

На правах рукописи

СКОРОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКЦИОННЫХ
ЛАЗЕРОВ СО СВЯЗАННЫМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ
РЕЗОНАТОРАМИ**

Специальность 01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва - 2007

Работа выполнена на кафедре физики колебаний физического факультета
Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор Логгинов Александр Сергеевич;

кандидат физико-математических наук,
Ржанов Алексей Георгиевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Богатов Александр Петрович;

кандидат физико-математических наук,
Виноградов Имант Имантович.

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН.

Защита состоится “ 1 ” ноября 2007 г. в 15 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 501.001.67 физического факультета МГУ по адресу
119991, Москва, Ленинские горы, физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова,
ауд. ЦФА .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “ 27 ” сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 501.001.67

кандидат физико-математических наук, доцент

Королев А.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа относится к области оптоэлектроники, изучающей проблемы одновременного использования оптических и электрических методов обработки, передачи и хранения информации. Основные элементы оптоэлектроники – источники света, оптические среды и фотоприемники. Именно благодаря быстрому развитию технологий в этой области, а точнее в системах оптоволоконной передачи данных, произошел глобальный технологический и научный прорыв в области коммуникаций - появилась всемирная компьютерная сеть интернет. Одной из основных составляющих технологической революции явилось создание компактных и легко управляемых источников когерентного излучения - полупроводниковых лазеров. Начало быстрого прогресса в разработках таких лазеров было положено в научной группе Ж.И. Алферова, где был создан первый полупроводниковый лазер на гетероструктуре в системе GaAs-GaAlAs, работающий при комнатной температуре. В результате успешного развития технологии создания гетероструктур полупроводниковые лазеры стали самым распространенным в мире источником когерентного излучения. В 1977 году японским ученым Кеничи Ига была предложена новая геометрия полупроводникового лазера, а сконструированное им устройство получило название “лазер с вертикальным резонатором” (ЛВР, англ. обозначение – VCSEL, Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser). Основная идея, заложенная в основу новой геометрии прибора, заключалась в выводе излучения не с торцов лазера в плоскости гетероперехода, а перпендикулярно ей. Это позволило облегчить изготовление и тестирование новых устройств, а также заметно упростило их интеграцию с другими элементами оптоэлектроники. Удачными оказались и рабочие характеристики новых лазеров. ЛВР отличаются от полупроводниковых лазеров излучающих с торца симметричной диаграммой направленности излучения, малыми токами накачки, одномодовым по продольным модам режимом генерации. Первая публикация по этим лазерам появилась в 1978 году, а первое работающее устройство было создано в 1979 году. В дальнейшем ЛВР прошли такой же путь развития, как и полупроводниковые лазеры традиционной геометрии. Демонстрация генерации при

комнатной температуре относится к 1988 году. Интенсивные исследования, направленные на создание ЛВР с длинами волн 980, 850 и 780 нм, проводившиеся с 1992 года, завершились появлением коммерческих лазеров такого типа.

В наши дни развитие этой технологии продолжается. Широкое использование лазеров с вертикальным резонатором в современной оптоэлектронике ограничивается рядом нерешенных проблем. Можно выделить следующие актуальные темы исследований в данной области.

Создание длинноволновых (1300-1550 нм.) и перестраиваемых ЛВР важно для замены полупроводниковых лазеров классической геометрии, используемых в оптоволоконных системах передачи данных на большие расстояния. В таких системах традиционно применяются именно длинноволновые лазеры, т.к. длину волны излучения передатчика выбирают в соответствии с существующими в оптическом волокне спектральными зависимостями затухания и дисперсии. Перестройка длины волны излучения лазера необходима для реализации возможности использования одного прибора в качестве передатчика сразу для нескольких каналов в системах передачи данных со спектральным уплотнением. Помимо этого, перестройка длины волны позволяет поддерживать спектр излучения прибора постоянным, невзирая на колебания температуры и другие факторы. Другие применения таких устройств могут лежать и в области спектроскопии.

Двухчастотные источники излучения на основе технологии ЛВР могут быть использованы в системах передачи данных, в интерферометрии, в системах считывания и записи информации.

Одночастотные ЛВР уже давно выпускаются промышленностью. Однако их мощность излучения, как правило, не превышает 1 мВт, что не всегда достаточно для применений в системах оптоволоконной передачи данных без использования дополнительных усилителей. Кроме того, неоднократно отмечались трудности в управлении поляризацией излучения лазеров этого типа. Исследования, целью которых является создание одночастотного ЛСВР с фиксированной поляризацией и повышенной мощностью излучения, ведутся многими научными группами во всем мире.

