

на правах рукописи



Деребезов Илья Александрович

**ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРОВ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ  
РЕЗОНАТОРОМ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaAs-AlGaAs**

Специальность (01.04.10)

(Физика полупроводников)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико–математических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель:

Гайслер Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Кибис Олег Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Новосибирский государственный технический университет.

Ткаченко Виталий Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится «18» июня 2013 года в 16-30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090 Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

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

Автореферат разослан «14» мая 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



Артур Григорьевич Погосов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) традиционной полосковой конструкции в настоящее время активно и успешно используются для самого широкого спектра практических приложений: в лазерных принтерах, волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), оптических системах записи и хранения информации, оптических датчиках и сенсорах, устройствах накачки твердотельных лазеров, медицинской аппаратуре, контрольно-измерительной аппаратуре, оптических системах обработки информации [С1]. Однако традиционные полосковые лазеры обладают несколькими принципиальными недостатками, обусловленными их конструкцией, к числу которых можно отнести:

- несимметричная диаграмма и большая угловая расходимость выходного излучения ЛД, что приводит к малому коэффициенту ввода света в оптическое волокно;
- высокая температурная нестабильность длины волны лазерного излучения (на уровне 0,3–0,4 нм/градус);
- существенная температурная зависимость порогового тока ЛД ;
- невозможность тестирования приборных структур на подложке до их разделения на индивидуальные кристаллы и монтажа на радиатор;

Все возрастающие требования, предъявляемые к современным лазерам, используемым в системах передачи, обработки и хранения информации, обуславливают необходимость преодоления недостатков традиционных полосковых ЛД, что делает актуальным разработку новых конструкций приборов. На данный момент одним из наиболее перспективных типов полупроводниковых лазеров, лишенных перечисленных выше недостатков, является инжекционный лазер с вертикальным резонатором (ЛВР) [С1 – С5]. Современные варианты конструкции ЛВР основаны на использовании вертикальных оптических высокочастотных микрорезонаторов с зеркалами в виде распределенных брэгговских отражателей (РБО) [С1, С2]. При такой конструкции микрорезонатора излучение распространяется в направлении, перпендикулярном к плоскости эпитаксиальных слоев, образующих лазерную структуру [С6]. В качестве активной области в ЛВР используются квантово-размерные структуры, квантовые ямы (КЯ) или квантовые точки (КТ), помещаемые вблизи пучностей оптического поля микрорезонатора. Брэгговские отражатели обеспечивают эффективную локализацию электромагнитной волны в вертикальном направлении. Оксидные апертуры, получаемые с помощью селективного окисления слоев AlGaAs с высоким содержанием Al, задают эффективную локализацию электромагнитной волны в латеральном направлении. Оксидные апертуры

обеспечивают также эффективное токовое ограничение. К числу основных преимуществ ЛВР по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции можно отнести:

- малую угловую расходимость и симметричную диаграмму направленности выходного излучения ЛВР, обусловленную цилиндрической симметрией микрорезонатора;
- существенно меньший объем микрорезонатора (единицы  $\text{мкм}^3$ ), обеспечивающий экономичность работы данного типа лазерных излучателей (пороговые и рабочие токи единицы мА и меньше [С7]), а также высокое быстродействие излучателей (частота токовой модуляции достигает десятков ГГц [С8]);
- высокую температурную стабильность длины волны (на уровне 0,05 нм/градус);
- групповую технологию изготовления, обеспечивающую возможность тестирования ЛВР непосредственно на пластине без деления на отдельные кристаллы.

В течение последних десяти лет ЛВР все шире используются в телекоммуникационных системах, в частности, в локальных ВОЛС. Однако, и в настоящее время актуальной остается задача исследования физических процессов работы ЛВР, детального исследования их характеристик с целью улучшения их приборных параметров, исходя из требований конкретных новых применений. В частности, весьма актуальной является разработка лазеров с одномодовым режимом излучения, работающих на строго фиксированной длине волны; сверхминиатюрных лазеров с микроамперными пороговыми и рабочими токами, представляющих интерес для создания оптоэлектронных систем нового поколения, таких как системы параллельной передачи и обработки данных, миниатюрных атомных стандартов частоты.

**Цель настоящей работы** заключается в исследовании физических процессов, разработке конструкции и технологии изготовления полупроводниковых ЛВР на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами GaAs, AlGaAs, InAs, представляющих интерес для создания оптоэлектронных устройств нового поколения.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи**:

1. Проведение математического моделирования конфигурации электромагнитного поля в лазерных микрорезонаторах с использованием одномерной и трехмерной моделей. Исследование модового состава, параметров стабильности одномодового режима генерации. Разработка конструкции ЛВР на основе полученных результатов.
2. Отработка базовых элементов технологии вертикально излучающих лазеров с селективно окисленными апертурами и различными вариантами используемых зеркал. Изготовление экспериментальных образцов ЛВР.
3. Экспериментальное исследование и анализ модового состава ЛВР с GaAs КЯ.

4. Реализация и исследование ЛВР с микроамперным пороговым током на базе гетероструктур с InGaAs КЯ.
5. Изготовление и исследование характеристик одномодовых ЛВР для атомных стандартов частоты с длиной волны генерации 795 нм, соответствующей переходу  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$ .

