

на правах рукописи

УДК 621.315.592

ДЮДЕЛЕВ Владислав Викторович

**Пороговые, спектральные и пространственные характеристики
GaAs/AlGaAs лазеров с искривлёнными штрихами брегговской решётки
обратной связи, обеспечивающей фокусировку выходного излучения.**

специальность:

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2006

Работа выполнена в Физико-Техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

В.И.Кучинский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

И.Н. Яссиевич

кандидат физико-математических наук

А.Н Алексеев

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Защита состоится “___” _____ 2006 г. в _____ часов

на заседании диссертационного совета К 002.205.02 Физико-Технического института им.
А.Ф.Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим
высылать по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан “___” _____ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук



Г.С.Куликов

Актуальность темы

В настоящее время полупроводниковые лазеры применяются в различных областях науки и техники, таких как запись и хранение данных, передача информации по волоконным линиям связи, фотомедицина, накачка нелинейных кристаллов и твердотельных лазеров и т.д. Основными характеристиками полупроводниковых лазеров, определяющими широту их применений, являются: монохроматичность, мощность и направленность излучения, эффективность, быстродействие и компактность. Наиболее распространёнными конструкциями полупроводниковых лазеров, в которых существенно улучшены те или другие характеристики являются следующие: лазеры с резонатором Фабри-Перо (так называемые торцевые лазеры) с узким полоском, излучающие на одной пространственной моде, мощные лазеры с широким полоском, излучающие на нескольких поперечных и продольных модах с мощностью выходного излучения до 10-15 Вт и более [1], вертикально излучающие лазеры [2], лазеры с распределённой обратной связью (РОС) и распределённым брегговским зеркалом (РБЗ) [3] и др.

Выходное излучение всех типов полупроводниковых лазеров вследствие малости размеров их выходной апертуры имеет существенную расходимость. В то же время, для большинства современных задач, в которых применяются полупроводниковые лазеры, требуется либо коллимировать выходное излучение, например, для накачки нелинейных кристаллов или твёрдотельных лазеров, либо фокусировать его в очень малое пятно, например, для последующего ввода в оптическое волокно (для накачки эрбиевых усилителей или волоконных лазеров и т.д.). Наиболее просто проблема фокусировки выходного излучения решается в вертикально излучающих лазерах с вертикальным резонатором вследствие симметричности диаграммы направленности и сравнительно низкой расходимости излучения ($\leq 10^0$). Многие конструкции вертикально излучающих лазеров позволяют осуществлять эффективный ввод их выходного излучения (до 95%) в одномодовое оптическое волокно (ООВ) без применения дополнительных оптических элементов. Однако мощность выходного излучения вертикально излучающих лазеров не превышает нескольких десятков милливатт.

Фокусировка выходного излучения торцевых лазеров осложняется несколькими факторами. Во-первых, расходимость излучения в плоскости р-п перехода и в перпендикулярной ему плоскости различаются вследствие разницы размеров волновода в этих направлениях. Особенно ярко этот эффект выражен у мощных торцевых лазеров с широким полоском. Эффективный ввод выходного излучения торцевых лазеров в ООВ

успешно осуществлён в основном для лазеров с узким полоском, генерирующих излучение на одной поперечной моде. Коэффициент ввода излучения таких лазеров в ООВ достигает на сегодняшний день 95%. К сожалению, мощность таких лазеров ограничена порогом катастрофической деградации зеркал и не превышает 300-500 мВт. Фокусировка излучения мощных лазеров с широким полоском, в дополнение к первому фактору осложняется наличием генерации в каналах (или “шпотованием”) и многомодовым составом выходного излучения. При фокусировке это ведёт к увеличению размера фокусного пятна, делая эффективный ввод излучения мощных широкополосковых лазеров в ООВ трудноразрешимой задачей. Наилучшие результаты по вводу выходного излучения полупроводниковых лазеров с широким полоском в ООВ достигаются при использовании сложных в изготовлении линз на основе градиентных волокон. Однако и в этом случае эффективность ввода не превышает 30%.

В свете выше перечисленных трудностей, весьма привлекательным выглядит применение для решения проблемы фокусировки излучения лазеров с широким полоском различных интегрально-оптических элементов, эффективность которых была продемонстрирована на лазерах с дифракционным выводом излучения[4]. Однако лазеры с дифракционным выводом излучения имеют низкую дифференциальную квантовую эффективность вследствие дифракции более 50% излучения в подложку.

