см² получено для ИПЛ с длиной резонатора 1000 мкм. Для разработанных ИПЛ расширен диапазон токов, в котором

дифференциальная эффективность остается неизменной (0,90-0,95 Вт/А). Измеренное значение внутренних оптических потерь составило $2,5 \text{ см}^{-1}$, что на $0,8-1,0 \text{ см}^{-1}$ меньше типичных значений для одномодовых ИПЛ. Получено значение внутренней квантовой эффективности на уровне 0,9.

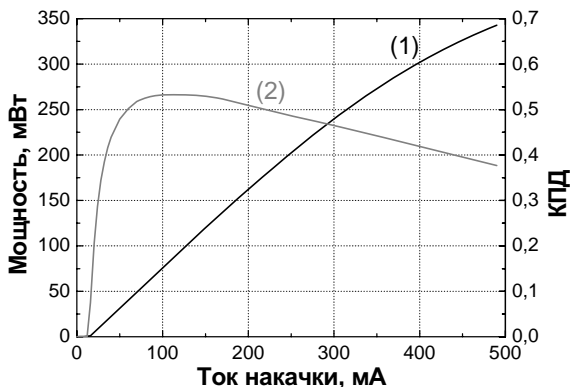


Рис. 5. ВтАХ (1) и КПД (2) одномодовых гребневых ИПЛ с длиной волны 1060-1070 нм. Длина резонатора 1000 мкм, ширина гребня 4,0 мкм; толщина р-эмиттера вне гребня 350 нм; коэффициенты отражения зеркал 0,06 и 0,98.

Как показывает расчет, проведенный с помощью программы PICS3D, модификацией конфигурации волноводных и эмиттерных слоев можно добиться снижения значений последовательного сопротивления, напряжения отсечки и внутренних оптических потерь, что обеспечит дальнейшее увеличение эффективности работы ИПЛ.

Исследование спектральных свойств показало, что у разработанных ИПЛ отсутствует расщепление спектра генерации на две группы мод. С увеличением тока накачки происходит длинноволновое смещение центральной длины волны относительно порогового значения и плавное увеличение ширины спектра. Однако даже при максимальном токе накачки в одномодовом режиме генерации ширина спектра не превышала 5 нм.

Во всем диапазоне токов накачки одномодовой генерации распределение интенсивности в дальней зоне в направлениях, перпендикулярном и параллельном р-п переходу, хорошо аппроксимировалось гауссовыми кривыми. Расходимость излучения составляла 31,3 и 7,6 град соответственно. Переход к режиму многомодовой генерации для ИПЛ с длиной резонатора 1000 мкм происходил при токах 480-500 мА, а катастрофическая деградация зеркал наблюдалась при токах более 600 мА (выходная мощность на уровне 370 мВт).

Достижение высокого КПД работы обеспечивает снижение тепловыделения в активной области. В результате для разработанных ИПЛ уменьшается абсолютная температура активной области. В соответствии с [14] это приводит к улучшению надежности работы ИПЛ. По результатам исследований прогнозируемый ресурс работы ИПЛ с выходной мощностью 250 мВт при температуре теплоотвода 20°C составляет не менее 50 000 часов.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Определены оптимальные условия роста квантово-размерных лазерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии.
2. Разработана методика расчета концентрационных профилей квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs, обеспечивающая высокую точность моделирования и малую погрешность определения положения максимума спектра электролюминесценции (не хуже 2 нм).
3. Установлены критические условия на образование и распространение дислокаций несоответствия в напряженных квантово-размерных гетероструктурах InGaAs/(Al)GaAs ($\tau^{meta} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot \mu_{GaAs}$). Предложена методика оценки пригодности гетероструктур для производства полупроводниковых лазеров.
4. Показано, что спектральные особенности квантово-размерных лазерных гетероструктур, связанные с коротковолновым смещением и уширением (расщеплением) спектра люминесценции, обусловлены сегрегационным искажением активной области.
5. Показано, что использование гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs с двумя квантовыми ямами в активной области позволяет избежать коротковолнового переключения в спектре генерации полупроводниковых лазеров.
6. Установлены оптимальные соотношения параметров для активной области лазерных гетероструктур с двумя квантовыми ямами InGaAs/(Al)GaAs, обеспечивающие высокую эффективность работы полупроводниковых лазеров спектрального диапазона 1000-1100 нм.
7. Проведен расчет оптимальной геометрии активного элемента высокоэффективных одномодовых гребневых полупроводниковых лазеров.
8. По результатам диссертационной работы созданы и исследованы одномодовые гребневые полупроводниковые лазеры спектрального диапазона 1000-1100 нм со следующими параметрами: максимальное значение полного КПД 55%; максимальная мощность излучения в одномодовом режиме 340 мВт; прогнозируемый ресурс работы не менее 50 000 часов.