**Научная новизна** работы:

1. Экспериментально исследована и интерпретирована тонкая структура линий излучения основной моды в ЛВР спектрального диапазона 850 нм с GaAs квантовыми ямами.
2. Разработаны и исследованы ЛВР на основе одиночных  $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  КЯ с высокодобротными микрорезонаторами, обеспечивающими сверхнизкие пороговые и рабочие токи излучателей.
3. Разработан и апробирован метод стабилизации поляризации лазерного излучения с использованием омического контакта асимметричной формы.
4. Разработаны и исследованы одномодовые ЛВР на основе  $\text{Al}_{0,07}\text{Ga}_{0,93}\text{As}$  КЯ с перестраиваемой длиной волны вблизи 795 нм, пригодные для использования в миниатюрных атомных стандартах частоты работающих на переходах  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$ .

**Практическая значимость результатов** заключается в следующем:

Разработаны экспериментальные образцы ЛВР с различными вариантами активных областей и микрорезонаторов. Полученные решения могут быть использованы при создании ЛВР, характеристики которых отвечают требованиям конкретным применений, таких как локальные ВОЛС, атомные стандарты частоты.

**Основные научные положения**, выносимые на защиту:

**Положение 1**

В ЛВР одновременная генерация близких по частоте фундаментальных мод с взаимно перпендикулярной поляризацией излучения, обусловлена встроенными электрическими полями на границах гетероструктуры, образующей ЛВР.

**Положение 2**

При разработке одномодовых ЛВР с прецизионной длиной волны генерации необходимо учитывать уменьшение длины волны генерации ЛВР при уменьшении размера оксидной апертуры ЛВР.

**Положение 3**

Микрорезонаторы на основе полупроводниковых и гибридных брэгговских зеркал GaAs/AlGaO с малыми оптическими потерями и высокой добротностью пригодны для создания сверхминиатюрных ЛВР с низкими пороговыми и рабочими токами на уровне десятков мкА.

#### Положение 4

Ассиметричная инжекция тока в брэгговский микрорезонатор ЛВР является эффективным способом стабилизации направления поляризации лазерного излучения.

**Достоверность** и надежность представленных в диссертационной работе результатов обеспечиваются применением современных методов исследования, воспроизводимостью результатов, совпадением экспериментальных и расчетных результатов, а так же реализацией на их основе действующих макетов ЛВР.

**Личный вклад** соискателя в диссертационную работу заключается в активном участии в постановке задач и определении способов их решения, проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных данных, проведении модельных расчетов. Автор участвовал в обсуждении полученных результатов, подготовке докладов и публикаций.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на:

- Совещание: «Актуальные проблемы полупроводниковой фотозлектроники», Новосибирск 2003, Россия;
- «VI Российская конференция по физике полупроводников», Санкт – Петербург 2003, Россия;
- «VI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто – и наноэлектронике», Санкт – Петербург 2004, Россия;
- «6<sup>th</sup> International Siberian Workshop and Tutorial EDM'2005», Эрлагол 2005, Россия;
- «2nd International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers», Ялта 2005, Украина;
- «VII Российская конференция по физике полупроводников», Москва 2005, Россия;
- «7<sup>th</sup> International Siberian Workshop and Tutorial EDM'2006», Эрлагол 2006, Россия;
- «8<sup>th</sup> International Siberian Workshop and Tutorial EDM'2007», Эрлагол 2007, Россия;
- «10<sup>th</sup> International Siberian Workshop and Tutorial EDM'2009», Эрлагол 2009, Россия;
- «IX Конференция по физике полупроводников», Новосибирск 2009, Россия;
- «Нанозфизика и Нанозлектроника, XIV международный симпозиум», Нижний Новгород 2010, Россия;

а также на научных семинарах лаборатории № 37 ИФП СО РАН.

**Публикации.** Основные результаты работы опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 5 в научных статьях и 11 в материалах конференций, получен 1 патент РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем диссертации 148 страниц машинописного текста, в том числе 59 рисунков 4 таблиц и списка литературы из 72 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, указана её научная новизна, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер в ней представлен литературный обзор современных работ, посвященных лазерам с вертикальным резонатором. Рассматривается принцип работы, основные особенности и достоинства ЛВР. Представлены конструкции современных ЛВР и характеристики данного типа излучателей. Отдельный параграф посвящен лазерам с низким пороговым током, приводятся литературные данные по достигнутым к настоящему времени минимальным значениям пороговых токов ЛВР. Рассматриваются конструктивные особенности излучателей с низким пороговым током. В заключительном параграфе данной главы описан миниатюрный атомный стандарт частоты на основе ЛВР. Описан принцип действия данного миниатюрного стандарта и его преимущества по сравнению с традиционно используемыми эталонами частоты, базирующимися на температурно-компенсированном кварцевом генераторе. Определяются основные требования, предъявляемые к ЛВР для миниатюрного атомного стандарта частоты. Основываясь на литературных данных [С9], выбрана оптимальная рабочая длина волны лазера с вертикальным резонатором, которая составляет 795 нм.