Применение в качестве элемента обратной связи брегговской решётки с цилиндрической формой штрихов в торцевом лазере является особенно привлекательным, так как такая конструкция позволяет объединить в себе сразу несколько выгодных качеств: высокую мощность за счёт применения широкого полоска, фокусировку излучения за счёт цилиндрической симметрии резонатора и одночастотный режим генерации за счёт применения в качестве элемента обратной связи распределённого брегговского зеркала с искривлёнными штрихами. Однако исследованию лазеров подобной конструкции не уделялось большого внимания ни в отечественной, ни в зарубежной технической литературе.

Таким образом, исследование свойств нового типа полупроводникового лазера с искривлёнными штрихами распределённого брегговского зеркала (и-РБЗ), имеющего узкий спектр генерации и позволяющего фокусировать все моды выходного излучения в общий фокус за счёт цилиндрической симметрии резонатора, является актуальной задачей.

Основная цель диссертационной работы:

1. Практическая реализация нового типа полупроводникового лазера – и-РБЗ лазера с искривлёнными штрихами брегговской решётки обратной связи, обеспечивающей одночастотный режим генерации и фокусировку выходного излучения;
2. Исследование пороговых, спектральных и пространственных характеристик и-РБЗ лазеров.

Научная новизна и практическая ценность работы заключаются в следующем:

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования пространственных свойств и-РБЗ лазеров. Выявлены механизмы, определяющие размер фокусного пятна.
2. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование спектральных свойств и-РБЗ лазеров.
3. Теоретически и экспериментально показано влияние ширины спектральной линии и-РБЗ лазера на размер фокусного пятна.
4. Проанализировано влияние фазы отражения на торцах резонатора на пороговые и спектральные характеристики лазеров с искривлёнными штрихами решётки обратной связи.
5. Разработана и успешно реализована технология создания дифракционных решёток (ДР) с искривлёнными штрихами.

Совокупность представленных в диссертации экспериментальных данных и теоретический анализ позволяет сформулировать следующие **научные положения**, выносимые на защиту:

Положение 1

Использование распределённого брегговского зеркала с искривлёнными штрихами и клиновидного полоска, обеспечивающих цилиндрическую симметрию резонатора, позволяет сфокусировать все моды выходного излучения полупроводникового лазера в общий фокус в плоскости р-п перехода.

Положение 2

Использование распределённого брегговского зеркала с искривлёнными штрихами и клиновидного полоска, образующих резонатор полупроводникового лазера с цилиндрической симметрией, при $\kappa L = 1.7$ (κ – коэффициент связи [см^{-1}], L – длина брегговского зеркала [см]) позволяет получить одночастотную генерацию с подавлением боковых мод до 30 дБ.

Положение 3

Размер фокусного пятна лазера с распределённым брегговским зеркалом с искривлёнными штрихами и клиновидным полоском, обеспечивающими цилиндрическую симметрию резонатора, определяется тремя факторами: числовой апертурой и-РБЗ лазера, преломлением излучения на плоском выходном зеркале и спектральным совершенством выходного излучения.

Положение 4

Преломление излучения на внешней плоской выходной грани и-РБЗ лазера при значении его числовой апертуры $NA < 0,2$ не увеличивает размер фокусного пятна по сравнению с интегрально-оптическим случаем, когда внешние границы повторяют кривизну штрихов дифракционной решётки.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Четвёртой Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанoeлектронике, С-Петербург, Россия, 3-6 декабря 2002 г.; Международном семинаре по оптоэлектронике, С-Петербург, Россия 27-28 ноября 2003г.; Итоговом семинаре по физике и астрономии по результатам конкурса грантов для молодых учёных С-Петербурга, С-Петербург, Россия, 26 апреля 2004 г.; 6-й Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и нанoeлектронике, С-Петербург, Россия, 6-10 декабря 2004 г.; на 20-й международной конференции Advanced Solid-State Photonics, Вена, Австрия, 6-9 февраля, 2005 г.; на международной конференции LAT'2005, С-Петербург, Россия, 11-15 мая 2005 г.; 5-ом международном Белорусско-Российском семинаре Semiconductor lasers and systems, Минск, Республика Беларусь, 1-5 июня 2005 г.; Международной конференции Nanostructures: Physics and Technology, С-Петербург, Россия, 20-25 июня 2005 г.; а также на научных семинарах лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Публикации

По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, было опубликовано 10 научных работ, список которых приведён в заключении.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, и списка литературы. Диссертация включает 47 рисунков и список литературы из семидесяти трёх наименований. Общий объём диссертации 125 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава носит обзорный характер, в ней описываются основные характеристики полупроводниковых лазеров. Глава разделена на две части.