Публикации автора.

1. В.П. Дураев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.В. Петровский, Д.Р. Сабитов, М.А. Сумароков, А.В. Сухарев. «Влияние особенностей формирования квантоворазмерных гетероструктур InGaAs/(Al)GaAs на спектральные характеристики лазерных диодов, изготовленных на их основе». Квантовая электроника. т.38, 2008, с.97.
2. Дураев В.П., Мармалюк А.А., Петровский А.В. «Лазеры на основе наноструктур InGaAs/(Al)GaAs, генерирующие в диапазоне длин волн 1010-1080 нм». Фотоника, №2, 2008, с.22.
3. V.P. Duraev, A.A. Marmalyuk, A.V. Petrovskiy. «Tunable laser diodes». Spectrochimica Acta Part A. v.66A, 2007, p.846.
4. Акчурин Р.Х., Дураев В.П., Малджы А.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Петровский А.В., Сабитов Д.Р., Сухарев А.В. «Влияние сегрегационных явлений при формировании квантово-размерных гетероструктур InGaAs/GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии на образование дислокаций несоответствия». Материалы Электронной Техники. Известия вузов. №2, 2007, с.18.
5. Дураев В.П., Петровский А.В. «Перестраиваемые диодные лазеры». Фотон-экспресс. №6, 2006, с.20
6. В.П. Дураев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.В. Петровский, Ю.А. Рябоштан, А.В. Сухарев. «Особенности получения напряженных квантовых ям InGaAs для лазерных диодов с длиной волны излучения 1,06 мкм». Международная научная конференция «Тонкие пленки и наноструктуры», тезисы докладов. Москва, ноябрь 2005.
7. В.П. Дураев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, А.В. Петровский, Ю.А. Рябоштан, М.А. Сумароков, А.В. Сухарев. «Влияние барьерных слоев GaAsP на параметры лазерных InGaAs/AlGaAs-диодов спектрального диапазона 1050-1100 нм». Квантовая электроника. т.35, 2005, с.909.
8. Akchurin R.Kh., Andreev A.Y., Govorkov O.I., Marmalyuk A.A., Petrovsky A.V., Zalevsky I.D. «Indium Segregation Effects in InGaAs/GaAs Multiple QW Heterostructures Grown by MOCVD» Abstracts of E-MRS 2003. Warsaw, September 2003.
9. Akchurin R.Kh., Andreev A.Y., Govorkov O.I., Marmalyuk A.A., Petrovsky A.V. «The Influence of Elastic Stresses During Growth of (Al)GaAs/InGaAs/(Al)GaAs Quantum Well Heterostructures on Indium Distribution». Applied Surface Science. v. 188, 2002, p. 209.
10. Marmalyuk A.A., Govorkov O.I., Petrovsky A.V., Nikitin D.B., Padalitsa A.A., Bulaev P.V., Budkin I.V., Zalevsky I.D. «Investigation of Indium Segregation in InGaAs/(Al)GaAs Quantum Wells Grown by MOCVD». J. Cryst. Growth. v. 237–239, 2002, p. 264.

