

на правах рукописи

УДК 621.315.592

**СОКОЛОВСКИЙ**

Григорий Семенович

**Насыщение усиления и нелинейные эффекты в полупроводниковых  
лазерах с периодическими оптическими неоднородностями**

специальность:

01.04.10 - физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член-корр. РАН	А.А.Андронов
Учреждение Российской академии наук Институт физики микроструктур РАН, Н.Новгород	
доктор физико-математических наук, профессор	Л.Е.Воробьев
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, С-Петербург	
доктор физико-математических наук, профессор	Н.Н.Розанов
ФГУП «НПК "Государственный оптический институт им.С.И.Вавилова"», С-Петербург	

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский Академический  
университет - научно-образовательный центр нанотехнологий РАН, г. С-Петербург.

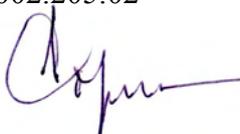
Защита состоится «17» июня 2010 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного  
совета Д 002.205.02 Учреждения Российской академии наук Физико-технического  
института им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим  
высылать по указанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «14» мая 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.205.02

доктор физико-математических наук  Л.М.Сорокин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Исследования полупроводниковых лазеров и новые разработки, в особенности связанные с применением наноразмерных гетероструктур – квантовых ям и квантовых точек, обеспечили их применение во многих областях науки и техники, яркими примерами которых являются запись, хранение и передача информации, накачка оптических усилителей и твердотельных лазеров, фотомедицина и фотобиология. Столь широкий интерес к использованию полупроводниковых лазеров в первую очередь связан с их компактностью и эффективностью – по этим параметрам полупроводниковые лазеры имеют огромное преимущество по сравнению со всеми другими типами лазеров. Однако в последние годы расширение круга применений полупроводниковых лазеров постоянно требует разработки путей дальнейшего повышения мощности излучения, улучшения его фокусировки, а также обеспечения одночастотной генерации и повышения быстродействия полупроводниковых лазеров.

Решение этих задач показывает, что повышение мощности излучения полупроводниковых лазеров за счет увеличения тока накачки зачастую оказывается невозможным из-за насыщения ватт-амперной характеристики, вызываемого как перегревом активной области, так и проявлением насыщения усиления и нелинейных эффектов, снижающих также быстродействие лазеров, приводящих к срыву одночастотной генерации и формированию многомодового излучения, что существенно затрудняет его фокусировку. Особенно остро вопрос учета насыщения усиления и нелинейных эффектов стоит в задачах, требующих *одновременного* достижения высокой мощности и одночастотной генерации, быстродействия и фокусировки излучения. Поэтому дальнейшее улучшение характеристик полупроводниковых лазеров невозможно без изучения влияния нелинейных эффектов и насыщения усиления, а также разработки конструкций лазеров, минимизирующих такое влияние или, напротив, использующих нелинейные эффекты для улучшения характеристик полупроводниковых лазеров.

Перспективным решением является использование в лазерном резонаторе различных интегрально-оптических элементов с периодическими оптическими неоднородностями, эффективность которых для фокусировки излучения лазеров с широким полоском была продемонстрирована в различных конструкциях поверхностно-излучающих лазеров с дифракционным выводом излучения. К сожалению, лазеры с дифракционным выводом излучения имеют низкую дифференциальную квантовую

эффективность вследствие дифракции значительной части излучения в подложку, поэтому особенно привлекательным является применение брегговской решётки с искривленными штрихами в лазере торцевой конструкции, что позволит достичь высокой мощности за счёт применения широкого полоска, фокусировки излучения за счёт симметрии резонатора и одночастотной генерации за счет использования распределённого брегговского зеркала.

Кроме того, излучательные характеристики полупроводниковых лазеров могут быть существенно улучшены методами зонной инженерии. Помимо очевидного влияния на взаимное расположение уровней размерного квантования в квантово-размерных гетероструктурах, управление составами и толщинами эпитаксиальных слоев предоставляет возможность изменения взаимного расположения подзон легких и тяжелых дырок в валентной зоне, что приводит к модификации спектров оптического усиления для излучения с различной поляризацией и изменению коэффициентов насыщения усиления. Таким образом, методами зонной инженерии могут быть созданы полупроводниковые лазеры с переключением поляризации излучения и поляризационной бистабильностью (за счет влияния насыщения усиления), в которых при переключении не меняется концентрация неравновесных носителей заряда, что позволяет снять обычные ограничения (время жизни) на скорость переключения.

Во всех перечисленных выше задачах важнейшую роль играет учет насыщения усиления и нелинейных эффектов в полупроводниковых лазерах, однако решению этой проблемы к началу наших работ не уделялось достаточного внимания. Более того, чаще всего насыщение усиления и нелинейные эффекты либо полностью исключались из рамок рассмотрения решаемых задач, либо учитывались лишь при численном моделировании. Поэтому проблема учета насыщения усиления и нелинейных эффектов в полупроводниковых лазерах с периодическими оптическими неоднородностями потребовала проведения комплекса физических исследований. Решению этой проблемы и сопряженных с ней задач и посвящена представленная работа.

Целью данной работы являлось исследование насыщения усиления и нелинейных эффектов в полупроводниковых лазерах с периодическими оптическими неоднородностями, разработка методов повышения быстродействия полупроводниковых лазеров, в том числе за счет переключения поляризации излучения, и способов обеспечения одночастотного режима генерации и фокусировки излучения полупроводниковых лазеров.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование лазеров с искривленными штрихами решетки обратной связи и клиновидным полоском. Показано, что обеспечение цилиндрической симметрии резонатора позволяет сфокусировать все моды выходного излучения полупроводникового лазера с распределенным брегговским зеркалом или распределенной обратной связью в общий фокус в плоскости p-n перехода.
2. Проведен анализ механизмов, определяющих размер фокусного пятна лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи. Показано, что размер фокусного пятна определяется не только числовой апертурой лазера и преломлением излучения на плоском выходном зеркале, но и шириной спектральной линии выходного излучения.
3. Проанализировано влияние фазы отражения на торцах резонатора на пороговые и спектральные характеристики лазеров с искривлёнными штрихами решётки обратной связи. Показано, что учет влияния фазы отражения играет ключевую роль для обеспечения одночастотной генерации и фокусировки излучения. Предложена усовершенствованная конструкция лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи, в которой исключается негативное влияние фазовых эффектов.
4. Обнаружено, что характеристики полупроводниковых лазеров с активной областью на основе квантовых точек InGaAs/GaAs/InAs, генерирующих излучение двух квантовых состояний, во многом определяются перераспределением инжекции носителей между квантовыми состояниями. Вызываемое этим перераспределение концентрации носителей при накачке импульсами тока длительностью 30 нс может вызывать полное прекращение лазерной генерации на время до 10-15 нс и более через 2-5 нс после первоначального включения, причем задержка возобновления лазерной генерации увеличивается с увеличением тока накачки.
5. Показано, что перераспределение инжекции носителей между квантовыми состояниями в полупроводниковых лазерах с активной областью на основе квантовых точек InGaAs/GaAs/InAs, генерирующих излучение двух квантовых состояний, порождает эффект, сходный с действием насыщающегося поглотителя, и вызывает модуляцию добротности излучения возбужденного состояния, выражающуюся в генерации импульсов длительностью 100-300 пс с периодом 0.5-1 нс, следующих за

короткими провалами сходной длительности в излучении основного состояния (т.н. «темными импульсами»).

6. Обнаружено, что полупроводниковые лазеры с активной областью на основе квантовых ям InGaAs/GaAs/AlGaAs, генерирующие излучение, соответствующее переходам между несколькими дырочными и электронными уровнями, при накачке импульсами тока длительностью 150 нс демонстрируют загиб ватт-амперной характеристики, не связанный с перегревом активной области. Показано, что спад мощности излучения при увеличении тока накачки связан с перераспределением энергии между квантовыми уровнями, которое может вызывать полное прекращение лазерной генерации на время до 100 нс и более через 15-30 нс после первоначального включения, причем задержка возобновления лазерной генерации увеличивается с увеличением тока накачки.
7. Экспериментально подтверждена теория о нелинейной зависимости квадрата частоты релаксационных колебаний в полупроводниковых лазерах от выходной мощности. Теоретически предсказана и экспериментально обнаружена область малых мощностей выходного излучения лазеров с насыщающимся поглотителем, свободная от релаксационных колебаний.
8. Проведено комплексное теоретическое исследование поляризации излучения инжекционных InGaAsP/InP лазеров с напряженным активным слоем. Впервые получено аналитическое выражение для зависимости времени переключения поляризации выходного излучения от параметров лазера.
9. Изучена возможность «двойной» модуляции (током накачки и коэффициентом оптического ограничения) полупроводникового лазера для получения лазерного излучения с круговой поляризацией. Разработан метод прямого управления поляризацией лазерного излучения при практически постоянной выходной мощности, т.н. «скрамблирования».