Первая часть посвящена пространственным характеристикам выходного излучения лазеров с широким полоском.

В первом параграфе описываются факторы, осложняющие фокусировку излучения мощных полупроводниковых лазеров с широким полоском, а именно: шпотование, многомодовый состав излучения и сильная асимметричность пучка выходного излучения. Описаны основные конструкции мощных лазеров с торцевым выводом излучения, в которых подавляется шпотование и многомодовый состав излучения. Обсуждаются проблемы ввода излучения в ООВ.

Второй параграф посвящён лазерам с неустойчивым резонатором, образованным с помощью брегговской решётки с искривлёнными штрихами. Форма штрихов таких лазеров либо гиперболическая, либо параболическая. Наличие неустойчивого резонатора позволяет получить генерацию на одной поперечной фундаментальной моде. Как следствие, выходное излучение такого лазера имеет расходимость близкую к дифракционному пределу. Описано использование дополнительного фокусирующего элемента, представляющего собой брегговскую решётку с искривлёнными штрихами и изменяющимся периодом. Применение такой технологии позволяет фокусировать излучение таких лазеров в пятно радиусом примерно 10 мкм. Данная технология также применима к усилителям с задающим генератором. Однако лазеры с подобным фокусирующим элементом имеют один существенный недостаток – низкую дифференциальную квантовую эффективность не превышающую 20%, вследствие дифракции в подложку и потери при этом более 50% излучения.

В третьем параграфе описываются лазеры, обладающие полной цилиндрической симметрией. Данная конструкция лазеров была предложена для получения когерентного излучения в конце 80-х годов прошлого века. Обратная связь в лазерах данного типа осуществляется при помощи брегговской решётки, штрихи которой представляют собой окружности. Волны, распространяющиеся в такой периодической среде, являются цилиндрическими (сходящимися к центру симметрии и расходящимися от него). Свет в

лазерах такой конструкции выводится вверх перпендикулярно плоскости решётки. Показано, что преимуществом конструкции является возможность получать генерацию на фундаментальной поперечной моде. Технология вывода излучения вверх перпендикулярно плоскости решётки позволяет создавать двумерные массивы лазеров. Лазеры подобной конструкции генерируют одночастотное излучение. Особое внимание уделено применению в “цилиндрических” лазерах интегрально-оптических фокусирующих световыводящих элементов, представляющих собой цилиндрическую брегговскую решётку второго порядка с переменным шагом. Диаметр фокусного пятна цилиндрических лазеров подобной конструкции составляет 15-20 мкм. Существенным недостатком лазеров такой конструкции является низкая дифференциальная квантовая эффективность.

Вторая часть посвящена описанию основных принципов работы РОС и РБЗ лазеров, которые позволяют получить одночастотный спектр генерации за счёт применения брегговской решётки обратной связи. Кратко рассмотрены основные положения классической теории, даны определения основных понятий, использованных при исследовании характеристик лазеров с РОС. Рассмотрен формализм связанных волн [5]. Приведены основные соотношения, определяющие спектр и пороги возбуждения мод в РОС/РБЗ структуре. Основным параметром является коэффициент связи волн k , характеризующий величину обратной связи на единицу длины резонатора. Показано, что при образовании распределённой обратной связи за счёт модуляции показателя преломления в спектре появляется “брегговская” щель (область запрещённых частот шириной $\delta\omega=2ck/n_0$, где n_0 – эффективный показатель преломления волновода, c – скорость света в вакууме).

Кратко рассмотрено влияние отражения от плоских граней на пороговые и спектральные характеристики РОС лазеров. Показано, что наличие фазы отражения (фаза решётки относительно внешней плоской грани) может существенно изменять спектр РОС лазеров и в некоторых случаях приводить к срыву одночастотной генерации.

Вторая глава посвящена устройству и-РБЗ лазеров.