В качестве одного из возможных путей решения ряда этих проблем предложена конструкция лазера с двумя связанными вертикальными резонаторами (ЛСВР).

Действительно, в экспериментах такие лазеры уже продемонстрировали режим двухчастотной генерации, режим одночастотной генерации мощностью свыше 6 мВт, возможности управления поляризацией излучения в процессе работы. Близкая к ЛСВР схема была предложена для перестройки длины волны излучения лазера в процессе работы.

Полученные в экспериментах результаты являются интересными для применений в оптоэлектронике. За последние несколько лет было опубликовано более двух десятков экспериментальных работ, посвященных этой теме. Однако во многих случаях экспериментальные работы ведутся без надлежащего теоретического осмысления и описания.

Авторам одной из экспериментальных работ пришлось изготовить целый набор подобных устройств с целью определения параметров конструкции, наиболее подходящих для селекции поперечных мод. Подобные трудности можно было устранить, проведя заранее оптимизацию конструкции лазера с использованием математической модели и методов численного моделирования. Цель такой оптимизации должна состоять не только в увеличении мощности излучения лазера, но и сохранении одного из основных преимуществ ЛВР – низких пороговых токов накачки.

Еще в первых экспериментах с ЛСВР была продемонстрирована возможность управления спектральными характеристиками устройства за счет изменения соотношения токов накачки резонаторов. Однако до появления в конце 2004 года первой публикаций с анализом работы ЛСВР с использованием скоростных уравнений определить искомые соотношения токов можно было только экспериментально. Актуальность этой проблемы сохранилась и сейчас, т.к. используемые в указанной работе скоростные уравнения не учитывают зависимости параметров излучения и накачки от пространственных координат. Из-за этого рассчитанные значения пороговых токов генерации продольных мод расходятся с экспериментальными данными в 1.5 - 2 раза, а теоретические оценки генерируемой лазером мощности вообще не проводились.

Существует ряд проблем, которые не рассматривались ни в теоретических, ни в экспериментальных работах. При создании ЛСВР для двухчастотной генерации неизбежно встают вопросы о величине возможного спектрального интервала между

излучаемыми модами, о принципиальных требованиях к конструкции лазера, обеспечивающей стабильную двухчастотную генерацию.

Отсутствие достаточно точного математического описания ЛСВР мешает реализации преимуществ таких устройств и их более широкому внедрению в оптоэлектронные системы. На данный момент в литературе можно найти лишь примеры самосогласованных моделей ЛВР с одним резонатором. Упомянутые выше работы рассматривают упрощенные (без зависимости переменных от пространственных координат) скоростные уравнения для ЛСВР. Эти модели не могут дать точного описания физических процессов, происходящих в устройстве, еще и потому, что в них отсутствует важнейшая часть теоретического описания любого лазера – задача нахождения распределения электромагнитного поля внутри структуры. В частности, важная при оптимизации лазера для одночастотной генерации проблема нахождения распределения интенсивности поперечных мод и описания их конкуренции вообще не рассматривалась. Математическая модель, позволяющая проводить подробное теоретическое исследование ЛСВР, с одной стороны необходима для совершенствования конструкции подобных приборов, а с другой она может позволить более полно раскрыть потенциальные возможности таких устройств в современной оптоэлектронике.

Цели диссертационной работы

Цели диссертационной работы состояли в создании метода теоретического описания ЛСВР и его применении для исследования и оптимизации излучательных характеристик полупроводниковых лазеров со связанными вертикальными резонаторами. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана математическая модель ЛСВР и создана программа для численного моделирования процессов генерации, происходящих в таких устройствах.
2. С использованием созданной модели определены: (1) пределы изменения спектрального интервала между излучаемыми модами в режиме двухчастотной генерации; (2) условия возбуждения продольных мод лазера; (3) длины волн и пространственные распределения мод, а также (4) вариаций этих параметров в процессе генерации.

3. Детально изучены и объяснены причины перехода ЛСВР из режима двухчастотной генерации в одночастотный и наоборот, наблюдавшегося в экспериментах.

4. В применении к лазеру с двумя связанными резонаторами оценена эффективность способов подавления поперечных мод, использованных ранее для решения подобных задач в однорезонаторных ЛВР. Оптимизированы параметры селективирующих конструкций, обеспечивающих максимальное подавления поперечных мод высоких порядков.