Основные результаты, перечисленные в заключении по диссертации, были получены впервые.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предложена конструкция полупроводникового лазера с дифракционным выводом излучения и распределенным брегговским отражателем со стороны подложки. Показано, что предложенная конструкция позволяет существенно повысить

эффективность лазера и обеспечивает генерацию одночастотного излучения высокой мощности с расходимостью, определяемой дифракционным пределом.

2. Разработана технология создания лазеров с распределенной обратной связью с плавно изменяющимся по длине резонатора периодом решетки, за счет чего исключается появление брегговской щели в спектре излучения и достигается одночастотная генерация.
3. Предложена конструкция лазеров с распределенной обратной связью и распределенным брегговским зеркалом с искривленными штрихами решетки и клиновидным полоском. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование лазеров предложенной конструкции, в результате чего:
  - a) показано, что цилиндрическая симметрия резонатора обеспечивает фокусировку всех мод выходного излучения в общий фокус в плоскости p-n перехода.
  - b) выявлены механизмы, определяющие размер фокусного пятна; показано, что размер фокусного пятна определяется числовой апертурой лазера, преломлением излучения на плоском выходном зеркале и шириной спектральной линии выходного излучения;
  - c) установлено, что преломление излучения на плоской выходной грани резонатора при значении числовой апертуры лазера  $NA < 0.2$  не увеличивает размер фокусного пятна по сравнению с интегрально-оптическим случаем, когда внешние грани повторяют кривизну штрихов дифракционной решетки;
  - d) показано, что при наличии отражения от плоских выходных граней, его фаза плавно меняется по ширине резонатора, вследствие чего могут возникать неоднородности в распределении интенсивности лазерного излучения; предложена усовершенствованная конструкция лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи, в которой исключается негативное влияние фазовых эффектов;
4. Продемонстрирована возможность модуляции добротности в полупроводниковых лазерах с активной областью на основе квантовых точек, генерирующих излучение двух квантовых состояний, за счет нового эффекта, связанного с перераспределением инжекции носителей между квантовыми состояниями, сходного с действием насыщающегося поглотителя.
5. Показана возможность обострения оптического сигнала вертикально-излучающих лазеров с вертикальным резонатором с активной областью на основе квантовых точек

в 200-500 раз и более по отношению к сигналу импульсной электрической накачки и получение импульсов длительностью 60-80 пс и менее при накачке 10-100 нс импульсами с периодом 1-10 мкс.

6. Обнаружено, что характеристики полупроводниковых лазеров с активной областью на основе квантоворазмерных гетероструктур (квантовых точек и квантовых ям), генерирующих излучение, соответствующее переходам между несколькими квантовыми состояниями дырок и электронов, во многом определяются перераспределением энергии между квантовыми состояниями, которое, при накачке импульсами тока длительностью порядка ста наносекунд, может вызывать полное прекращение лазерной генерации на время порядка нескольких десятков наносекунд через несколько наносекунд после первоначального включения, причем задержка возобновления лазерной генерации увеличивается с увеличением тока накачки. Этим фактором обусловлено ограничение выходной мощности таких лазеров при накачке короткими импульсами тока.
7. Теоретически исследована зависимость поляризации излучения полупроводникового лазера с напряженным активным слоем от параметров лазера, в результате чего:
  - а) найдена зависимость тока переключения поляризации излучения от параметров лазера, что позволяет заранее предсказать возможность переключения мод различных поляризаций или их бистабильность при изменении тока накачки.
  - б) найдена зависимость времени переключения поляризации лазерного излучения при изменении тока накачки от параметров лазера, что позволяет оптимизировать лазерную структуру для получения быстрого (порядка десятков пикосекунд) времени переключения поляризации лазерного излучения.
  - в) предложен способ плавной перестройки поляризации излучения полупроводникового лазера при постоянной мощности излучения путем «двойной» модуляции (током накачки и изменением фактора оптического ограничения), что позволит исключить влияние случайно возникающей поляризационной селективности оптического волокна на стабильность работы волоконно-оптических линий связи.

На защиту выносятся следующие научные положения:

**Положение 1** (о фокусировке излучения полупроводникового лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи). Концентрическая форма штрихов решетки

обратной связи и использование клиновидного полоска, обеспечивающее цилиндрическую симметрию резонатора, позволяет сфокусировать все моды выходного излучения полупроводникового лазера с распределенным брегговским зеркалом или распределенной обратной связью в общий фокус в плоскости p-n перехода.

**Положение 2** (о факторах, определяющих размер фокусного пятна полупроводникового лазера при фокусировке излучения за счет искривления штрихов решетки обратной связи). Размер фокусного пятна лазера с распределенной обратной связью или распределенным брегговским зеркалом с искривленными штрихами и клиновидным полоском, обеспечивающими цилиндрическую симметрию резонатора, определяется тремя факторами: числовой апертурой, шириной спектральной линии выходного излучения и (при значении числовой апертуры лазера  $NA > 0.2$ ) преломлением излучения на плоской выходной грани резонатора.

**Положение 3** (о выключении полупроводниковых лазеров с квантоворазмерной активной областью, генерирующих излучение, соответствующее переходам между несколькими электронными и дырочными уровнями). При накачке короткими импульсами тока полупроводниковых лазеров с активной областью на основе квантовых точек или квантовых ям, генерирующих излучение, соответствующее переходам между несколькими электронными и дырочными уровнями, через несколько наносекунд после начала лазерной генерации происходит прекращение генерации, причем задержка возобновления лазерной генерации в пределах одного импульса тока накачки увеличивается с увеличением тока накачки и может достигать десятков наносекунд.

**Положение 4** (о релаксационных колебаниях в полупроводниковых лазерах с насыщающимся поглотителем). В лазерах с насыщающимся поглотителем при малой мощности выходного излучения частота релаксационных колебаний в ответ на резкое включение тока накачки уменьшается по сравнению с типичной для полупроводниковых лазеров линейной зависимостью частоты от корня из выходной мощности, что, в конечном итоге, приводит к полному подавлению релаксационных колебаний.

**Положение 5** (о переключении поляризации излучения полупроводникового лазера). Время переключения поляризации излучения полупроводникового лазера с напряженным активным слоем при изменении тока накачки зависит от коэффициентов насыщения усиления и не зависит от «линейных» параметров лазера (времени жизни носителей заряда, концентрации прозрачности и т.д.). «Двойная» модуляция (например, током накачки и изменением фактора оптического ограничения) полупроводникового лазера с напряженным активным слоем позволяет получить плавную перестройку поляризации

излучения при постоянной выходной мощности и, таким образом, обеспечить поляризационную модуляцию излучения.

#### Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийских и Международных конференциях International Symposium «Nanostructures: Physics and technology» (С-Петербург, 23-27 июня 1997, 22-26 июня 1998, 22-26 июня 2000, 18-22 июня 2001, 17-21 июня 2002, 22-28 июня 2003, 22-28 июня 2004, 20-25 июня 2005, 26-30 июня 2006), Международном семинаре по оптоэлектронике (С-Петербург, 5 ноября 1998), International Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) (Сан-Франциско, США, 7-12 мая 2000, Ницца, Франция, 10-15 сентября 2000, Лонг Бич, США, 19-24 мая 2002, Мюнхен, Германия, 22-27 июня 2003, 17-22 июня 2007 и 14-19 июня 2009), 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (Глазго, Шотландия, 10-14 ноября 2002), Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (Алушта, Украина, 19-20 сентября 2003), 20<sup>th</sup> Anniversary Meeting Advanced Solid-State Photonics (Вена, Австрия, 6-9 февраля 2005), Laser Application and Technologies (LAT) (С-Петербург, 11-15 мая 2005), 5th Belarussian–Russian Workshop Semiconductor lasers and systems (Минск, Белоруссия, 1–5 июня 2005), International Conference Laser Optics, С-Петербург, 24-27 июня 2008, Российской конференции по физике полупроводников Полупроводники'09, Новосибирск-Томск, 28 сентября – 3 октября 2009, а также на научных семинарах лаборатории интегральной оптики на гетероструктурах ФТИ им. А.Ф.Иоффе.