11. Булаев П.В., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Никитин Д.Б., Петровский А.В., Залевский И.Д., Коняев В.П., Оськин В.В., Зверков М.В., Симаков В.А., Зверев Г.М. «Мощные полупроводниковые лазеры на основе квантоворазмерных напряженных структур в системе InGaAs/(Al)GaAs спектрального диапазона 0,89 – 1,06 мкм с малой расходомостью излучения». Квантовая электроника. т.32, 2002, с.213.
12. Булаев П.В., Говорков О.И., Залевский И.Д., Кригель В.Г., Мармалюк А.А., Никитин Д.Б., Падалица А.А., Петровский А.В. «Влияние особенностей гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/(Al)GaAs, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии, на спектр излучения одномодовых лазерных диодов». Квантовая электроника. т.32, 2002, с.216.
13. A.A. Marmalyuk, A.V. Petrovskiy, O.I. Govorkov, D.B. Nikitin, A.A. Padalitsa, P.V. Bulaev, I.V. Budkin, I.D. Zalevsky. «Inequality of close spaced InGaAs/ GaAs/ AlGaAs Quantum Wells Grown by MOCVD». ICMOVPE XI. Berlin, June 2002.
14. Акчурин Р.Х., Андреев А.Ю., Говорков О.И., Мармалюк А.А., Петровский А.В. «Влияние напряжений на перераспределение индия в квантовых ямах InGaAs/GaAs». VIII Международная научно-технической конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники», тезисы докладов. Дивноморское, Сентябрь 2002.
15. Акчурин Р.Х., Андреев А.Ю., Говорков О.И., Мармалюк А.А., Петровский А.В., Сабитов Д.Р. «Моделирование распределения индия в гетероструктурах InGaAs/(Al)GaAs с квантовыми ямами». I Всероссийская конференция «Физико-химические процессы в конденсированном состоянии и на межфазных границах», тезисы докладов. Воронеж, Ноябрь 2002.
16. Акчурин Р.Х., Андреев А.Ю., Берлинер Л.Б., Говорков О.И., Мармалюк А.А., Петровский А.В., Сабитов Д.Р. «Моделирование распределения индия в процессе получения гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs с множественными напряженными квантовыми ямами» X Национальная конференция по росту кристаллов. Тезисы докладов. Москва, Ноябрь 2002.
17. Мармалюк А.А., Петровский А.В., Никитин Д.Б., Падалица А.А., Булаев П.В., Залевский И.Д., Говорков О.И., Сабитов Д.Р. «Проблема формирования резких гетерограниц InGaAs/(Al)GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии». X Национальной конференции по росту кристаллов, тезисы докладов. Москва, Ноябрь 2002.
18. Петровский А.В., Мармалюк А.А., Никитин Д.Б., Падалица А.А., Булаев П.В., Залевский И.Д., Говорков О.И., Акчурин Р.Х. «Влияние механических напряжений на профиль квантовых ям InGaAs/GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии». X Национальной конференции по росту кристаллов, тезисы докладов. Москва, Ноябрь 2002.

19. Мармалюк А.А., Петровский А.В., Никитин Д.Б., Падалица А.А., Булаев П.В., Будкин И.В., Залевский И.Д. «Особенности дефектообразования в структурах с квантовыми ямами InGaAs/(Al)GaAs, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии». X Национальной конференции по росту кристаллов, тезисы докладов. Москва, Ноябрь 2002.
20. Marmalyuk A.A., Govorkov O.I., Petrovskiy A.V., Nikitin D.B., Padalitsa A.A., Bulaev P.V., Budkin I.V., Zalevsky I.D. «Influence of Aluminum Content in Barrier on Indium Distribution in InGaAs/AlGaAs Quantum Wells Grown by MOCVD». Proceedings 9th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology», St Peterburg, June 2001.
21. Marmalyuk A.A., Govorkov O.I., Petrovskiy A.V., Nikitin D.B., Padalitsa A.A., Bulaev P.V., Budkin I.V., Zalevsky I.D. «Investigation of Indium Segregation in InGaAs/(Al)GaAs Quantum Wells Grown by MOCVD». Abstracts of ICCG-13/ICVGE-11. Kyoto, July 2001.
22. Akchurin R.Kh., Andreev A.Y., Govorkov O.I., Marmalyuk A.A., Petrovskiy A.V. «The Influence of Elastic Stresses During Growth of (Al)GaAs/InGaAs/(Al)GaAs Quantum Well Heterostructures on Indium Distribution». Abstracts of E-MRS Symposium. Strasbourg, June 2001.
23. Marmalyuk A.A., Govorkov O.I., Petrovskiy A.V., Nikitin D.B., Padalitsa A.A., Bulaev P.V., Budkin I.V., Zalevsky I.D. «Influence of Barrier Layers on Indium Segregation in Pseudomorphic InGaAs/(Al)GaAs Quantum Wells Grown by MOCVD». Nanotechnology, v.12, 2001, p.434
24. Zalevsky I.D., Bezotosny V.V., Bulaev P.V., Govorkov O.I., Marmalyuk A.A., Padalitsa A.A., Petrovskiy A.V. «Investigation of Singlemode InGaAs DQW SCH Laser Diodes Spectra Particularities». Abstracts of X International Conference on Laser Optics 2000 (LO'2000). St. Peterburg, June 2000.