В первом параграфе описывается устройство и-РБЗ лазеров (рис.1). Основной особенностью и-РБЗ резонатора является наличие цилиндрической симметрии, что обеспечивает фокусировку всех мод в общий фокус в плоскости p-n перехода. Цилиндрическая симметрия обеспечивается за счёт применения в качестве элемента обратной связи брегговской решётки, штрихи которой представляют собой дуги

концентрических окружностей с общим центром в точке O , и клиновидного полосока (рис.1). Показано, что электромагнитная волна, распространяющаяся по такой структуре, описывается функцией Ханкеля, и выведен соответствующий профиль решётки обратной связи:

$$f_m(\rho) = \frac{J_m^2(\beta_0 \rho) - Y_m^2(\beta_0 \rho)}{J_m^2(\beta_0 \rho) + Y_m^2(\beta_0 \rho)}, \quad (1)$$

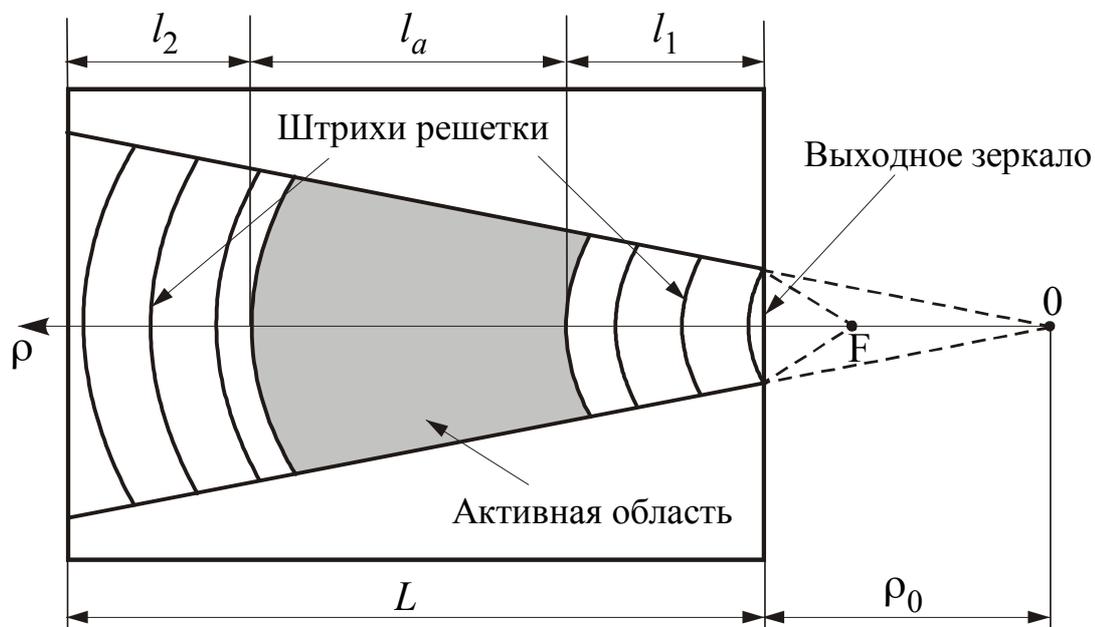


Рис.1. Схематическое изображение и-РБЗ лазера

где J_m и Y_m – функции Бесселя первого и второго рода, m - номер моды. Показано, что в и-РБЗ лазере с фокусным расстоянием более тридцати длин волн излучения, функция (1) приводится к виду $\cos(2\beta_0 \rho)$, характерному для классических РБЗ лазеров, что снимает технологические ограничения на изготовление решётки обратной связи.

Во втором параграфе описывается технология создания искривлённых брегговских решёток. Решётки были созданы методом электронно-лучевой литографии. Для изготовления решёток использовалась двухслойная маска, состоящая из высокочувствительного резиста и окиси кремния, что позволило существенно снизить время экспонирования и получить хорошие результаты.

Для изготовления решёток использовалась структура AlGaAs/GaAs с двумя квантовыми ямами. На данных структурах были созданы решётки третьего порядка с различной кривизной. Период всех решёток равнялся 385 нм, что обеспечило длину волны лазерной генерации 867 нм.