#### Публикации

По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, опубликовано 17 статей, список которых приведен в конце автореферата.

#### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы. Объем диссертации составляет 234 страницы, в том числе 82 рисунка на 82 страницах и 2 таблицы. Список цитированной литературы включает в себя 108 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель работы, показаны ее научная новизна и практическая ценность, приведены выносимые на защиту научные положения и кратко изложено содержание диссертации.

Глава первая. Теоретические основы лазеров с периодическими оптическими неоднородностями.

Основные идеи полупроводниковых лазеров с распределенной обратной связью были сформулированы в 1971 году в [1]. В главе кратко рассмотрены основные положения классической теории, даны определения основных понятий, использованных при исследовании и оптимизации характеристик лазеров с периодическими оптическими неоднородностями.

В §1.1 рассмотрен формализм связанных волн, впервые примененный Казариновым и Сурисом [2], а также Когельником и Шенком [3]. Приведены основные соотношения, определяющие спектр и пороги возбуждения мод в структуре с распределенной обратной связью (РОС). Основным параметром теории является коэффициент связи волн  $k$  (coupling – англ.), характеризующий величину обратной связи на единицу длины резонатора. Показано, что при образовании распределенной обратной связи за счет модуляции показателя преломления в модовом спектре появляется «брегговская» щель (область запрещенных частот) шириной  $\Delta\omega=2ck/n_o$ , где  $n_o$  - эффективный показатель преломления волновода. Отмечено, что в случае сильной связи ( $kL \gg 1$ ) распределение интенсивности излучения по длине резонатора имеет резко выраженный максимум, а в случае слабой связи ( $kL \ll 1$ ) - минимум в центре РОС-структуры.

В §1.2 рассмотрено влияние отражения на торцах структуры на спектр РОС-лазера [4]. Для этого введен параметр  $\Omega$  - фазовый сдвиг периодической модуляции относительно центра структуры. В результате численных расчетов показано, что соотношение пороговых усилений основных брегговских мод, и как следствие, установление одночастотного режима генерации существенно зависит от величины фазового сдвига, в то время как контроль  $\Omega$  при скалывании лазерных диодов практически невозможен. Проанализирована возможность возникновения генерации мод Фабри-Перо в РОС-лазере со сколотыми торцами. Показано, что конкуренция брегговских и Фабри-Перо мод определяется соотношением их пороговых усилений.

Поэтому при сильной связи ( $kL \gg 1$ ) генерация мод Фабри-Перо в РОС-лазере не наблюдается. В условиях слабой связи ( $kL \ll 1$ ) для обеспечения одночастотной генерации необходимо применение дополнительных мер по снижению добротности резонатора Фабри-Перо.

В §1.3 рассмотрена конструкция лазера с распределенным брегговским зеркалом (РБЗ), преимуществом которой по сравнению с РОС является отсутствие необходимости наращивания дифракционной решетки, создаваемой вблизи активной области лазера, и, таким образом, повышение выхода годных при изготовлении лазеров. Показано, что применение метода связанных волн [2,3], адаптированного для РБЗ лазеров Вангом [5] и Шубертом [6] позволяет определить их спектральные характеристики, причем параметром теории, помимо каплинга, выступает также поглощение в пассивных брегговских зеркалах. Показано, что при сильной обратной связи ( $kL \gg 1$ ) и отсутствии поглощения спектральное положение мод РБЗ лазера стремится к наблюдаемому в лазере с резонатором Фабри-Перо с длиной, равной сумме длины активной области и эффективной длины РБЗ зеркал.

В §1.4 для анализа динамики лазеров введены балансные уравнения, основанные на локальных уравнениях сохранения фотонов и инжектированных носителей. Значительное упрощение достигается при интегрировании локальных переменных по длине резонатора, т.е. при допущении пространственной однородности концентрации фотонов и носителей заряда. Обсуждены условия применимости полученной системы пространственно-усредненных (скоростных) уравнений.

В §1.5 описаны основные факторы, осложняющие фокусировку излучения мощных полупроводниковых лазеров с широким полоском (шпотование, астигматизм и многомодовый состав выходного излучения), а также основные типы конструкций мощных лазеров, в которых подавляется шпотование и многомодовый состав излучения: торцевые лазеры с неустойчивым резонатором и поверхностно-излучающие лазеры с дифракционной решеткой обратной связи.

Глава вторая. Спектральные и динамические характеристики лазеров с периодическими оптическими неоднородностями.

В §2.1 представлены результаты исследования и сравнения скоростных свойств полупроводниковых гетеролазеров с областью насыщающегося поглотителя, образованной методом имплантации тяжелых ионов и неимплантированных лазеров и

рассмотрены факторы, их определяющие. Получено экспериментальное подтверждение теории об обусловленной насыщением усиления нелинейной зависимости квадрата частоты релаксационных колебаний от выходной мощности. Обнаружена область малых мощностей выходного излучения лазеров с насыщающимся поглотителем, в которой частота релаксационных колебаний в ответ на резкое включение тока накачки уменьшается по сравнению с типичной для полупроводниковых лазеров линейной зависимостью частоты от корня из выходной мощности, что, в конечном итоге, приводит к полному подавлению релаксационных колебаний. Последнее объясняется особенно сильным влиянием насыщающегося поглотителя на наклон ватт-амперной характеристики имплантированного лазера при относительно малых концентрациях фотонов в активной области.

В §2.2 проведен точный количественный учет фазовых эффектов, возникающих в полупроводниковом лазере с дифракционным выводом излучения и распределенным брегговским отражателем со стороны подложки (фазовые особенности отражения света брегговским зеркалом, обусловленные скачком диэлектрической проницаемости на его границе, обсуждались Гуревичем, Карповым и Портным в работе [7]).

Полупроводниковые инжекционные лазеры с дифракционным поверхностным выводом излучения обладают рядом преимуществ по сравнению с лазерами, в которых вывод излучения осуществляется через торцы. Одними из основных преимуществ являются большая поверхность вывода излучения и связанная с ней высокая выходная апертура, что становится особенно важным при вводе лазерного излучения в оптическое волокно. Вместе с тем эти лазеры обладают некоторыми недостатками, к числу которых в первую очередь можно отнести потери излучения, дифрагированного в сторону подложки. Следует отметить, что в ряде случаев по технологическим соображениям для создания обратной связи используются решетки, работающие во втором порядке дифракции. При этом эффективность прибора снижают также потери излучения в первом порядке дифракции. Обе эти проблемы можно решить, если под волноводным слоем поместить многослойное брегговское зеркало. Показано, что точный учет фазовых соотношений между волнами, дифрагированными в воздух и в сторону многослойного брегговского зеркала и переотраженными им, открывает пути для существенного повышения эффективности лазера.

§2.3 посвящен исследованию спектральных характеристик лазеров с клиновидной структурой РОС.

В п.2.3.1 введено понятие «клиновидной» структуры РОС и обсуждены способы создания «клина». В первой главе было отмечено, что РОС-резонатор, образованный за счет модуляции показателя преломления, имеет модовый спектр, симметричный относительно «брегговской» частоты, с двумя центральными модами, имеющими наименьший порог возбуждения. Наличие двух мод с минимальными потерями становится препятствием для получения одночастотной генерации РОС-лазера и затрудняет применение таких лазеров в волоконно-оптических линиях связи.

В 1976 году Хаусом и Шенком [8] был предложен и теоретически проанализирован лазер с клиновидной структурой распределенной обратной связи. Авторами было показано, что изменение коэффициента обратной связи и брегговской расстройки (несоответствия между периодом решетки РОС-лазера и частотой генерации) по длине резонатора может привести к появлению генерации в точности на брегговской частоте. Частным случаем такого изменения является широко известный  $\lambda/4$ -сдвиг встроенной дифракционной решетки. В 1993 году Карповым и Столяровым был выполнен расчет коэффициента отражения брегговской решетки обратной связи с малой линейной составляющей показателя преломления [9]. В настоящей работе подчеркнута, что вариация каплинга и брегговской расстройки может быть достигнута не только за счет изменения среднего значения эффективного показателя преломления волновода или амплитуды его модуляции, но и за счет изменения периода гофрировки.