Научная новизна диссертационной работы

1. На основе модернизированного метода эффективной частоты решения волнового уравнения впервые предложена и реализована самосогласованная динамическая математическая модель инжекционного лазера со связанными вертикальными резонаторами, учитывающая динамическое изменение профилей мод в процессе генерации, диффузию и пространственное выжигание носителей в активных слоях, зависимость показателя преломления активной области от концентрации носителей. Модель реализована без упрощений уравнений для аксиально-симметричных устройств.

2. Установлено впервые, что спектральные интервалы между продольными модами ЛСВР при двухчастотной генерации лежат в пределах от 0.08 до 60 нм. Определены параметры конструкции устройства, необходимые для реализации заданных спектральных интервалов между модами.

3. Показано, что ионная имплантация является более эффективной технологией для подавления поперечных мод, чем формирование рельефа на излучающей поверхности ЛСВР за счет удаления одного или нескольких слоев верхнего брэгговского зеркала. Установлено, что сопоставимая эффективность подавления мод для этих двух конструкций может быть достигнута лишь при глубоком (порядка несколько сотен нм) травлении верхнего брэгговского зеркала с целью формирования на нем рельефа.

Научная и практическая значимость работы

Созданная математическая модель может быть использована для улучшения излучательных характеристик ЛСВР. Модель позволяет достаточно точно (в большинстве случаев с погрешностью в пределах 10-15%) предсказывать значения пороговых токов и мощностей конструируемого прибора.

Оптимизация конструкции лазера и модельный расчет позволяют повысить эффективность проектирования инжекционных лазеров для волоконно-оптических линий связи, приборов для считывания или записи информации и других устройств, составляющих основу современной оптоэлектронной техники. Возможность расчета спектральных интервалов между продольными модами ЛСВР и параметры конструкции устройства для их реализации могут быть использованы при проектировании двухчастотных лазеров с заданными спектральными характеристиками.

Положения, выносимые на защиту

1. Анализ и доказательство возможности генерации в ЛСВР двух продольных мод, разделенных спектральным интервалом, лежащим в пределах от 0.08 до 60 нм. Нижнюю границу указанного интервала определяют тепловые эффекты и точность изготовления устройства, верхнюю – конечная полоса коэффициента отражения брэгговских зеркал. Величину спектрального интервала между модами определяют коэффициент пропускания среднего зеркала и соотношение оптических длин резонаторов.

2. Для реализации стабильного двухчастотного режима генерации в лазерах со связанными вертикальными резонаторами целесообразно использовать лазер с резонаторами разной оптической длины. Достаточная для достижения стабильного режима генерации расстройка оптических длин резонаторов может быть обеспечена не только выбором нужных геометрических параметров устройства, но и использованием зависимости показателей преломления от концентраций носителей тока.

3. Ионная имплантация является более эффективной технологией подавления поперечных мод, чем формирование рельефа на излучающей поверхности ЛСВР за счет удаления одного или нескольких слоев верхнего брэгговского зеркала. Сопоставимая эффективность подавления мод может быть достигнута лишь при травлении верхнего брэгговского зеркала с целью формирования на нем рельефа глубиной порядка нескольких сотен нанометров.

Апробация диссертационной работы

Результаты работы были представлены на 4 международных научных конференциях:

1. “Квантовая Электроника 2006”, Белоруссия, Минск, Ноябрь 2006.
2. International Conference on LASER and FIBER-OPTICAL NETWORKS MODELING (LFNM), Украина, Харьков, Июнь 2006.
3. Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов-2005”, Москва, Апрель 2005.
4. International Conference on LASER and FIBER-OPTICAL NETWORKS MODELING (LFNM), Украина, Алушта, Июнь 2003.

По материалам диссертации были сделаны доклады на семинарах кафедры Физики колебаний физического факультета МГУ, а также на семинарах лаборатории “Быстропротекающих процессов в приборах и материалах твердотельной электроники”.

По результатам исследований опубликованы 3 статьи и 5 тезисов докладов на конференциях, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав текста, выводов и списка литературы. Общий объем составляет 109 страниц. Диссертация включает 28 рисунков и 7 таблиц. Библиография содержит 108 наименований, а также 8 авторских публикаций, представленных в отдельном списке.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** содержится описание области научных исследований, к которой относится данная работа. Кратко изложено содержание представленных в литературе работ по данному направлению и обоснована актуальность темы исследований. Изложены цели диссертационной работы и ее наиболее важные результаты вместе с описаниями их новизны и практической значимости. Приведено краткое изложение содержания диссертации.