Третья глава посвящена анализу спектральных свойств и-РБЗ лазеров, теоретическая часть, которой разделена на анализ случая внешних плоских граней и интегрально-оптического случая, когда внешние границы повторяют кривизну штрихов ДР. Теоретический анализ проводился без учёта отражения на торцах.

Первый параграф посвящён интегрально-оптическому случаю.

Анализ спектральных свойств проводился на основе классического метода связанных волн, впервые применённого Когельником и Шенком [5], а также Сурисом и Казариновым [6], а для РБЗ лазеров Вангом [7] и Шубертом [8]. В результате теоретического рассмотрения показано, что спектр порогового усиления в точности соответствует случаю классического РБЗ лазера с решёткой с прямыми штрихами.

Во втором параграфе определено пороговое условие для случая внешних плоских границ. Показано, что при отсутствии отражения на торцах, спектр порогового усиления не отличается от интегрально оптического случая. Полученный результат позволяет утверждать, что и-РБЗ лазеры могут обеспечивать подавление боковых продольных мод с эффективностью до 30 дБ и более. Во втором параграфе приводятся данные спектральных измерений экспериментальных образцов. Образцы были изготовлены на структурах AlGaAs/GaAs с двумя квантовыми ямами. На структурах созданы дифракционные решётки с искривлёнными штрихами, обеспечивающие распределённую обратную связь в третьем порядке дифракции. Период решётки составлял 385 нм. Длина всех лазеров равнялась 1,5 мм. Длина каждого распределённого брегговского зеркала составляла 0,5 мм. Ширина выходного зеркала у всех лазеров равнялась 100 мкм. Полоски были клиновидными для обеспечения полной цилиндрической симметрии. Угол клина зависел от кривизны решётки. Зеркала лазеров были просветлены для подавления мод Фабри-Перо. Значения пороговых токов и-РБЗ лазеров находились в пределах 1,5-2,5 А в зависимости от кривизны решётки (пороговая плотность тока всех лазеров составляла примерно 3 кА/см^2). Столь высокое значение пороговых токов объясняется большой площадью накачиваемых областей и поглощением в ненакачиваемых областях.

Спектральные измерения проводились при накачке лазерных диодов импульсами тока с длительностью 300 нс и частотой повторения 20 кГц. Линия генерации располагалась на коротковолновом краю полосы усиления. Подавление боковых мод составляло более 30 дБ. Экспериментальные данные спектральных измерений хорошо согласуются с проведённым теоретическим анализом.

В четвёртой главе рассматриваются пространственные свойства выходного излучения и-РБЗ лазеров, причём теоретическая часть, как и в предыдущей главе, разделена на анализ случая внешних плоских граней и интегрально-оптического случая, когда внешние границы повторяют кривизну штрихов ДР.

В первом параграфе рассматривается интегрально-оптический случай. Показано, что все моды выходного излучения имеют общий фокус в плоскости р-п перехода в точке О (см. рис. 1) и фокусное расстояние равно кривизне решётки ρ_0 (т.е. расстоянию от выходного зеркала до центра симметрии).

Во втором параграфе рассматривается случай плоских граней. Показано, что и в этом случае все моды выходного излучения и-РБЗ лазеров имеют один общий фокус. Отличие от интегрально-оптического случая состоит в величине фокусного расстояния, которое в случае плоских зеркал равно ρ_0/n , где n – эффективный показатель преломления лазерного волновода. Различие фокусных расстояний можно объяснить влиянием воображаемой плосковыпуклой линзы на границе воздух полупроводник, с радиусом кривизны, равным кривизне решётки ρ_0 , наличие которой отличает случай плоских внешних граней от интегрально-оптического случая (рис. 1).

Была произведена оценка размера фокусного пятна в приближении тонкой линзы:

$$W_0 = \frac{\lambda}{2NA}, \quad (2)$$

где NA - числовая апертура.

Также вычислено влияние aberrаций на краях выходного зеркала на размер фокусного пятна. Получено, что поправка W_q , связанная с более сильным преломлением на краях выходного зеркала, пропорциональна размеру выходного зеркала W_1 и квадрату числовой апертуры NA :

$$W_q = \frac{W_1}{2}(NA)^2, \quad (3)$$

Оценка полученного выражения говорит о том, что для небольших числовых апертур $NA < 0,4$ влияние aberrаций на размер фокусного пятна является незначительным.