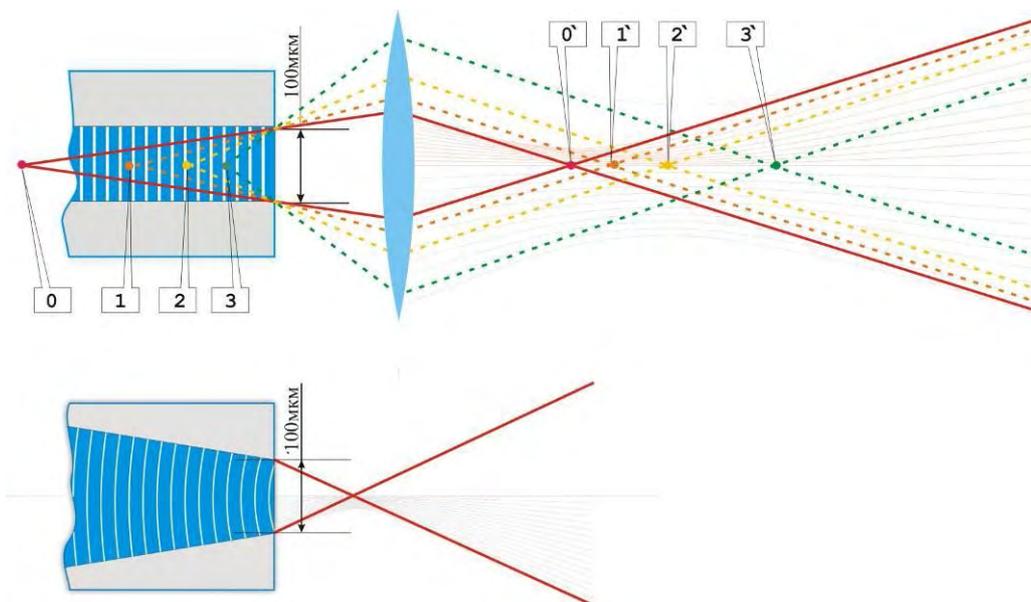
В п.2.3.2 предложен простой способ изготовления дифракционной решетки с переменным шагом на базе хорошо отработанной технологии голографической фотолитографии. Отличие от общепринятой технологии заключается в том, что для засветки фоторезиста вместо плоскопараллельных лучей используются лучи со сферическим фронтом с большой расходимостью ( $\sim 0.1$  рад). Использование такой методики не требует существенных изменений технологического процесса, разработанного для РОС-структур «обычной» конструкции и позволяет получать высококачественные дифракционные решетки с изменением шага до  $1 \text{ \AA}/\text{мм}$  и более.

п.2.3.3 посвящен теоретическому анализу РОС-лазера с переменным шагом встроенной дифракционной решетки. Вычисления показали, что в такой РОС-структуре возможно обеспечить селекцию одной продольной моды со степенью подавления

побочных мод не хуже, чем в классической РОС-структуре с  $\lambda/4$ -сдвигом. В то же время в структуре с переменным шагом, в отличие от случая  $\lambda/4$ -сдвига, сохраняется распределение интенсивности светового поля, присущее «обычному» РОС-лазеру, что обеспечивает улучшенную стабильность одночастотного режима при повышении выходной мощности.

Глава третья РОС-лазер с искривленными штрихами решетки, обеспечивающей фокусировку выходного излучения.

Наиболее актуальными задачами, стоящими перед разработчиками мощных полупроводниковых лазеров, являются достижение одночастотной генерации и фокусировка излучения, т.е. обеспечение высокой спектральной и пространственной плотности мощности. Фундаментальной проблемой, препятствующей решению этих задач, является многомодовый характер генерации в полупроводниковых лазерах с широким полоском. Помимо различия частот излучения различных мод, радиус кривизны волнового фронта мод высшего порядка увеличивается с номером моды и существенно отличается от радиуса кривизны волнового фронта нулевой моды, что препятствует фокусировке неодномодового излучения с помощью внешних линз. В настоящей главе предложена и исследована конструкция широкополоскового лазера с распределенной обратной связью с искривленными штрихами решетки (и-РОС) обеспечивающая одночастотную генерацию и фокусировку генерируемого излучения.



**Рис. 1. (а) Иллюстрация фокусировки многомодового излучения «обычного» полупроводникового лазера. «Геометрические источники» мод с различной кривизной волнового фронта обозначены номерами; (б) Иллюстрация фокусировки многомодового излучения и-РОС лазером.**

В §3.1 описывается конструкция лазера с распределенной обратной связью с искривленными штрихами решетки. Искривление штрихов дифракционной решетки, которые представляют собой дуги концентрических окружностей, обеспечивает цилиндрическую симметрию выходного излучения и-РОС лазеров и концентрацию всех мод лазерного излучения в общий фокус в плоскости p-n перехода (рис.1). Цилиндрическая симметрия резонатора дополняется клиновидным полоском, угол которого соответствует кривизне решетки. Показано, что электромагнитная волна, распространяющаяся по такой структуре, описывается в общем случае не экспонентой, а функцией Ханкеля, и выведен соответствующий профиль решётки обратной связи:

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

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

§3.2 посвящен анализу спектральных свойств и-РОС лазеров. Теоретическое рассмотрение разделено на анализ интегрально-оптического случая, когда внешние границы повторяют кривизну штрихов дифракционной решетки, благодаря чему обеспечивается полная цилиндрическая симметрия, и случая плоских внешних граней (т.е. случая неполной цилиндрической симметрии).

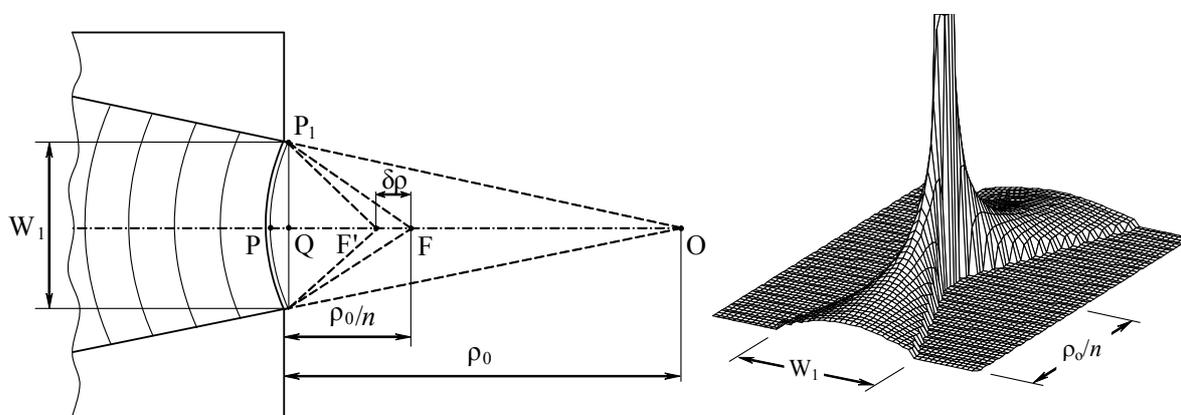
При анализе интегрально-оптического случая, благодаря цилиндрической симметрии резонатора, удастся разделить радиальную и ангулярную переменные и применить классический метод связанных волн, развитый Казариновым и Сурисом [2], а также Когельником и Шенком [3] для расчета спектральных свойств «одномерных» РОС-лазеров. В результате теоретического рассмотрения показано, что спектр порогового усиления и-РОС лазера в точности соответствует случаю классического РОС лазера с решеткой с прямыми штрихами.

В случае плоских внешних граней резонатора отсутствие полной цилиндрической симметрии в общем случае препятствует разделению переменных. Однако при отсутствии отражения от внешних граней радиальная и ангулярная переменные разделяются и задача сводится к рассмотренному выше интегрально-оптическому случаю. Полученный

результат позволяет утверждать, что и-РОС лазеры могут обеспечивать подавление боковых продольных мод с эффективностью до 30 дБ и более.

В §3.3 рассматриваются пространственные свойства выходного излучения и-РОС лазеров, причём теоретическое рассмотрение, как и в предыдущем параграфе, разделено на анализ случая плоских внешних граней и интегрально-оптического случая, когда внешние грани повторяют кривизну штрихов дифракционной решетки.

При рассмотрении интегрально-оптического случая показано, что все моды выходного излучения имеют общий фокус в плоскости р-п перехода в точке  $O$  (рис. 2) и фокусное расстояние равно кривизне решётки  $\rho_0$  (т.е. расстоянию от выходного зеркала до центра симметрии).