Глава I представляет собой обзор литературы, в котором рассматривается современное состояние исследований полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором. Описаны основные различия между лазерами с вертикальным резонатором и традиционными инжекционными лазерами, излучающими через край (см. рис. 1). Рассматриваются принципиальные преимущества и недостатки ЛВР.

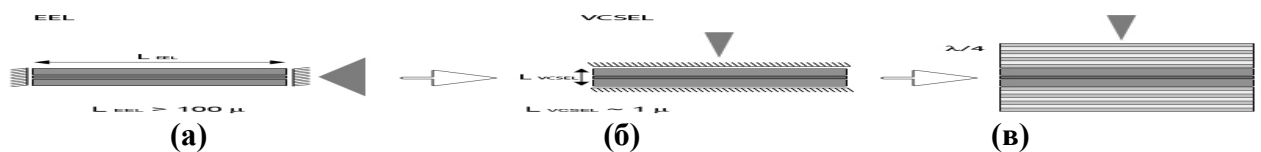


Рис. 1: Традиционный инжекционный лазер, излучающий через край (а); лазер с вертикальным резонатором (б); лазер с вертикальным резонатором и брэгговскими зеркалами (в).

Наряду с описанием современных ЛВР проведен анализ основных тенденций развития таких приборов. Подробно рассмотрено состояние дел в следующих направлениях развития теории и технологии ЛВР:

- длинноволновые ЛВР, работающие в диапазоне длин волн 1.3 и 1.55 мкм;
- одночастотные ЛВР повышенной (более 1 мВт) мощности;
- двухчастотные ЛВР;
- перестраиваемые ЛВР;
- многомодовые ЛВР с мощностью излучения порядка 1 Вт.

В разделе, посвященном технологиям создания одночастотных ЛВР повышенной мощности, представлено описание более десятка различных методик

подавления поперечных мод и контроля поляризации излучения, применявшихся в подобных лазерах. Выходные мощности и пороговые токи устройств, созданных с использованием технологий из этого списка, сведены в таблицу, дающую представление о характеристиках современных одночастотных ЛВР.

Приведено описание методик математического моделирования лазеров с вертикальным резонатором. Рассмотрены основные части полной математической модели полупроводникового лазера: электрическая, тепловая и оптическая. Оптические модели разделены на скалярные и векторные. В последнем параграфе Главы I рассмотрены опубликованные теоретические и экспериментальные работы, посвященные изучению свойств лазеров со связанными вертикальными резонаторами. На основании рассмотренных статей дано обоснование актуальности выбранной темы исследований.

В **Главе II** приведено описание предложенной математической модели лазера со связанными вертикальными резонаторами и дано ее обоснование.

Оптическая часть модели базируется на использовании метода эффективной частоты решения скалярного волнового уравнения, модифицированного для использования в лазерах со связанными резонаторами. Этот метод обеспечивает:

- высокую для скалярного метода точность;
- быстроту расчета, оставляющую возможность проводить решение уравнений оптической части модели на каждом шаге по времени;
- учет группового показателя преломления.

Эффективность использования метода эффективной частоты подтверждена примерами его использования другими научными группами.

Основная идея метода состоит в представлении трехмерного скалярного уравнения Гельмгольца двумя уравнениями, описывающими распространение излучения в направлениях: перпендикулярном зеркалам (ось z) и в плоскости слоев лазера, где заданы полярные координаты (ρ, φ) , как показано на рис.2.