**Вторая глава** посвящена методам расчета характеристик лазерных микрорезонаторов с брэгговскими зеркалами.

В **первом параграфе** рассматривается одномерная модель расчета параметров ЛВР структур, основанная на использовании метода характеристических матриц [С10]. Данная модель применима для расчета распределения электромагнитного поля с учетом оптического поглощения в слоистых структурах с произвольным числом слоев, в том числе в полупроводниковых многослойных ЛВР структурах, а так же для расчета спектров отражения и пропускания, как полных лазерных структур, так и её основных элементов.

**Второй параграф** посвящен рассмотрению расчета характеристик полной ЛВР структуры на основе трехмерной модели собственных мод (программный пакет CAMFR [С11]). В этой модели полная лазерная структура разделяется на части с постоянным показателем преломления, в каждой из этих частей находятся собственные моды. Сшивка собственных мод каждого слоя на границе слоев производится с использованием граничных условий. Данная модель позволяет рассчитать модовый состав лазерного излучения и пороговое усиление для каждой моды.

В **третьей главе** описаны технологические процессы изготовления полупроводниковых лазеров с микрорезонаторами. Описаны методики, применявшиеся для изучения свойств гетероструктур и ЛВР на их основе: спектроскопии фотолюминесценции и оптического

отражения; методики исследования генерационных (спектральных, вольт-амперных, ватт-амперных) характеристик ЛВР, а также картин ближнего поля излучения лазерных диодов в широком диапазоне температур.

**Четвертая глава** посвящена исследованию лазеров с вертикальным резонатором на основе GaAs квантовых ям в качестве активной области. Конструкция этого типа лазеров близка к традиционной схеме, используемой в производстве коммерческих ЛВР для локальных ВОЛС с длиной волны 850 нм.

В первом параграфе проведен теоретический анализ модовых характеристик ЛВР с использованием одномерной и трехмерной моделей. При помощи одномерной модели произведен расчет распределения квадрата амплитуды электрического поля в лазерном микрорезонаторе, спектра отражения полной структуры ЛВР. С использованием трехмерной модели произведен расчет генерационной длины волны, порогового усиления для различных лазерных мод, а также параметров модовой стабильности для ЛВР с диаметрами апертур в диапазоне от 1 мкм до 10 мкм. Параметр модовой стабильности (МС) задается следующим соотношением

$$MS = 100\% * \frac{G_{TEM_{01}} - G_{TEM_{00}}}{G_{TEM_{00}}},$$

где  $G_{TEM_{00}}$  пороговое усиление основной моды ( $TEM_{00}$ ),  $G_{TEM_{01}}$  пороговое усиление первой поперечной моды ( $TEM_{01}$ ). Параметр модовой стабильности характеризует возможность генерации лазера в одномодовом режиме, чем больше параметр, тем больше вероятность. На (рис. 1) приведены результаты расчета зависимости МС от диаметра апертуры. Для больших апертур (> 6 мкм) МС составляет единицы процента, в то время как для апертур меньше 3 мкм МС превышает 100%, что обеспечивает одночастотный режим генерации. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с результатами расчетов.

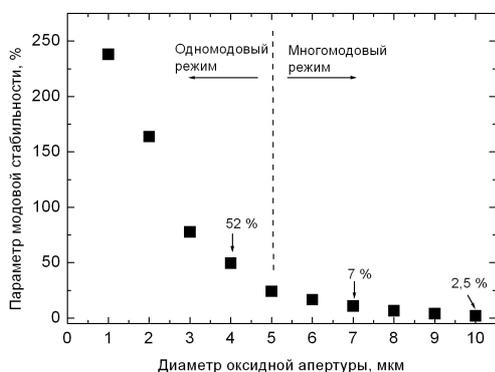


Рис. 1 Зависимость MS от диаметра оксидной апертуры ЛВР

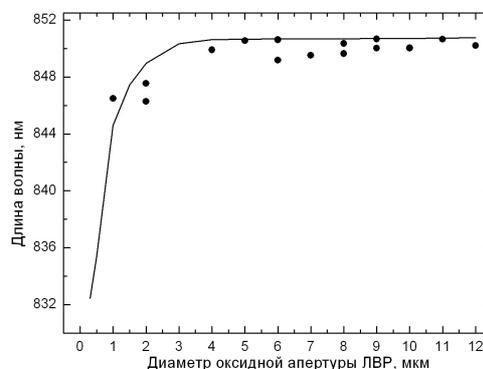


Рис. 2 Зависимость генерационной длины волны ЛВР от диаметра оксидной апертуры

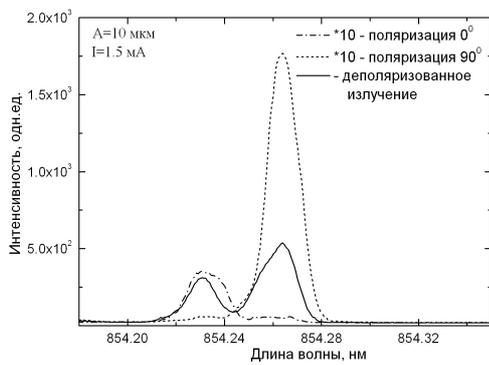


Рис. 3 Спектр фундаментальной моды в различных направлениях в ЛВР с диаметром оксидной апертуры 10 мкм.