**Рис. 2. (а) Иллюстрация различия между случаем искривленных и плоских внешних граней; (б) Теоретический расчет фокусировки излучения и-РОС лазером.**

Для случая плоских граней также показано, что все моды выходного излучения имеют общий фокус, однако, в отличие от интегрально-оптического случая, величина фокусного расстояния составляет  $\rho_0/n$ , где  $n$  – эффективный показатель преломления лазерного волновода. Различие фокусных расстояний можно объяснить влиянием воображаемой плосковыпуклой линзы на границе воздух-полупроводник (см. рис. 2), с радиусом кривизны, равным кривизне решётки  $\rho_0$ , наличие которой отличает случай плоских внешних граней от интегрально-оптического случая.

В ходе исследований было рассмотрено три механизма, определяющих размер фокусного пятна и-РОС лазера:

1. Фокусировка лазерного излучения за счёт цилиндрической симметрии и-РОС резонатора легко описывается в приближении тонкой линзы, при этом размер фокусного пятна определяется числовой апертурой устройства  $NA$ , т.е. отношением половины ширины выходного зеркала  $W_1$  к фокусному расстоянию  $\rho_0/n$ :

$$w_0 = \frac{\lambda}{2NA}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

2. Размытие фокуса за счёт преломления цилиндрического лазерного луча на плоском выходном зеркале становится значительным при выходе за рамки приближения тонкой линзы:  $|OP| - |OP_1| < \lambda/4$ , где  $|OP|$  и  $|OP_1|$  – оптические пути. Получено, что поправка  $w_q$ , связанная с более сильным преломлением на краях выходного зеркала по сравнению с его центром, пропорциональна размеру выходного зеркала  $W_1$  и квадрату числовой апертуры:

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

Оценка полученного выражения говорит о том, что для небольших числовых апертур  $NA < 0.2$  влияние aberrаций на размер фокусного пятна является незначительным. Таким образом, преломление излучения на плоском выходном зеркале и-РОС лазера в случае параксиального распространения луча (числовая апертура меньше 0.2) практически не увеличивает размер фокусного пятна по сравнению с интегрально-оптическим случаем.

3. Фокусировка выходного излучения за счёт спектральной селективности искривлённой решётки. Физический смысл этого эффекта можно увидеть из сравнения и-РОС лазеров с «обычными» лазерами с распределенной обратной связью. В «обычных» РОС лазерах с широким полоском, вследствие различия расходимости излучения мод разных порядков, каждая из поперечных мод имеет собственную кривизну волнового фронта, существенно отличную от кривизны волнового фронта моды нулевого порядка (рис.1). Подобное рассмотрение и-РОС резонатора показывает, что все моды излучения имеют одну и ту же кривизну волнового фронта, определяемую цилиндрической симметрией резонатора. Кроме того, «нецилиндрическое» распространение луча в и-РОС резонаторе является причиной изменения эффективного брегговского периода цилиндрической решётки по ходу луча и, следовательно, приводит к спектральному уширению лазерной линии. Величина спектрального уширения зависит от длины решётки, ее кривизны и угла между радиусом, проходящим через рассматриваемую точку, и направлением распространения «немного нецилиндрического» луча. С другой стороны, спектральное уширение ограничено спектральной селективностью дифракционной решетки. Сравнение спектрального уширения из-за нецилиндрического распространения и спектральной

селективности распределённого резонатора дает возможность оценки размера фокусного пятна:

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

где  $\Delta\lambda$  – ширина линии генерации.

§3.4 посвящен исследованию влияния отражения от плоских внешних граней на пороговые и спектральные свойства и-РОС лазеров. Хорошо известно, что в классических РОС лазерах фаза отражения (фаза решетки на последнем незаконченном периоде относительно внешней грани) влияет на спектр продольных мод и при некоторых значениях может приводить к срыву одночастотной генерации. Трудность заключается в том, что фаза отражения не поддается контролю при выкалывании лазерных чипов и поэтому при изготовлении классических РОС-лазеров выход годных определяется вероятностью выкалывания чипов с оптимальной фазой решетки на сколе. В данном параграфе показано, что, в отличие от классических РОС-лазеров, фаза отражения у и-РОС лазеров является не постоянной, а плавно изменяется по ширине зеркала.

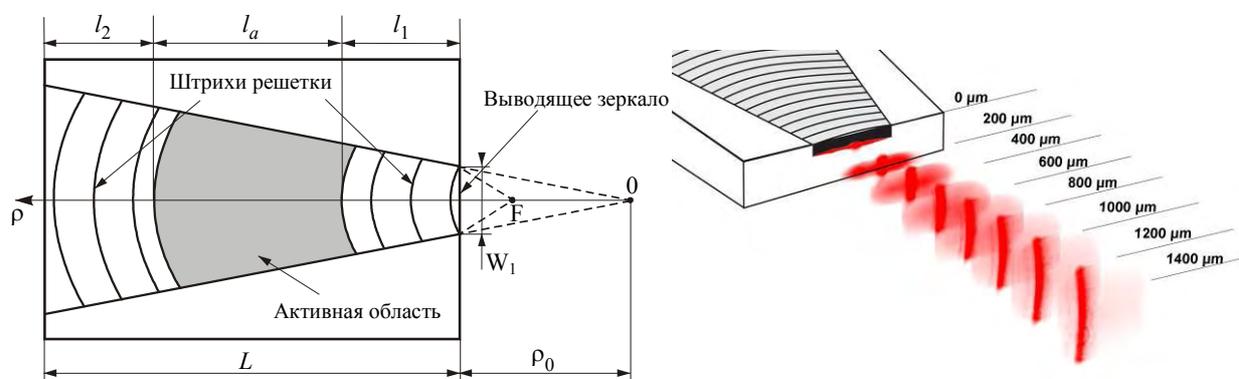
При теоретическом анализе влияния изменяющейся фазы отражения на спектральные и пороговые свойства и-РОС лазеров важно рассмотреть два предельных случая. Первый случай – «короткий и узкий» и-РОС лазер с кривизной решетки  $\rho_0$ , значительно превышающей его длину  $L$ . Форма штрихов решетки такого лазера оказывается практически прямой, изменение фазы отражения на обоих зеркалах мало и поэтому его спектральные характеристики практически соответствуют характеристикам классического РОС лазера с ненулевым отражением на торцах, хорошо известным из литературы [9].

Второй случай – «длинный и широкий» и-РОС лазер с кривизной решетки  $\rho_0$ , много меньшей его длины  $L$ . В таком лазере изменение фазы отражения на переднем зеркале пренебрежимо мало, а на заднем оно может быть весьма значительным и составлять до  $2\pi$  и более. Зависимость нормированного порогового усиления  $\alpha L$  от нормированной брегговской расстройки  $\delta L$  в этом случае 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 значения

порогового усиления всех продольных мод и соответствующие частоты генерации 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 темных и более светлых пятен, чередование которых определяется зависимостью порогового усиления от фазы отражения.

В результате анализа, проведенного в данном параграфе, показано, что фаза отражения зависит от угла распространения луча по резонатору, что приводит к зависимости порогового усиления и резонансных частот от угла распространения и неоднородности распределения интенсивности на выходном зеркале, а также изменению спектра генерации вдоль выходного зеркала. Поэтому учет влияния фазы отражения при конструировании и-РОС резонатора играет ключевую роль для обеспечения спектрального и пространственного совершенства излучения и-РОС лазеров.

Глава четвертая. Спектральные и пространственные характеристики GaAs/AlGaAs лазеров с искривленными штрихами распределенного брегговского зеркала, обеспечивающего фокусировку выходного излучения.



**Рис.3. Конструкция и-РБЗ лазера и экспериментально измеренное пространственное распределение интенсивности выходного излучения**

В настоящей главе рассматривается возможность устранения основного недостатка конструкции и-РОС лазера, связанного с необходимостью зарастивания дифракционной решетки, создаваемой в непосредственной близости от активной области лазера, что, помимо существенного удорожания технологии изготовления прибора, влечет за собой значительное уменьшение выхода годных. Предлагаемое решение указанной проблемы состоит в применении идеи искривления штрихов дифракционной решетки к конструкции лазера с распределенным брегговским зеркалом (рис. 3).

В §4.1 описывается устройство и-РБЗ лазеров. Основной особенностью и-РБЗ резонатора, как и рассмотренного выше и-РОС, является наличие цилиндрической симметрии, что обеспечивает фокусировку всех мод в общий фокус в плоскости p-n перехода. Цилиндрическая симметрия обеспечивается за счет применения в качестве элемента обратной связи брегговских решеток, штрихи которых представляют собой дуги концентрических окружностей с общим центром в точке O, и клиновидного полоска.