В третьем параграфе приводятся данные экспериментальных исследований, подтверждающие наличие фокусировки излучения и-РБЗ лазерами в плоскости р-п перехода. С этой целью измерялось распределение ближнего поля на различных

расстояниях от выходного зеркала при различных токах накачки. Доказано наличие фокусировки у и-РБЗ лазеров и показано, что этот эффект напрямую связан с наличием и-РБЗ генерации. Фокусировка не наблюдается при токе накачки меньше порогового или при преобладании Фабри-Перо генерации (при отсутствии просветления зеркал).

В четвёртом параграфе проведён анализ влияния ширины спектра на размер фокусного пятна.

Ненулевая ширина линии генерации приводит к возможности нерадиального распространения луча в и-РБЗ резонаторе. В классическом РБЗ лазере луч также может распространяться не перпендикулярно по отношению к штрихам решётки, однако период решётки Λ для такого луча остаётся постоянным. В и-РБЗ структуре не радиальное распространение света приводит к изменению эффективного периода решётки по длине резонатора, ослаблению обратной связи для лучей, линия распространения которых не проходит через центр симметрии, и уширению линии генерации. Получено выражение, связывающее размер фокусного пятна с шириной спектральной линии и-РБЗ лазера:

$$W_{sp} = \frac{W_1 n}{NA} \sqrt{\frac{2\delta\lambda}{\lambda}}. \quad (4)$$

Анализ случая внешних плоских граней показал, что преломление излучения на плоском выходном зеркале и-РБЗ лазера в случае параксиального распространения луча (числовая апертура меньше 0,2) не увеличивает размер фокусного пятна по сравнению с интегрально-оптическим случаем.

В пятом параграфе приведены данные экспериментальных исследований влияния ширины линии генерации на размер фокусного пятна. С этой целью исследовались спектральные характеристики излучения и-РБЗ лазера в разных точках фокусного пятна. Измерения проводились с помощью оптического спектроанализатора при сканировании одномодовым волокном вдоль фокальной плоскости. Пространственное разрешение составляло 5 мкм. Пространственно разрешённые спектральные измерения показали, что подавление боковых продольных мод в центре фокусного пятна на 15-20дБ выше чем на его краю. Полученные экспериментальные данные наглядно демонстрируют влияние ширины спектра излучения и-РБЗ лазера на размер фокусного пятна, теоретически проанализированное в предыдущем параграфе.

Пятая глава посвящена исследованию влиянию отражения от внешних плоских граней на пороговые и спектральные свойства и-РОС лазеров. Хорошо известно, что в

классических РОС лазерах фаза отражения (фаза решётки на последнем незаконченном периоде относительно внешней плоской грани) влияет на спектр продольных мод и при некоторых её значениях может приводить к срыву одночастотной генерации. Анализ проведён в работе Стрейфера и коллег [9]. В данной главе показано, что в отличие от классических РОС лазеров, фаза отражения у и-РОС лазеров является не постоянной, а плавно изменяется по ширине зеркала.

Проведён теоретический анализ влияния изменяющейся фазы отражения на спектральные и пороговые свойства и-РБЗ лазеров. Рассмотрены два предельных случая. Первый случай – “короткого и узкого” и-РОС лазера с кривизной решётки ρ_0 , много больше его длины L . Форма штрихов решётки такого лазера практически прямая, изменения фазы отражения на обоих зеркалах мало и поэтому его спектральные характеристики практически соответствуют характеристикам классического РОС лазера с отражением на торцах, хорошо известным из литературы [10]. Второй случай “длинного и широкого” и-РОС лазера с кривизной решётки ρ_0 , много меньше его длины L . В таком лазере изменение фазы отражения на переднем зеркале пренебрежимо мало, а на заднем оно может составлять до 2π и более. Полученная зависимость нормированного порогового усиления αL от нормированной брегговской расстройки δL в точности повторяет хорошо известную дисперсионную кривую порогового усиления классического РОС лазера с фиксированной фазой отражения на одном зеркале и переменной на другом [10]. Полученный результат говорит о том, что в и-РОС лазере с такой геометрией частота и пороговое усиление любой из продольных мод зависят от угла распространения луча относительно оси симметрии резонатора. Поэтому “длинный и широкий” и-РОС лазер не может генерировать одночастотное излучение, а его ближнее поле представляет собой набор более тёмных и более светлых пятен в зависимости от значения порогового усиления.