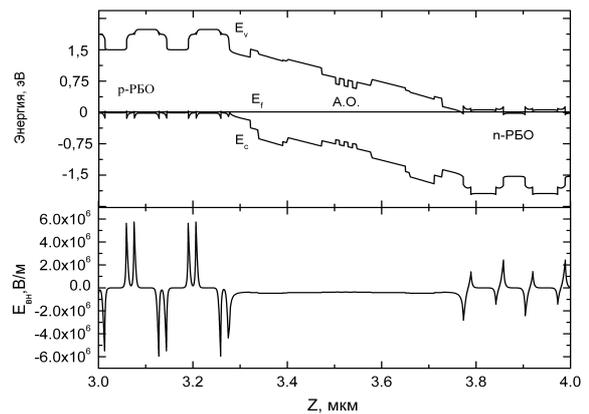


Рис. 4 Зонная диаграмма части лазерной структуры и рассчитанное внутреннее электрическое поле.

Во втором параграфе приведены результаты исследования основных генерационных характеристик ЛВР на основе GaAs квантовых ям: ватт-амперных зависимостей и спектральных характеристик лазерного излучения. Лазеры демонстрируют пороговый ток, варьирующийся в диапазоне от 0,5 мА до 2 мА и генерационную длину волны в диапазоне от 846 нм до 852 нм в зависимости от диаметра оксидной апертуры ЛВР. По мере уменьшения диаметра оксидной апертуры лазера происходит уменьшение объема моды, что приводит к увеличению частоты излучения лазера. На рисунке 2 точками показана экспериментальная, а сплошной линией теоретическая зависимости, видно, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. Исследование спектральных характеристик ЛВР проводилось с разрешением  $\sim 0,01$  нм, благодаря чему была обнаружена тонкая структура линий излучения ЛВР. Данная структура проявляется в виде дублетов, триплетов или более сложной конфигурации пиков в зависимости от апертуры лазера и условий возбуждения, при этом величина расщепления фундаментальной моды составляет  $\sim 0,03$  нм (рис. 3) во всех исследованных лазерных структурах. В третьем параграфе рассматривается аналитическая модель появления тонкой структуры линий излучения ЛВР. Расчеты показывают, что расщепление между фундаментальной и первой поперечной модой для лазера с апертурой 10 мкм составляет  $\sim 0,3$  нм, и оно увеличивается по мере уменьшения размера апертуры ЛВР. Для лазера с апертурой 1 мкм величина расщепления составляет  $\sim 10$  нм. Это означает, что экспериментально обнаруженное расщепление основной моды равное 0,03 нм не может быть интерпретировано как расщепление между фундаментальной и первой поперечной модой. Причиной появления тонкого расщепления линий излучения ЛВР, по нашему мнению является наличие встроенного электрического поля на гетерограницах слоев входящих в состав лазера (рис. 4). Наличие этого поля приводит к электрооптическому эффекту,

который проявляется в незначительном изменении показателей преломления в ортогональных направлениях на гетерогранице слоев.

**Пятая глава** посвящена исследованию лазеров с вертикальным резонатором на основе InGaAs квантовых ям в качестве активной области. Дизайн этого типа лазеров оптимизирован для достижения минимальных оптических потерь, высокой добротности микрорезонатора и работы при низких температурах (80 К).

В первом параграфе рассматриваются факторы, учет которых принципиален при конструировании ЛВР с высокой добротностью, работающего при низких температурах. Производится теоретическое рассмотрение лазерного микрорезонатора при помощи одномерной и трехмерной моделей. В результате проведенного анализа была выбрана конструкция ЛВР, обеспечивающая малые оптические потери и высокую добротность. Микрорезонатор лазера образован высокоэффективными низколегированными (выходное зеркало) и нелегированными (верхнее зеркало) распределенными брэгговскими отражателями (РБО), что значительно снижает оптические потери на поглощение свободными носителями заряда. С целью уменьшения оптических потерь все без исключения высоколегированные слои (контактные, апертурные, туннельные) располагаются в узлах стоячей волны, положение квантовой ямы совпадает с максимумом стоячей волны. Верхнее зеркало, образованное GaAs/Al<sub>0,95</sub>Ga<sub>0,05</sub>O<sub>x</sub> слоями и слоями Ti/Au, характеризуется очень высоким коэффициентом отражения в широком спектральном диапазоне (700 – 1200 нм), в центре этого диапазона (вблизи рабочей длины волны ЛВР) расчетное значение коэффициента отражения зеркала составляет 0,9999. Выходное (нижнее) GaAs/AlAs зеркало также характеризуется высоким значением коэффициента отражения, на рабочей длине волны расчетное значение коэффициента отражения (полученное с учетом поглощения на свободных носителях заряда) составляет 0,9989. Расчетное значение добротности лазерного микрорезонатора составило  $Q = 2,4 \cdot 10^4$ . При снижении температуры происходит увеличение коэффициента квантового усиления, а также происходит смещение в коротковолновую область положения максимума полосы квантового усиления и положения резонанса лазера. Максимум полосы усиления смещается за счет увеличения ширины запрещенной зоны InGaAs материала, а положение резонанса ЛВР за счет уменьшения значений показателей преломления материалов, образующих лазерный резонатор.