Для изготовления и-РБЗ лазеров использовалась структура AlGaAs/GaAs с двумя квантовыми ямами. На ней были изготовлены решетки третьего порядка с различной кривизной. Решетки создавались методом электронно-лучевой литографии. Для изготовления решеток использовалась двухслойная маска, состоящая из высокочувствительного резиста и окиси кремния, что позволило существенно снизить время экспонирования и получить хорошие результаты. Период всех решеток равнялся 385 нм, что обеспечило длину волны лазерной генерации 867 нм. Длина обоих распределенных брегговских зеркал составляла 0.5 мм, при этом полная длина каждого лазера равнялась 1.5 мм. Ширина выходного зеркала у всех лазеров равнялась 100 мкм. Полоски были клиновидными для обеспечения полной цилиндрической симметрии, при этом угол клина зависел от кривизны решетки. Зеркала лазеров были просветлены для подавления мод Фабри-Перо.

§4.2 посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию спектральных свойств и-РБЗ лазеров. Теоретическое рассмотрение разделено на анализ интегрально-оптического случая, когда внешние границы повторяют кривизну штрихов дифракционной решетки, благодаря чему обеспечивается полная цилиндрическая симметрия, и случая плоских внешних граней (т.е. случая неполной цилиндрической симметрии).

Анализ спектральных свойств для интегрально-оптического случая проводился на основе классического метода связанных волн, разработанного Сурисом и Казариновым [2], а также Когельником и Шенком [3], и впервые примененного для РБЗ лазеров Вангом [5] и Шубертом [6]. В результате теоретического рассмотрения показано, что спектр порогового усиления и-РБЗ лазера в точности соответствует случаю классического РБЗ лазера с решеткой с прямыми штрихами.

Определено пороговое условие для случая плоских внешних граней. Показано, что при отсутствии отражения на торцах, спектр порогового усиления не отличается от интегрально-оптического случая. Полученный результат позволил предсказать, что и-РБЗ

лазеры могут обеспечивать подавление боковых продольных мод с эффективностью до 30 дБ и более.

Экспериментальные исследования спектров генерации проводились при накачке лазерных диодов импульсами тока с длительностью 300 нс и частотой повторения 20 кГц. Значения пороговых токов и-РБЗ лазеров находились в пределах 1.5-2.5 А в зависимости от кривизны решетки (пороговая плотность тока всех лазеров составляла примерно 3 кА/см<sup>2</sup>). Столь высокое значение пороговых токов объясняется большой площадью накачиваемых областей и поглощением в ненакачиваемых областях (пути борьбы с повышением тока накачки обсуждались Гуревичем, Портным и Райхом в работе [11]). Линия генерации располагалась на коротковолновом краю полосы усиления. Подавление боковых мод составляло более 30 дБ. Экспериментальные данные спектральных измерений хорошо согласуются с проведенным теоретическим анализом.

В §4.3 приводятся данные теоретических и экспериментальных исследований фокусировки излучения и-РБЗ лазерами. Теоретическое рассмотрение проводилось аналогично анализу фокусировки излучения и-РОС лазером и было так же разделено на два случая: интегрально-оптическую конструкцию и-РБЗ лазера с искривленными внешними гранями, обеспечивающими полную цилиндрическую симметрию резонатора, и конструкцию с плоскими внешними гранями резонатора, которая была затем изучена экспериментально.

Показано, что цилиндрическая симметрия резонатора приводит к фокусировке всех мод лазерного излучения в общий фокус в точке симметрии структуры. Нарушение цилиндрической симметрии за счет плоских внешних граней приводит к укорочению фокусного расстояния (см. рис.2) за счет влияния воображаемой плоско-выпуклой линзы, наличие которой различает рассматриваемые случаи. Аналогично и-РОС лазеру, показано действие трех основных механизмов фокусировки излучения и-РБЗ лазером: фокусировка в параксиальном приближении, влияние аберраций на краях выходного зеркала и фокусировка излучения за счет спектральной селективности искривленной решетки.

Действие теоретически рассмотренных механизмов фокусировки изучалось экспериментально. С этой целью измерялось распределение интенсивности лазерного излучения 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 (например, при отсутствии просветления зеркал).

Приведены данные экспериментальных исследований влияния ширины линии генерации и-РБЗ лазеров 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 в фокальной плоскости с пространственным разрешением 5 мкм. Проведенные таким образом пространственно разрешенные 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 предсказанное выше для и-РОС и и-РБЗ лазеров.

Проведено сравнение результатов теоретического анализа влияния фазовых эффектов на ближнее поле и-РОС лазеров, выполненного в §3.4, с экспериментальными данными для близких по своим характеристикам образцам и-РБЗ лазеров. Показано, что ближнее поле таких лазеров представляет собой чередование светлых и темных пятен с различным спектром генерации. Экспериментально измеренное распределение интенсивности ближнего поля AlGaAs/GaAs и-РБЗ лазера хорошо согласуется с расчетами зависимости нормированного порогового усиления от угла распространения луча по резонатору. Пространственно разрешенные спектральные измерения также хорошо согласуются с результатами расчетов.

Глава пятая Динамические характеристики и насыщение усиления в лазерах и оптических усилителях с активной областью на основе квантоворазмерных гетероструктур.

В §5.1 представлено теоретическое исследование усиления и обострения сигналов в полупроводниковом оптическом усилителе с активной областью на основе квантовых точек (КТ ПОУ). Результаты сопоставляются с экспериментально полученными данными, в которых для таких усилителей продемонстрировано значительное усиление до 18 дБ. В литературе динамика носителей в структурах с квантовыми точками описывается с помощью скоростных уравнений. Применение этого метода к расчету характеристик КТ ПОУ, включая моделирование формы сигнала и величины усиления, представляет большой практический интерес.

Решение скоростных уравнений позволяет смоделировать работу КТ ПОУ и найти зависимость величины усиления от различных параметров, включая ток накачки и интенсивность оптического сигнала. В данном параграфе скоростные уравнения использованы для моделирования усиления коротких (200 фс) и относительно длинных (несколько нс) импульсов. Хорошее согласие между экспериментальными данными и результатами моделирования подтверждает полученную величину усиления в КТ ПОУ при оптической накачке малой мощности.

Кроме того, была исследована возможность обострения сигнала на фронте импульса и предложено новое устройство - оптический обостритель на квантовых точках. Идея предлагаемого устройства основана на том, что концентрация носителей на основном уровне квантовых точек при усилении переднего фронта импульса максимальна и равна удвоенному количеству точек. Усиление заднего фронта импульса происходит при значительно меньшей концентрации носителей на основном уровне и имеет меньшую величину. В результате моделирования нами продемонстрировано обострение оптического импульса сравнительно большой мощности длительностью 2 нс. Параметр обострения (отношение между усилением на переднем и заднем фронте импульса), существенно зависит от коэффициента усиления в материале, уровня накачки и времени жизни фотонов в резонаторе. Также вычислена ширина пика обостренного сигнала при условии постоянной концентрации носителей. Смоделированное устройство имеет полуширину импульса, лежащую в пикосекундной области.

§5.2 посвящен исследованию обострения оптического сигнала в вертикально-излучающих лазерах на основе субмонослойных InGaAs квантовых точек. Подход, развитый в этом параграфе, опирается на идеи, изложенные в §5.1, однако имеет существенные особенности, связанные, в первую очередь, с тем, что объектом исследования в данном случае является полупроводниковый лазер, а не усилитель.

Вертикально-излучающие лазеры с вертикальным резонатором, использованные в экспериментах, были выращены молекулярно-пучковой эпитаксией. В процессе роста был сформирован  $3\lambda/2$  оптический резонатор, ограниченный верхним и нижним брегговским отражателями, состоящими из, соответственно, 33 и 20 пар. Активная область состояла из трех слоев субмонослойных InGaAs квантовых точек. Толщины и составы слоев были выбраны таким образом, чтобы обеспечить лазерную генерацию на длине волны 980 нм. Апертура тока накачки диаметром 1 мкм была сформирована за счет

селективного окисления AlAs-насыщенного слоя в мезе, благодаря чему лазеры демонстрировали одномодовую генерацию во всем диапазоне токов накачки.