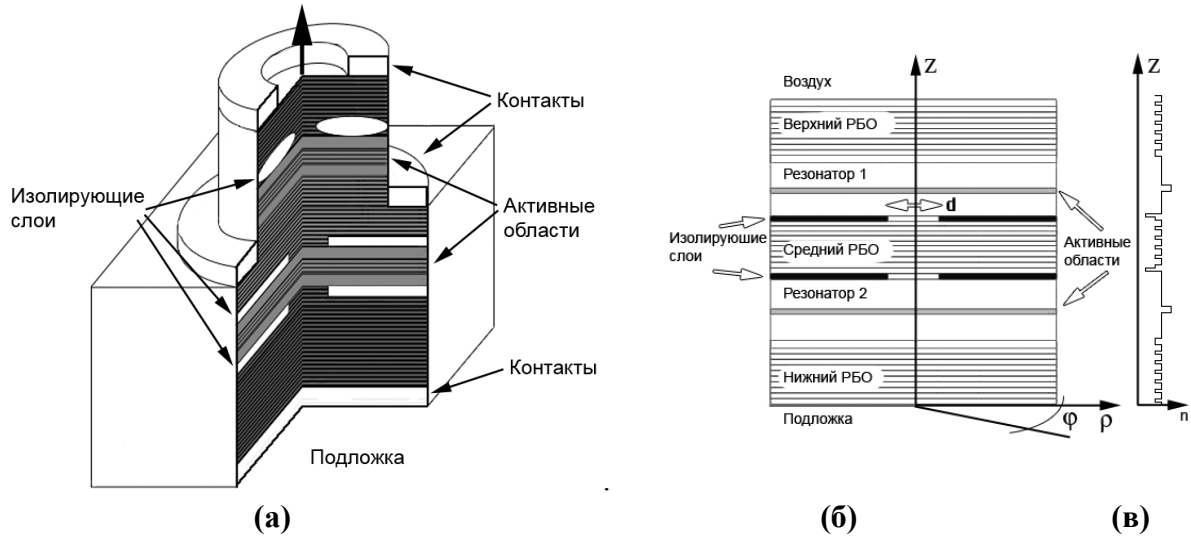


Рис. 2: Конструкция ЛСВР. (а) – трехмерный вид, (б) – схема ЛСВР, использовавшаяся в расчетах, (в) - профиль показателя преломления вдоль оси z (РБО – распределенный брэгговский отражатель).

Динамическая часть модели рассматривает изменения концентраций носителей в активной области и фотонов в резонаторе с течением времени. С этой целью проводится решение скоростных уравнений для лазера с двумя резонаторами. Эти уравнения должны учитывать наличие в ЛСВР двух продольных мод, которые обычно обозначаются как L – мода (мода с большей длиной волны) и S -мода (мода с меньшей длиной волны). Благодаря этому скоростные уравнения для ЛСВР обладают особенностями, отличающими их от традиционных скоростных уравнений для полупроводникового лазера с одним резонатором:

- при достаточном усилении в обеих активных областях продольные моды L и S выжигают носители как в “своем”, так и в “чужом” резонаторах и, соответственно, усиливаются в обоих резонаторах;
- напротив, в случае если одна из активных областей накачивается недостаточно, в ней будут поглощаться фотоны обеих продольных мод. В результате этого возможен рост концентрации носителей в активной области, в которую электрическая накачка не осуществляется (имеет место оптическая накачка пассивного резонатора);
- фотоны, рожденные в результате спонтанной рекомбинации в любом резонаторе, могут попасть в любую продольную моду

Обе части модели интегрируются в единое целое следующим образом. На каждом шаге по времени производится нахождение распределений интенсивности,

длин волн и коэффициентов усиления мод устройства. С учетом этих величин решаются скоростные уравнения. Полученные в результате распределения концентрации носителей в активных областях используются в оптической части модели: от концентрации носителей зависит показатель преломления и коэффициент усиления активной области. Таким образом представленная математическая модель описывает связь между физическими процессами в ЛСВР, имеющими электрическую и оптическую природу.

Наряду с уравнениями модели рассмотрены численные методы их решения и вопросы быстродействия реализованной компьютерной программы. Приведены параметры ЛСВР, использованные в расчетах.

Глава III посвящена исследованию структуры и методов селекции поперечных мод ЛСВР. Проведена оптимизация параметров конструкции ЛСВР с целью создания лазера, в котором максимально эффективно осуществляется подавление поперечных мод высоких порядков.

Порядок расчетов был следующим. Рассматривались два наиболее технологически простых метода подавления поперечных мод за счет модификации структуры верхнего брэгговского зеркала: внедрение ионной имплантации и создание рельефа на излучающей поверхности. Для различных вариантов исполнения ЛСВР были рассчитаны коэффициенты усиления активных областей, которые являются пороговыми для возбуждения фундаментальной моды LP_{01} и первой моды высшего порядка LP_{11} . Один из ключевых результатов расчетов представлен на рис.3.