Второй параграф содержит результаты измерений основных генерационных характеристик ЛВР на основе InGaAs квантовых ям. При снижении температуры до T=80 К расчетные значения максимума полосы квантового усиления и резонансной длины волны лазера составляют 916 нм и 918 нм, соответственно. При T=80 К генерационная длина волны экспериментальных образцов ЛВР составила 918 нм, что очень хорошо согласуется с расчетными значениями. Лазер с

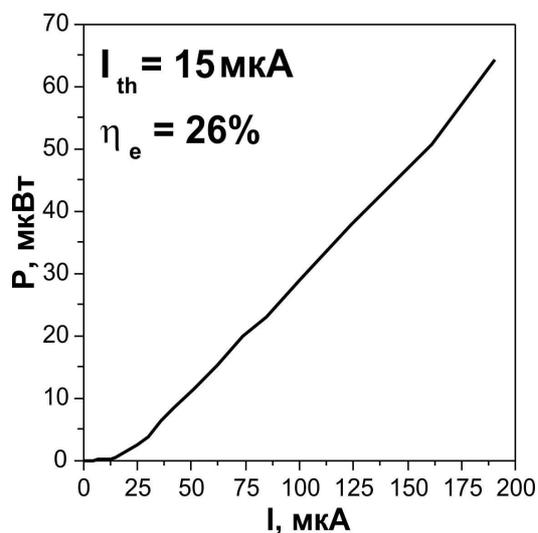


Рис. 5. Ватт-амперная зависимость ЛВР с оксидной апертурой 5 мкм при  $T=77$  К

диаметром оксидной апертуры 8 мкм при  $T=80$  К продемонстрировал пороговый ток  $I_{th}=30$  мкА, плотность порогового тока при этом составила  $j_{th}=47$  А/см<sup>2</sup>, а дифференциальная внешняя квантовая эффективность ЛВР  $\eta_e = 31\%$ . Лазер с диаметром оксидной апертуры 5 мкм продемонстрировал сверхмалый пороговый ток  $I_{th}=15$  мкА (рис. 5), дифференциальная внешняя квантовая эффективность ЛВР  $\eta_e = 26\%$ . Данный результат находится на уровне лучших мировых достижений.

В шестой главе приведены результаты исследования полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором на основе AlGaAs квантовых ям в качестве активной области. Конструкция данного лазера оптимизирована на работу в одномодовом режиме с длиной волны 795 нм, соответствующей переходу  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$ , что открывает перспективы его использования в миниатюрном атомном стандарте частоты нового поколения.

В первом параграфе при помощи одномерной и трехмерной моделей проведено моделирование конфигурации лазерного микрорезонатора, обеспечивающей одномодовый режим работы лазера. Конфигурация лазерного микрорезонатора включает в себя легированные полупроводниковые четвертьволновые зеркала, между которыми располагается активная область

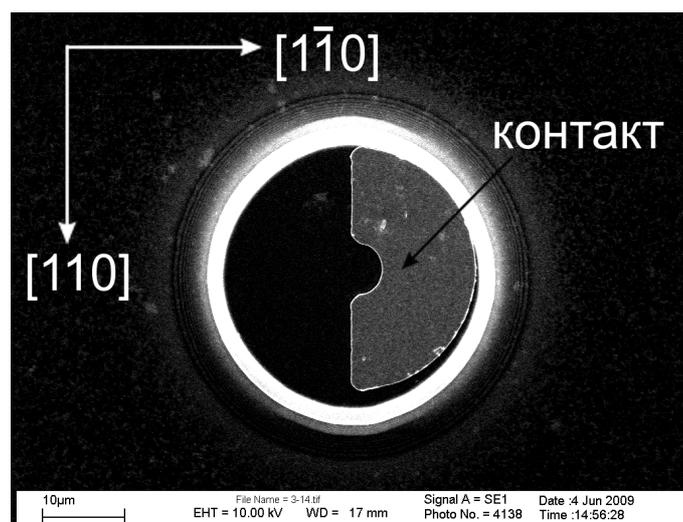


Рис. 6 Контакт специальной формы к верхнему брэгговскому отражателю ЛВР.

шириной  $\lambda$ , содержащая квантовые ямы, токовое и оптическое ограничение задается оксидной апертурой. Внутренний диаметр оксидной апертуры, при котором еще возможен одномодовый режим работы лазера, не превышает 5 мкм. С целью стабилизации направления поляризации излучения в лазере используется асимметричная инжекция тока, задающаяся специальной формой контакта к верхнему брэгговскому отражателю ЛВР (рис. б), которая в свою очередь задает градиент температуры и механических напряжений

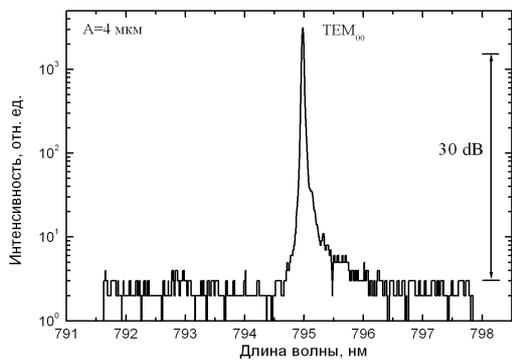


Рис. 7 Спектр излучения ЛВР с  $A=4$  мкм при  $I = 4 I_{th}$  Одномодовый режим генерации на длине волны 795.0 нм

вдоль направления  $[1\bar{1}0]$ . Таким образом, направления  $[110]$  и  $[\bar{1}10]$  не являются эквивалентными, следовательно, поляризация излучения должна быть ориентирована вдоль одного из них.