При непрерывной накачке в лазерном излучении наблюдались самопульсации с длительностями импульсов в диапазоне 100-300 пс с частотами повторения 0.2-0.6 ГГц, увеличивающимися с ростом тока накачки. Самопульсации наблюдались в ограниченном диапазоне токов накачки вблизи порога генерации. Их возникновение, по нашему мнению, связано с проявлением эффекта насыщающегося поглощения из-за существенно меньшего растекания тока накачки по сравнению с оптическим ограничением лазерной моды. При увеличении тока накачки растекание тока существенно увеличивается и перекрытие лазерной моды с ненакачанной областью уменьшается, что приводит к исчезновению области насыщающегося поглотителя и самопульсаций.

При накачке лазеров прямоугольными импульсами тока наблюдалось обострение сигнала в 200-500 раз и более: импульсы тока накачки длительностью 10-100 нс преобразовывались в оптические импульсы длительностью 50-100 пс, а микросекундные импульсы накачки возбуждали 100-200 пикосекундные оптические импульсы. Наблюдаемое обострение сигнала объясняется тем, что при достаточно резком нарастании фронта импульса накачки сформированный растеканием тока насыщающийся поглотитель обеспечивает генерацию лишь одного импульса самопульсаций, по окончании которого при дальнейшем нарастании тока накачки лазерная генерация полностью подавляется за счет насыщения усиления. Этот механизм обострения во многом сходен с рассмотренным в предыдущем параграфе, однако, помимо насыщения усиления, включает в себя также генерацию короткого импульса за счет действия насыщающегося поглотителя, что позволяет добиться кардинального улучшения параметра обострения.

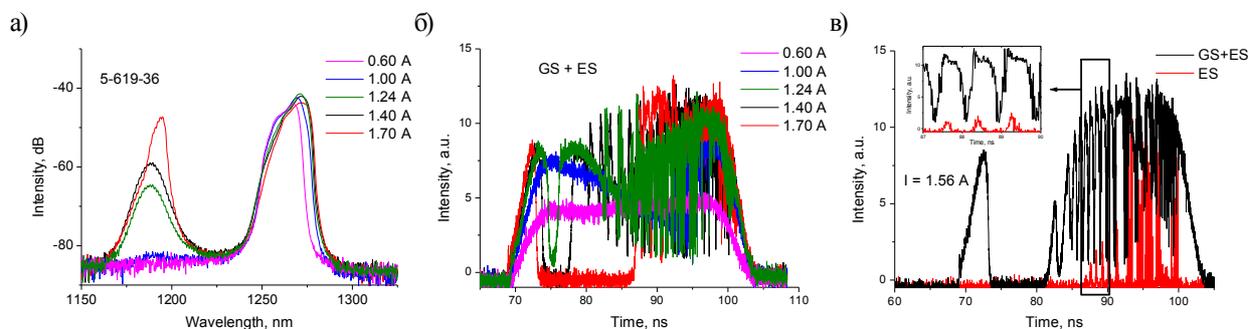
В §5.3 представлены результаты экспериментов по исследованию динамики спектров излучения полупроводниковых лазеров с активной областью на основе квантовых точек, генерирующих излучение двух квантовых состояний.

Лазерная структура, использованная в эксперименте, была выращена молекулярно-пучковой эпитаксией на подложке GaAs и содержала активную область из 5 слоев InAs квантовых точек, покрытых слоем  $\text{In}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$  толщиной 5.3 нм с GaAs в качестве разделителя. На структуре был сформирован меза-полосок шириной 4 мкм и изготовлены лазерные чипы длиной от 1.5 до 2.5 мм. На задние и передние зеркала всех

изготовленных полупроводниковых лазеров были нанесены соответственно высокоотражающие и антиотражающие покрытия.

При электрической накачке 30 нс импульсами через 2-5 нс после включения лазера наблюдалось полное прекращение лазерной генерации на время до 10 нс и более в зависимости от амплитуды импульса накачки (рис.4б). После повторного включения в лазерном излучении наблюдались короткие импульсы излучения возбужденного состояния квантовых точек длительностью 200-300 пс, следующие за короткими провалами сходной длительности (т.н. «темными импульсами») в излучении основного состояния (рис.4в).

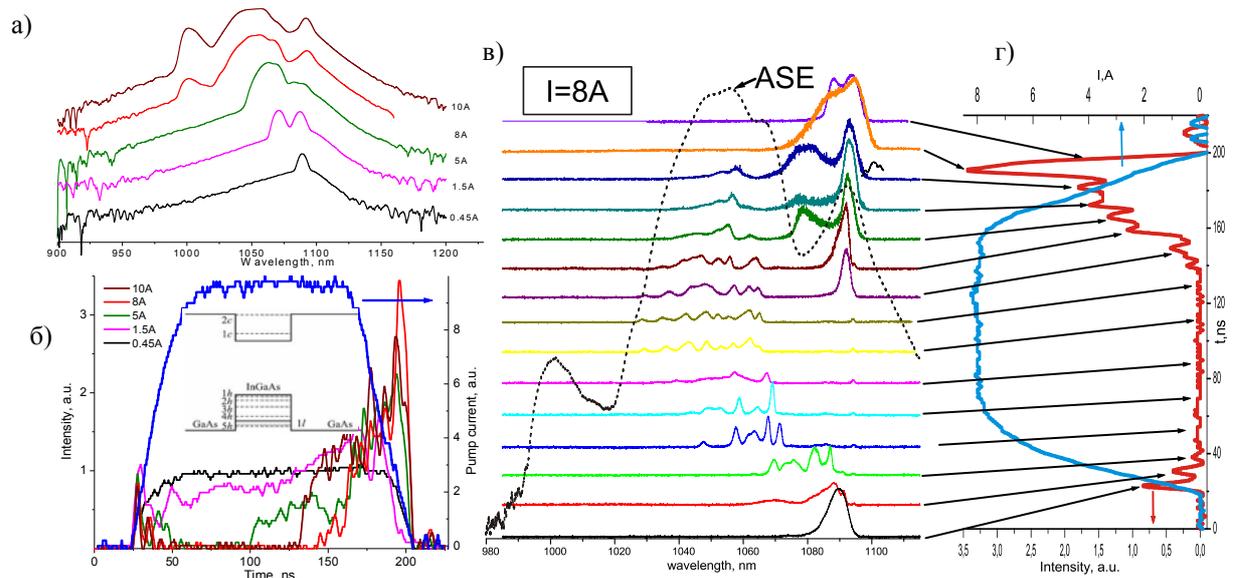
В качестве причины этого явления следует рассматривать перераспределение энергии между основным и возбужденным состояниями квантовых точек. Иными словами, одно состояние выступает в роли модулятора добротности или «насыщающегося поглотителя» для другого состояния. Единственным отличием от «обычного» насыщающегося поглотителя, широко используемого для модуляции добротности и синхронизации мод в полупроводниковых лазерах, является то, что насыщение испытывает не поглощение света, а скорость заполнения квантового состояния.



**Рис.4.** Спектры (а) и осциллограммы (б) излучения КТ ПЛЛ при накачке импульсами тока различной амплитуды длительностью 30 нс. (в) Осциллограммы в условиях генерации с основным и возбужденного состояний при накачке импульсами тока амплитудой 1.56 А длительностью 30 нс

В §5.4 изложены результаты экспериментов по исследованию динамики спектров генерации полупроводниковых лазеров раздельного ограничения с одной квантовой ямой, генерирующих излучение за счет переходов между несколькими состояниями электронов и дырок. При накачке импульсами тока длительностью 150 нс лазеры демонстрировали спад ватт-амперной характеристики, не связанный с перегревом активной области. Показано, что спад мощности излучения при увеличении тока накачки связан с прекращением лазерной генерации на время до 100 нс и более через 15-30 нс

после первоначального включения, причем задержка возобновления лазерной генерации увеличивалась с увеличением тока накачки.



**Рис.5.** Спектры (а) и осциллограммы (б) излучения КЯ ППЛ при накачке импульсами тока различной амплитуды длительностью 150 нс. Динамика спектров излучения КЯ ППЛ при накачке импульсами тока амплитудой 8 А (в) и соответствующая осциллограмма лазерного излучения и тока накачки (г).