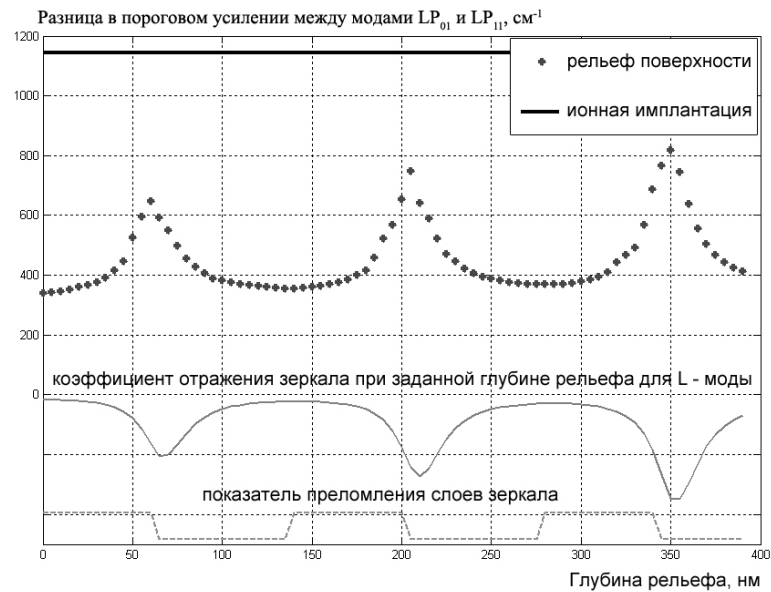


Рис.3 Рассчитанная зависимость разницы пороговых коэффициентов усиления поперечных мод LP_{01} и LP_{11} от глубины рельефа излучающей поверхности для $R_{\text{relief}} = 2.5$ мкм и $R_{\text{oxide}} = 2.5$ мкм. Указано значение той же величины при использовании ионной изоляции с $R_{\text{implant}} = 2.5$ мкм.

Из представленных результатов расчетов следует, что рельеф излучающий поверхности позволяет реализовать меньшую разницу между пороговыми коэффициентами усиления поперечных мод, чем ионная имплантация. Следовательно, при неглубоком травлении рельеф поверхности обеспечивает менее эффективную селекцию поперечных мод. Выбор достаточно большой глубины травления позволяет приблизить эффективность селекции мод за счет рельефа поверхности к результатам, полученным с применением ионной изоляции. Однако для достижения сопоставимой эффективности мод необходимо полностью вытравить не менее 5-6 пар слоев верхнего зеркала, и полная глубина травления составит несколько сотен нанометров.

Помимо глубины травления было исследовано влияние другого параметра рельефа поверхности и ионной изоляции – их поперечных размеров. Оптимальное соотношение поперечных размеров обсуждаемых конструкций и активных слоев одинаково, т.к. одинаков и сам принцип селекции. В области значений радиусов оксидных апертур до 20 мкм это соотношение с хорошей точностью составляет 1:2. В общем случае, зависимость оптимального радиуса ионной изоляции (или рельефа поверхности) от радиуса оксидной апертуры, определяющего размеры активной области, нелинейна.

Глава IV посвящена использованию созданной математической модели для исследования структуры продольных мод ЛСВР. Проведены расчеты модовой структуры лазера в зависимости от двух его основных параметров – величины связи между резонаторами и соотношения их оптических длин. Получены распределения интенсивности продольных мод для различных вариантов конструкции лазера. Даны оценки предельных спектральных интервалов между продольными модами. В частности, на рис. 4 представлены рассчитанные спектральные интервалы между продольными модами для различных конфигураций ЛСВР.