Цитируемая в автореферате литература.

- [1] M. Kanskar, M. Nesnidal, S. Meassick, A. Goulakov, E. Stiers, Zheng Dai, T.E. Earles, D. Forbes, D. Hansen, P. Corbett, Ling Zhang, T. Goodnough, L. LeClair, N. Holehouse, D. Botez, L.J. Mawst. «Performance and reliability of ARROW single mode & 100 μ m laser diode and the use of NAM in Al-free lasers». Proc. SPIE, v.4995, 2003, p.196
- [2] Williamson R., Kanskar M. «Improving the efficiency of high-power diode lasers». Compound Semiconductor, v.7, 2004, p.137
- [3] Hofmann S. «Atomic mixing, surface roughness and information depth in high-resolution AES depth profiling of a GaAs/AlAs superlattice structure». Surf. Interf. Anal., v.21, 1994, p.673
- [4] K. Muraki, S. Fukatsu, Y. Shiraki, R. Ito. «Surface segregation of In atoms during molecular beam epitaxy and its influence on the energy levels in InGaAs/GaAs quantum wells». Appl. Phys. Lett. v.61, 1992, p.557.
- [5] K. Nakajima. «Calculation of compositional dependence of stresses in InGaAs/GaAs strained multilayer heterostructures». J. Cryst. Growth, v.126, 1993, p.511
- [6] Houghton D.C., Davies M., Dion M. «Design criteria for structurally stable, highly strained multiple quantum well devices». Appl. Phys. Lett., v.64, 1994, p.505
- [7] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee. «Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations». J. Cryst. Growth, v.27, 1974, p.118
- [8] Diode Laser Arrays. Ed. D. Botez, D.R. Scifres. Cambridge University Press, 1994.
- [9] Stringfellow G.B. Organometallic Vapour Phase Epitaxy. Theory and Practice. Second Edition. Academic Press, 1999.
- [10] Quantum well lasers. ed. by P.S. Zory, Jr. Academic Press, 1993
- [11] A.I. Akhtar, C.-Z. Guo, J.M. Xu. «Effect of well coupling on the optical gain of multi-quantum-well lasers». J. Appl. Phys., v.73, 1993, p.4579
- [12] Г.В. Скрынников, Г.Г. Зегря, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, В.В. Шахматов, И.С. Тарасов. «О внутреннем квантовом выходе стимулированного излучения InGaAsP/InP-гетеролазеров». ФТП, т.37, 2003, с.243
- [13] С.А. Плисюк, Д.В. Батрак, А.Е. Дракин, А.П. Богатов. «Моделирование излучательных характеристик и оптимизация волноводных параметров гребнёвого полупроводникового гетеролазера для получения максимальной яркости излучения». Квантовая электроника, т.36, 2006, с.1058
- [14] Х. Кейси, М. Паниш, Лазеры на гетероструктурах. Москва, «Мир», 1981

Подписано в печать 20.01.09
Формат 60x84 1/16, Усл. печ. л. 1,5
Тираж 100 экз. Заказ № 3

Печать на аппаратуре Сору Printer 1280
НИЧ МФТИ, 141700, Московская область,
г. Долгопрудный, Институтский пер., 9