Во втором параграфе приведены результаты исследований одномодовых лазеров с вертикальным резонатором на основе AlGaAs квантовых ям. Исследования проводились на ЛВР с апертурами ( $A$ ) в диапазоне от 2 до 8 мкм с шагом 1 мкм. Все исследованные ЛВР продемонстрировали генерационный режим работы при субмиллиамперном уровне токовой накачки  $I_{th}$  (от 100 до 800 мкА в зависимости от размера токовой апертуры). Выходная мощность ЛВР в исследованном диапазоне токов накачки составила не ниже 200 мкВт. Максимально достигнутое значение выходной мощности ( $\sim 350$  мкВт) исследованном диапазоне токов накачки получено на ЛВР с  $A=4$  мкм. Квантовая эффективность изготовленных ЛВР составляет 0,3-0,4 мкВт/мкА. Исследована зависимость максимальной выходной мощности ЛВР в одномодовом режиме генерации от размера токовой апертуры. Показано, что одномодовая генерация во всем диапазоне рабочих токов наблюдается при сравнительно малых размерах токовой апертуры ( $A < 5$  мкм), а максимальная выходная оптическая мощность фундаментальной моды ограничена токовым саморазогревом полной лазерной структуры. Исследование спектральных характеристик показало, что лазеры с  $A \leq 5$  мкм демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации во всем исследованном диапазоне тока накачки (0 – 1,5 мА) (рис. 7), лазеры с  $A=6$  мкм работают в одномодовом режиме лишь при небольшом превышении порогового тока, и наконец, лазеры с большей апертурой при любых уровнях накачки работают только в многомодовом режиме. Полученные экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с проведенными расчетами. Исследование генерационных характеристик одномодовых ЛВР показало, что подход в задании и стабилизации направления поляризации лазерного излучения с использованием асимметричной инжекции тока является эффективным. Поляризация излучения всех исследованных ЛВР, работающих в одномодовом режиме, стабильна и совпадает с кристаллографическим направлением  $[110]$ .

В третьем параграфе рассматривается возможность точной подстройки длины волны лазерного излучения под резонанс  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$ . Длина волны излучения ЛВР должна составлять  $\sim 795$  нм, при этом точная подстройка длины волны ЛВР под рабочий переход

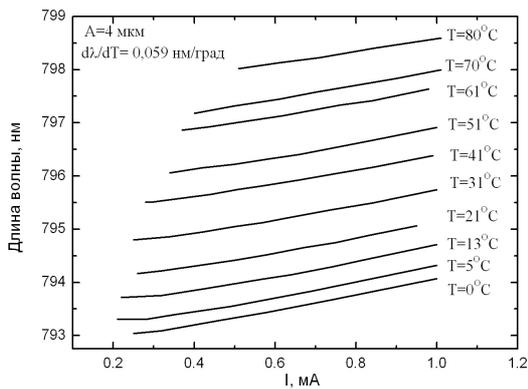


Рис. 8 Температурные зависимости длины волны ТЕМ<sub>00</sub> моды при различных уровнях накачки.

Влияние температуры на длину волны излучения ЛВР определяется двумя основными факторами. С повышением температуры возрастают значения показателей преломления полупроводниковых материалов, образующих микрорезонатор лазера. Рост температуры приводит, также, к расширению материалов, образующих лазерный микрорезонатор. Оба эти фактора приводят к увеличению резонансной длины волны брэгговского микрорезонатора. Таким образом, с ростом температуры происходит увеличение длины волны ЛВР (рис. 8). Температурный коэффициент изменения длины волны лазерного излучения составляет  $d\lambda/dT = 0,059$  нм/градус, что находится в хорошем соответствии с литературными данными [С2 – С4].

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Проведено математическое моделирование конфигурации электромагнитного поля в лазерных микрорезонаторах с использованием одномерной и трехмерной моделей. На основе полученных данных разработаны конструкции ЛВР: (а) с высокочастотным микрорезонатором, обеспечивающим сверхмалые пороговые и рабочие токи лазера, (б) с длиной волны генерации 795 нм, отвечающей резонансу  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$ .
2. Экспериментально обнаружена и исследована тонкая структура линий излучения основной моды, обусловленная одновременной генерацией близких по частоте фундаментальных мод с взаимно перпендикулярной поляризацией излучения. Данное расщепление связано с электрооптическим эффектом, обусловленным встроенными электрическими полями на границах гетероструктуры, образующей ЛВР.
3. Теоретически и экспериментально исследован эффект «синего» сдвига генерационной длины волны ЛВР с уменьшением размера оптической апертуры, который обусловлен уменьшением объема моды в латеральном направлении. Данный эффект необходимо

$5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов  $^{87}\text{Rb}$  может осуществляться как путем изменения внешней температуры, так и за счет изменения уровня инжекции. Лазер при этом должен работать в одномодовом режиме. Исследования температурных зависимостей характеристик лазерного излучения при различных уровнях инжекции проводились только для лазеров с апертурой  $A=4$  мкм, обеспечивающих одномодовый режим генерации во всем диапазоне рабочих температур ( $20 \div 80$  °C).