Проведён теоретический анализ и-РОС лазера, близкого по своим характеристикам к имеющимся экспериментальным образцам (ширина выходного зеркала $W_1=100$ мкм, кривизна решётки $\rho_0=10$ мм). Анализ показал, что ближнее поле такого лазера будет представлять собой чередование светлых и тёмных пятен и спектр лазера в различных точках выходного зеркала будет различным. Теоретическое рассмотрение проводилось для и-РОС резонатора, так как его анализ значительно проще, чем и-РБЗ резонатора, хотя результаты не будут сильно различаться. Экспериментально измеренное распределение интенсивности ближнего поля AlGaAs/GaAs и-РБЗ лазера с

квантоворазмерной активной областью с такими же параметрами резонатора хорошо согласуется с расчётами зависимости нормированного от угла распространения. Пространственно разрешённые спектральные измерения также хорошо согласуются с теорией.

Таким образом, в данной главе исследовано влияние наличия отражения от внешних плоских граней в широкополосковых лазерах с искривлёнными штрихами решётки обратной связи. Показано, что для лучей распространяющихся под углом к оси резонатора фаза отражения зависит от угла распространения, что приводит к зависимости порогового усиления и резонансных частот от угла распространения луча по резонатору. Это, в свою очередь, приводит к неоднородности распределения интенсивности на выходном зеркале и изменению спектра генерации. Поэтому учёт влияния фазы отражения при конструировании и-РОС резонатора будет играть ключевую роль для обеспечения спектрального и пространственного совершенства излучения таких лазеров.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Проведён теоретический анализ пространственных свойств и-РБЗ лазеров. Теоретически и экспериментально показано наличие фокусировки выходного излучения и-РБЗ лазеров в плоскости р-п перехода. Выявлены механизмы, определяющие размер фокусного пятна
2. Проведено комплексное и теоретическое и экспериментальное исследование спектральных свойств и-РБЗ лазеров. Показано, что и-РБЗ лазеры работают в одночастотном режиме генерации с подавлением боковых продольных мод до 30 дБ и более при $\kappa L = 1.7$.
3. Теоретически и экспериментально изучено влияние ширины спектральной линии и-РБЗ лазера на размер фокусного пятна. Показано, что влияние ширины спектра во многих случаях является ключевым фактором, определяющим размер фокусного пятна.
4. Проанализировано влияние фазы отражения на торцах резонатора на пороговые и спектральные свойства и-РОС лазеров. Показано, что фаза отражения на торцах лазера с искривлённой решёткой обратной связи не постоянна, а плавно изменяется по ширине выходного зеркала. Показано, что влияние фазы отражения может

приводить к срыву одночастотной генерации и требует учёта при проектировании реальных устройств.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. В.В.Дюделев, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский, "Лазер с искривленными штрихами распределенного брегговского зеркала, обеспечивающий фокусировку выходного излучения", Четвертая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, С-Петербург, Россия, 3-6 декабря 2002.
2. Д.А.Янсон, Э.У.Рафаилов, В.В.Дюделев, Г.С.Соколовский, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, А.К.Брюс, Дж.Г.Марш, В.Сиббет, "Полупроводниковый лазер с искривлёнными штрихами распределённого брегговского зеркала", Международный семинар по оптоэлектронике, С-Петербург, Россия, 27-28 ноября 2003.
3. В.В.Дюделев, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский, "Полупроводниковый лазер с искривленными штрихами распределенного брегговского зеркала", Итоговый семинар по физике и астрономии по результатам конкурса грантов для молодых ученых С-Петербурга, С-Петербург, Россия, 26 апреля 2004.
4. В.В.Дюделев, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский, "Фокусировка излучения в лазере с искривленными штрихами распределенного брегговского зеркала", Шестая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, С-Петербург, Россия, 6-10 декабря 2004.
5. G.S.Sokolovskii, I.M.Gadjiev, A.G.Deryagin, V.V.Dudelev, S.N.Losev, V.I.Kuchinskii, E.U.Rafailov, W.Sibbett, "Broad area self-focused distributed Bragg reflector laser diodes", 20th Anniversary Meeting Advanced Solid-State Photonics, Vienna, Austria, 6-9 February 2005.
6. G.S.Sokolovskii, I.M.Gadjiev, A.G.Deryagin, V.V.Dudelev, S.N.Losev, V.I.Kuchinskii, E.U.Rafailov, W.Sibbett, Y.G.Boucher, "Beam-focused Broad Area DBR Laser Diodes", Laser Application and Technologies LAT'2005, St.Petersburg, Russia, 11-15 May 2005.
7. G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, I.M.Gadjiev, S.N.Losev, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, E.U.Rafailov, W.Sibbett, "Beam-focused broad area distributed Bragg reflector laser diodes", 5th Belarussian–Russian Workshop Semiconductor lasers and systems, Minsk, Belarus, 1–5 June 2005.