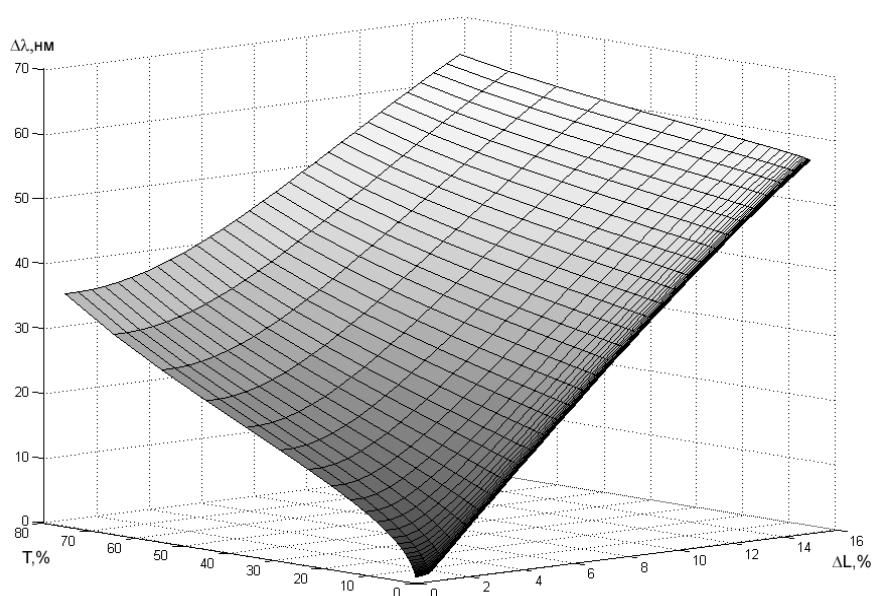


Рис.4: Зависимость спектрального интервала $\Delta\lambda$ между модами от коэффициента пропускания T среднего РБО и расстройки ΔL между резонаторами.

Спектральный интервал между продольными модами может варьироваться в пределах 0.08 – 60 нм в зависимости от коэффициента связи между резонаторами и соотношения их оптических длин. Указанные пределы определяются сверху - конечной полосой отражения брэгговских зеркал, снизу - тепловыми эффектами в активной среде и точностью изготовления прибора.

Решена задача определения пороговых токов продольных мод ЛСВР. В отличие от традиционных лазеров, в рассматриваемом случае необходимо исследовать не одиночные значения пороговых токов, а кривые, представляющие собой набор пар значений токов накачки. С использованием полной динамической модели ЛСВР был

рассчитан характер изменения спектральной структуры ЛСВР в зависимости от токов накачки, а также проведено сравнение полученных результатов с опубликованными в литературе экспериментальными данными. Кривые пороговых токов для двух продольных мод ЛСВР, как теоретические, так и экспериментальные, представлены на рис. 5. Границы областей генерации ЛСВР были получены путем расчета переходных процессов для соответствующих пар токов накачки. После этого были применены методы аппроксимации кривых пороговых токов полиномами степеней, обеспечивающих наименьшее отклонение от найденных пар пороговых токов.

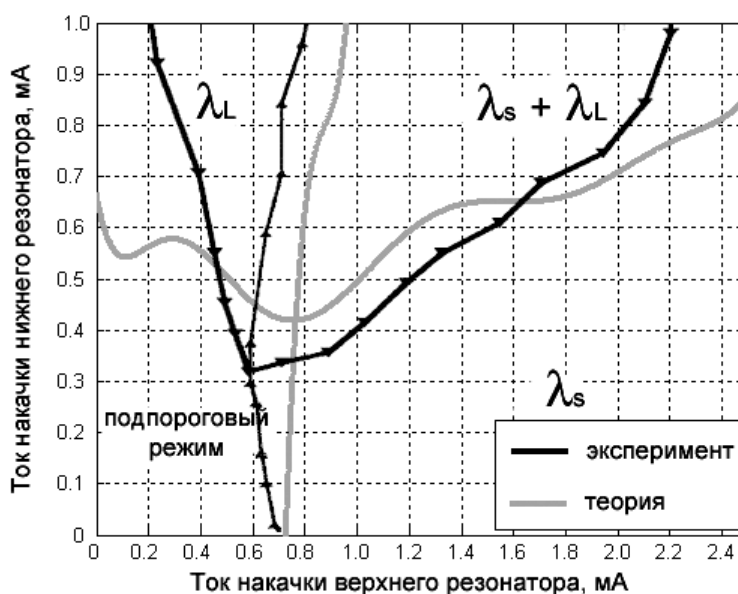


Рис.5: Кривые пороговых токов в ЛСВР¹. Символами λ_L и λ_s обозначены области генерации продольных мод с большей и меньшей длинами волн соответственно.

В расчетах, как и в экспериментах, наблюдалась одномодовая по поперечным модам генерация мод LP_{01} в обоих резонаторах, что объясняется небольшим диаметром изолирующих апертур. Следовательно, спектр излучения лазера содержит две моды, и существует возможность отдельного управления ими путем изменения токов накачки связанных резонаторов.

Приведенный на рис. 5 график может быть использован для определения рабочих областей генерации ЛСВР. Так, двухчастотная генерация начинается в эксперименте при значениях токов накачки нижнего и верхнего резонаторов

¹ Экспериментальные данные взяты из работы "Rate-Equation Model for Coupled-Cavity Surface-Emitting Lasers", Vlad Badilita, Jean-Francois Carlin, Marc Plegems and Krassimir Panajotov, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 40, NO. 12, DECEMBER 2004.