учитывать при разработке ЛВР с прецизионной длиной волны генерации для атомных стандартов частоты.

4. Отработаны базовые элементы технологии ЛВР, обеспечивающие задание генерационной длины волны с точностью лучше 1%.
5. На основе InGaAs КЯ и высокочастотных микрорезонаторов, содержащих полупроводниковые и гибридные РБО, реализованы сверхминиатюрные ЛВР с пороговым током  $I_{th}=15$  мкА и плотностью порогового тока  $j_{th}=47$  А/см<sup>2</sup> (Т=80 К).
6. Показано, что асимметричная инжекция тока в лазерный микрорезонатор является эффективным способом стабилизации направления поляризации лазерного излучения.
7. Разработаны и реализованы ЛВР с активной областью на основе AlGaAs КЯ с длиной волны генерации 795 нм, пригодные для использования в миниатюрных атомных стандартах частоты работающих на переходах  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов <sup>87</sup>Rb. ЛВР с апертурой 4 мкм демонстрируют устойчивый одномодовый режим генерации, что находится в полном соответствии с теоретическими расчетами. Продемонстрирована максимальная выходная мощность одномодовой генерации в непрерывном режиме на уровне 350 мкВт с фактором подавления поперечных мод 30 дБ. Прецизионная подстройка частоты лазера под резонанс  $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$  атомов <sup>87</sup>Rb может осуществляться путем изменения температуры, экспериментально определенный температурный коэффициент составляет  $d\lambda/dT = 0,059$  нм/градус.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

- A1. Haisler V. A. Ultralow-threshold cryogenic vertical-cavity surface-emitting laser with AlAs oxide – GaAs distributed Bragg reflectors / V. A. Haisler, I.A. Derebezov, A. I. Toropov, A. K. Bakarov, O. R. Bajutova, A. K. Kalagin, M. M. Kachanova, N. B. Kuzmin, A. S. Medvedev and A. S. Suranov // Journal of Applied Physics – 2004. – Vol. 96 – P. 1289 – 1292.
- A2. Гайслер В.А. Исследование генерационных характеристик лазеров с вертикальным резонатором на основе In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As квантовых ям / В.А. Гайслер, И.А. Дерезев, А.И. Торопов, А.К. Бакаров, О.Р. Баютова, А.К. Калагин, М.М. Качалова, А.С. Медведева, Л.А. Ненашева, А.С. Суранов // Известия Академии Наук (Серия Физическая) – 2004. – Т. 68, № 18. – С. 18-20.
- A3. Дерезев И.А. Одномодовые лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрных атомных стандартов частоты / И.А. Дерезев, В.А. Гайслер, А.К. Бакаров, А.К. Калагин, А.И. Торопов, М.М. Качанова, Т.А. Гаврилова, А.С. Медведев, Л.А. Ненашева,

- В.М. Шаяхметов, О.И. Семенова, К.В. Грачев, В.К. Сандырев, Д.Б. Третьяков, И.И. Бетеров, В.М. Энтин, В.М. Энтин // Автометрия. – 2009. – Т. 45, № 4. – С. 95 – 102.
- A4. Дерезев И.А. Одномодовые лазеры с вертикальным резонатором для миниатюрного атомного эталона частоты на основе атомов Rb87 / И.А. Дерезев, В.А. Гайслер, А.К. Бакаров, А.К. Калагин, А.И. Торопов, М.М. Качанова, Т.А. Гаврилова, О.И. Семенова, Д.Б. Третьяков, И.И. Бетеров, В.М. Энтин, И.И. Рябцев // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т.44, №11. – С.1470 – 1474.
- A5. Гайслер В.А. Излучатели на основе полупроводниковых брэгговских микрорезонаторов» / В.А. Гайслер, И.А. Дерезев, А.И. Торопов, И.И. Рябцев // Автометрия. – 2011. – Т. 47, № 5. – С. 25– 32.
- A6. Патент на полезную модель № 91782 РФ. Лазер с вертикальным резонатором с длиной волны 795нм / Гайслер В.А., Дерезев И.А., Торопов А.И., Бакаров А.К. // Бюл. -2010.- № 6.
- A7. Гайслер В.А. Низкопороговые полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором на основе AlO – GaAs брэгговских зеркал / В.А. Гайслер, И.А. Дерезев, А.И. Торопов, А.К. Бакаров, О.Р. Баютова, А.К. Калагин, М.М. Качалова, А.С. Медведева, Л.А. Ненашева, А.С. Суранов // Труды Совещания актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники Фотоника -2003 (Новосибирск, Россия, 28-31 августа 2003). С.45.
- A8. Гайслер В.А. Низкопороговые полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором на основе In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As квантовых ям / В.А. Гайслер, И.А. Дерезев, А.И. Торопов, А.К. Бакаров, О.Р. Баютова, А.К. Калагин, М.М. Качалова, А.С. Медведева, Л.А. Ненашева, А.С. Суранов // Труды VI Российской конференции по физике полупроводников (Санкт – Петербург, Россия, 27-31 октября 2003). С. 496.
- A9. Гайслер В.А. Исследование генерационных характеристик лазеров с вертикальным резонатором на основе GaAs и InGaAs квантовых ям / В.А. Гайслер, И.А. Дерезев // Труды VI Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто – и наноэлектронике (Санкт – Петербург, Россия, 6 – 9 декабря 2004), С.114.
- A10. Haisler V.A. Lasing characteristics of vertical – cavity surface – emitting lasers based on GaAs and InGaAs quantum wells / V.A. Haisler, I.A. Derebezov // Proceedings of 6th International Siberian Workshop and Tutorial EDM-2005 (Erlagol, Russia, 1- 5 July 2005).- P. 30.
- A11. Haisler V.A. Mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers based on GaAs quantum wells / V.A. Haisler, I.A. Derebezov // Proceedings of 2nd International Conference

on Advanced Optoelectronics and Lasers (Yalta, Crimea, Ukraine, 12 -17 September 2005). - P. 237.