8. G.S.Sokolovskii, V.V.Dudelev, I.M.Gadjiev, S.N.Losev, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, E.U.Rafailov, W.Sibbett, "Focused output from 100 μm aperture QW laser diode with curved grating", LOED.20p, Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology (NANO-2005), St.Petersburg, Russia, 20-25 June 2005.
9. G.S.Sokolovskii, I.M.Gadjiev, A.G.Deryagin, V.V.Dudelev, S.N.Losev, V.I.Kuchinskii, E.U.Rafailov, W.Sibbett, "Beam-focused broad area distributed Bragg reflector laser diodes", Advanced Solid-State Photonics 2005 (ASSP2005), TOPS Vol. 98, I.Sorokina and C.Denman eds.
10. Г.С.Соколовский, В.В.Дюделев, И.М.Гаджиев, С.Н.Лосев, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, Э.У.Рафаилов, В.Сиббет, "Особенности фокусировки выходного излучения в лазере с распределённым брэгговским зеркалом с искривлёнными штрихами", Письма в ЖТФ, 2005, т.31(19), с.28-34.

Цитированная литература:

- [1] Винокуров Д.А., Капитонов В.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Пихтин Н.А., Рожков А.В., Рудова Н.А., Слипченко С.О., Станкевич А.Л., Фетисова Н.В., Хомылев М.А., Шамахов В.В., Борщёв К.С., И.С.Тарасов, “Исследование характеристик полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур со сверхтолстым волноводом ($\lambda=1060$ нм) при импульсном режиме накачки”, Письма в ЖТФ, 2006, т.32(16), с. 47-55.
- [2] Блохин С.А., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Шерняков Ю.М., Новиков И.И., Гордеев Н.Ю., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Кучинский В.И., Максимов М.В., Устинов В.М., Ковш А.Р., Михрин С.С., Леденцов Н.Н., М.М.Кулагина, “Вертикально-излучающие лазеры на основе массивов субмонослойных квантовых точек InGaAs”, ФТП, 2006, т. 40(5), с. 633-638.
- [3] Алфёров Ж.И., Кижаяев К.Ю., Куксенков Д.В., Кучинский В.И., Никишин С.А., Портной Е.Л., Смирницкий В.Б., “Гетеролазеры с распределённой обратной связью ($\lambda=1,55$ мкм), работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре”, Письма в ЖТФ, 1987 т.13(9), с.513-517.
- [4] N. Eriksson, P. Modth, A. Larsson, “Design Optimization of Hyperbolic Unstable-Resonator Semiconductor Lasers” IEEE Journal of Quant. El., 2001, v. 37(8), pp. 1095-1102.
- [5] H.Kogelnik, C.V.Shank, “Coupled-wave theory of distributed feedback lasers”, Journal of Appl. Phys, 1972, v.43(5), pp.2327-2335.
- [6] Р.Ф.Казаринов, Р.А.Сурис, “Инжекционный гетеролазер с дифракционной решёткой на контактной поверхности”, ФТП, 1972, т.6(7), с. 1359-1365.
- [7] S.Wang, “Principles of Distributed Feedback and Distributed Bragg-Reflector Lasers”, IEEE Journal of Quant. El.,1974, v.10(4), pp.413-427.
- [8] R.Shubert “Theory of optical-waveguide distributed laser with nonuniform gain and coupling”, Journal of Applied Physics, 1974, v. 45(1), pp. 209-215
- [9] W.Streifer, D.R.Scifres, R.D.Burham, “Longitudinal modes in distributed feedback lasers with external reflectors”, Journal of Appl. Phys, 1975, v.46, No.1, pp.247-249.
- [10] Agrawal G.P., Dutta N.K. Semiconductor lasers. Second Edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993, p. 334.