соответственно $I_{\text{bot}} = 0.32\text{мА}$, $I_{\text{top}}=0.60\text{мА}$, а в теории $I_{\text{bot}}=0.42\text{мА}$, $I_{\text{top}}= 0.75\text{мА}$ соответственно. Эту точку можно назвать порогом двухчастотной генерации исследуемого лазера, аналогичным порогу генерации традиционного лазера. Для возбуждения одновременной генерации двух мод принципиально необходимо накачивать обе активные области, либо обеспечить режим оптической накачки второго резонатора излучением первого.

Вид графика на рис.5 является общим для ЛСВР различных конструкций, что подтверждается экспериментами, проведенными разными научными группами с разными устройствами.

Также в данной главе рассмотрены основные особенности поведения ватт-амперных характеристик ЛСВР, особенности вывода излучения из ЛСВР. Путем сравнения результатов расчетов с опубликованными экспериментальными данными проверена точность предложенной математической модели.

В Заключение сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. На основе модернизированного метода эффективной частоты решения волнового уравнения впервые предложена и реализована самосогласованная динамическая математическая модель инжекционного лазера со связанными вертикальными резонаторами. Модель учитывает динамическое изменение профилей мод в процессе генерации, диффузию и пространственное выжигание носителей в активных слоях, зависимость показателя преломления активной области от концентрации носителей. Модель реализована без упрощающих предположений об аксиальной симметрии исследуемых устройств.

2. С использованием реализованной модели установлено, что в ЛСВР возможно существование двух продольных мод, спектральный интервал между которыми может варьироваться в пределах 0.08 - 60 нм в зависимости от коэффициента связи между резонаторами и соотношения их оптических длин. Указанные пределы определяются сверху - конечной полосой отражения брэгговских зеркал, снизу - тепловыми эффектами в активной среде и точностью изготовления прибора.

3. Рассчитаны длины волн мод и распределения их интенсивности для ЛСВР, имеющих значения коэффициента пропускания (связи) между резонаторами в

пределах до 80%, расстройку оптических длин резонаторов до 15% и работающих в диапазоне длины волны излучения 1 мкм.

4. Найдены области существования одночастотной и двухчастотной генерации, согласующиеся с экспериментальными данным. Показано, что возможен срыв генерации одной из мод при увеличении тока накачки резонатора, в котором локализована другая мода.

5. Показано, что ионная имплантация является более эффективной технологией подавления поперечных мод, чем создание рельефа на излучающей поверхности ЛСВР. Установлено, что сопоставимая эффективность подавления мод для этих двух конструкций может быть достигнута лишь при глубоком (порядка нескольких сотен нанометров.) травлении верхнего брэгговского зеркала с целью формирования на нем рельефа.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. А.С. Логгинов, А.Г. Ржанов, Д.В. Скоров, “Условия двухчастотной генерации в лазерах со связанными вертикальными резонаторами”, Квантовая электроника, 2007, 37 (6).
2. А.С. Логгинов, А.Г. Ржанов, Д.В. Скоров, “Двухчастотные лазеры со связанными вертикальными резонаторами”, Квантовая электроника, 2006, 36 (6).
3. А.С. Логгинов, А.Г. Ржанов, Д.В. Скоров, “Автомодуляция излучения в полупроводниковых лазерах с вертикальным резонатором”, Известия РАН, серия физическая, 2006, том 70 (12).
4. А.С. Логгинов, А.Г. Ржанов, Д.В. Скоров, “Динамика двухчастотных лазеров со связанными вертикальными резонаторами”, Международная научн.-техн. конф. “Квантовая электроника”: тезисы докладов, Минск, Ноябрь 2006.
5. A.S. Logginov, A.G. Rzhanov, D.V. Skorov, “Numerical Analysis of Vertical Coupled-Cavity Lasers for Dual-Wavelength Emission”, 8-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, pp. 183-186, June 2006.
6. Д.В. Скоров, “Оптические характеристики полупроводниковых лазеров со связанными вертикальными резонаторами”, Тезисы докладов на международной научной конференции студентов и аспирантов “Ломоносов 2005”, 2005.
7. A.S. Logginov, A.G. Rzhanov, D.V. Skorov, “Modeling of self-sustained pulsations in vertical-cavity surface-emitting injection lasers“, Proceedings of SPIE, Vol. 5582, September 2004.
8. A.S. Logginov, A.G. Rzhanov, D.V. Skorov, “Modeling of self-sustained pulsations in surface-emitting injection lasers”, 5th International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling, 2003. Proceedings of LFNM 2003, September 2003.