- A12. Гайслер В.А. Исследование модовых характеристик микрорезонаторов на основе GaAs/AlGaAs и GaAs/AlO брэгговских зеркал / В.А. Гайслер, И.А. ДЕРЕБЕЗОВ // Труды VII Российской конференции по физике полупроводников (Москва, Россия, 18 – 23 сентября 2005). – С. 90.
- A13. Derebezov I.A. Fine Structure of Lasing Modes Vertical Cavity Surface Emitting Laser Based on GaAs Quantum Well / I.A. Derebezov // 7th International Siberian Workshop and Tutorial EDM – 2006 (Erlagol, Russia, 1- 5 July 2006). P. – 95.
- A14. Derebezov I.A. Linear electro-optic effect in vertical-cavity surface emitting lasers based on GaAs quantum well / I.A. Derebezov // 8th International Siberian Workshop and Tutorial EDM – 2007 (Erlagol, Russia, 1- 5 July 2007). P. – 115.
- A15. Derebezov I.A. Single mode vertical cavity surface emitting laser for chip-scale atomic clock based on Rb87 / I.A. Derebezov, V.A. Haisler, A.K. Bakarov, A.I. Toropov, M.M. Kachanova, V.M. Entin, I.I. Ryabtsev // 10th International Siberian Workshop and Tutorial EDM – 2010 (Erlagol, Russia, 1- 5 July 2010). P. – 100.
- A16. ДЕРЕБЕЗОВ И.А. Одномодовый лазер с вертикальным резонатором для миниатюрного атомного стандарта частоты / И.А. ДЕРЕБЕЗОВ, В.А. ГАЙСЛЕР, А.К. БАКАРОВ, А.И. ТОРОПОВ, М.М. КАЧАНОВА, В.М. ЭНТИН, И.И. РЯБЦЕВ // Труды IX Конференции по физике полупроводников (Новосибирск – Томск, Россия, 28 сентября – 3 октября 2009). С. 301.
- A17. ДЕРЕБЕЗОВ И.А. Лазер с вертикальным резонатором для миниатюрного атомного эталона частоты на основе Rb87 / И.А. ДЕРЕБЕЗОВ, В.А. ГАЙСЛЕР //Труды XIV международного симпозиума «Нанофизика и Нанофотоника» (Нижний Новгород, Россия, 15 – 19 марта 2009). С. 437.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- C1. Coldren L.A. Diode lasers and photonic integrated circuits / L.A. Coldren, and S.W. Corzine // New York, Wiley, 1995. – 594 p.
- C2. J. Cheng Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Technology and Applications / Cheng J. and Dutta N.K. // Amsterdam, Gordon and Breach Science Publishers, 2000. – 323 p.
- C3. T.E. Sale Vertical Cavity Surface Emitting Lasers / Sale T.E.// New York, Wiley , 1995. – 312 p.
- C4. C.W. Wilsmen Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization and Application / Wilsmen C.W., Temkin H. and Coldren L.// Cambridge University Press, 1999. – 474 p.

- C5. H.E. Li Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Devices / Li H.E. and Iga K. // Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2002. – 386 p.
- C6. H. Soda GaInAsP/InP surface emitting injection lasers / Soda H., Iga K., Kitahara C., Suematsu Y. // Jpn. Appl. Phys. – 1979. – Vol.18. – P. 2329 – 2330.
- C7. G.M. Yang Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation / Yang G.M., MacDougal M.H. and Dapkus P.D.// Electronics Letters. – 1995. – Vol.31.N.11. – P. 886 – 888.
- C8. S. A. Blokhin Oxide-confined 850 nm VCSELs operating at bit rates up to 40 Gbit/s / Blokhin S. A., Lott J. A., Mutig A., Fiol G., Ledentsov N. N., Maximiv M. V., Nadtochiy A. M., Shchukin V. A., Bimberg D. // Electronics Letters. – 2009. – Vol.45.N.10. – P. 501 – 503.
- C9. M. Stähler Coherent population trapping resonances in thermal 85Rb vapor: D1 versus D2 line excitation / Stähler M., Wynands R., Knappe S., Kitching J., Hollberg L., Taichenachev A., Yudin V. // Optics Letters – 2002 – Vol.27.N.16. – P. 1472 – 1474.
- C10. М. Борн Основы оптики / Борн М., Вольф Э. // Издательство «Наука» главная редакция физико – математической литературы, Москва, 1973. – 720 с.
- C11. P. Bienstman Rigorous and efficient modeling of wavelength scale photonic components / Bienstman P. // dissertation, Gent University, Faculty for information technologies, 2001. – 213 p.