Наблюдаемое развитие спектров стимулированного излучения в лазерах с активной областью на основе квантовых ям демонстрирует динамику, аналогичную спектрам лазеров на основе квантовых точек (§5.3). По-видимому, наблюдаемый провал в интенсивности излучения обусловлен увеличением скорости стимулированной рекомбинации при увеличении излучаемой оптической мощности с ростом тока накачки, в результате чего носители заряда не успевают релаксировать на основное состояние. Следует отметить, что зависимость интегралов перекрытия от продольного волнового вектора для переходов между различными уровнями размерного квантования в сочетании с ограниченным временем энергетической релаксации носителей заряда приводит к насыщению усиления и срыву генерации в полосе низших энергетических уровней электронов и дырок. Поэтому рост концентрации носителей заряда в квантовой яме активной области с увеличением амплитуды импульса тока накачки вызывает повышение концентрации носителей на возбужденных уровнях электронов и дырок и, в конечном счете, выполнение пороговых условий для этих уровней. Однако до достижения указанного порога генерации увеличение концентрации на возбужденном состоянии приводит лишь к увеличению потерь и уменьшению внутренней квантовой эффективности, что в свою очередь, повышает эффективный порог лазерной генерации и

приводит к выключению генерации на переходах между основными состояниями электронов и дырок.

Глава шестая. Исследование поляризационных свойств излучения полупроводниковых лазеров.

Полупроводниковые лазеры с поляризационным переключением и бистабильностью весьма полезны для систем оптической обработки и передачи данных, и могут применяться, например, в системах со спектральным уплотнением. Такие лазеры выгодно отличаются от других бистабильных полупроводниковых приборов тем, что при их переключении не меняется концентрация неравновесных носителей заряда, что позволяет снять обычные ограничения (время жизни) на скорость переключения. В связи с этим возникает вопрос, как быстро может происходить смена поляризации. В настоящей главе предпринята попытка получить в явном виде выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера и оценить влияние параметров лазерного диода на это время.

В §6.1 отмечено, что одноосная деформация полупроводника со сложной валентной зоной (таких как InGaAsP) снимает вырождение валентной зоны и существенно изменяет ее строение [12]. Использование методов зонной инженерии, т.е. управление составами и толщинами эпитаксиальных слоев для введения напряжений в активную область лазера, позволяет существенно улучшить излучательные характеристики полупроводниковых лазеров и придать им новые качества. Например, изменение взаимного расположения подзон легких и тяжелых дырок в валентной зоне приводит к изменению эффективной массы дырок и модификации спектров оптического усиления для излучения с различной поляризацией. Это позволяет получить различные аномалии в поляризации лазерного излучения, например, создать поляризационно-бистабильные лазеры [13].

Спектр люминесценции одноосно деформированных полупроводников может быть разделен на две области: длинноволновую, в которой излучение обусловлено переходами электронов только в высшую валентную подзону, и коротковолновую, в которой излучение вызывается переходами в обе подзоны. Если линия генерации расположена на длинноволновом краю спектра усиления, где  $g_{TM}/g_{TE} > \alpha_{TM}/\alpha_{TE}$  (здесь  $g$  - усиление,  $\alpha$  - потери), то одноосное сжатие будет приводить к ТМ поляризации стимулированного излучения. На коротковолновом краю спектра усиления, где  $g_{TM}/g_{TE} <$

$\alpha_{TM}/\alpha_{TE}$ , генерируемое излучение будет TE поляризованным. В окрестности спектральной точки, где  $g_{TM}/g_{TE} = \alpha_{TM}/\alpha_{TE}$ , возможно излучение мод обеих поляризаций. Наиболее интересным представляется исследование поляризационных аномалий в лазерах с распределенной обратной связью, поскольку резонаторы РОС-лазеров обладают существенно меньшей поляризационной селективностью по сравнению с обычными резонаторами Фабри-Перо, следовательно, поляризационные аномалии в РОС-лазерах должны происходить при существенно меньших внутренних напряжениях. Еще одним важным преимуществом РОС-лазеров является возможность управления длиной волны генерируемого ими излучения, что позволяет разместить линию генерации РОС-лазера в любой части спектра усиления активной области. Таким образом, соответствующий выбор толщины активного слоя, его состава и шага дифракционной решетки РОС-лазера позволяет создать условия как для переключения мод с различной поляризацией, так и для их бистабильного поведения.

§6.2 посвящен рассмотрению системы скоростных уравнений для лазера, генерирующего две оптические моды различных поляризаций. К сожалению, такая система уравнений, в отличие от рассмотренной в §1.4, не поддается аналитическому решению. Поэтому для получения аналитического выражения для времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера к системе скоростных уравнений был применен метод Ляпунова анализа устойчивости решений систем дифференциальных уравнений [14]. Согласно Ляпунову, состояние системы (не)устойчиво, если малое отклонение от этого состояния в момент времени  $t = 0$  остается малым (увеличивается) за время  $0 < t < \infty$ . Так как рассматриваемое отклонение мало, система дифференциальных уравнений может быть линеаризована. Зависимость малого отклонения от положения равновесия от времени может быть записана следующим образом:

$$\delta(t) = \sum_i A_i V_i e^{P_i t} \quad (5)$$

где  $P_i$  - собственные значения, а  $V_i$  - собственные вектора линеаризованной системы. Очевидно, что положение равновесия системы (не)устойчиво, если вещественные части всех (одного или более) собственных значений  $P_i$  отрицательны (положительны). Важно отметить, что, согласно (5), собственные значения  $P_i$  представляют собой обратное характеристическое время перехода системы из одного положения равновесия в другое и, таким образом, могут быть названы коэффициентами устойчивости системы.

Основной интерес для исследования представляют «тривиальные» решения: ТМ-поляризованное излучение и ТЕ-поляризованное излучение при отсутствии излучения другой поляризации. Возможны три комбинации коэффициентов устойчивости  $P_{TE/TM}$ : оба коэффициента положительны - «тривиальные» решения неустойчивы т.е. ТЕ и ТМ моды сосуществуют, оба отрицательны - состояние бистабильности и, последнее, коэффициенты устойчивости имеют разные знаки - при этом лазер генерирует излучение той поляризации, для которой собственное значение отрицательно.

В §6.3 анализируется характер и скорость изменения поляризации выходного излучения лазера при варьировании тока накачки. Результаты аналитических вычислений сравнивались с решениями системы скоростных уравнений методом итераций. Сравнение показало хорошее согласование результатов численного моделирования с полученными из аналитических выражений.

Когда один из коэффициентов устойчивости отрицателен, а другой - положителен, время смены (переключения) поляризации выходного излучения лазера, вызванного изменением тока накачки, определяется как величина, обратная коэффициенту устойчивости системы, вычисленному при «новом» значении тока накачки. Иными словами, в рассматриваемом случае переключение поляризации происходит за время, обратное тому собственному значению (коэффициенту устойчивости) системы, которое положительно при «новом» токе накачки. Результаты проведенного анализа выражений для коэффициентов устойчивости показывают, что при постоянном токе переключения поляризации время переключения зависит только от величины коэффициентов нелинейного усиления  $\varepsilon_j$  и не зависит от линейных параметров лазерного диода.

Теперь рассмотрим случаи, когда коэффициенты устойчивости имеют один знак. В случае, когда оба собственные значения положительны, «тривиальные» состояния неустойчивы, и моды обеих поляризаций сосуществуют. При плавном изменении тока накачки лазерного диода в этой области, наблюдается плавное изменение поляризации выходного излучения лазера (степень поляризации линейно зависит от тока накачки).

В области параметров лазерного диода, где оба коэффициента устойчивости отрицательны, наблюдается некоторое противоречие: оба «тривиальные» состояния устойчивы, хотя существование одного исключает существование другого (см. выше). Это область бистабильности. Здесь поляризация выходного излучения лазера определяется тем, в каком состоянии была система до входа в рассматриваемую область. Так, при плавном изменении тока накачки лазерного диода в некоторой области, где оба

коэффициента устойчивости отрицательны, существует два значения тока накачки, при которых происходит переключение поляризации выходного излучения лазера, причем переключение наблюдается при «выходе» лазера из состояния бистабильности. Ватт-амперная характеристика лазера в рассматриваемой области имеет гистерезис, «ширину» которого можно легко определить из выражений для коэффициентов устойчивости.

В §6.4 рассмотрена возможность «двойной» модуляции (током накачки и коэффициентом оптического ограничения) полупроводникового лазера для прямого управления поляризацией лазерного излучения. Последнее особенно важно для волоконно-оптических линий связи, где из-за местных сжатий и изгибов оптического волокна случайным образом возникает поляризационная чувствительность линии. Для подавления этого эффекта необходимо применять дорогостоящие приборы («скрамблеры»), преобразующие линейно поляризованный оптический сигнал в поляризованный по кругу.

Идея двойной модуляции заключается в следующем. Как было отмечено выше, в ватт-амперной характеристике лазера с переключением поляризации выходного излучения существует область, где степень поляризации и выходная мощность линейно зависят от тока накачки. Расположение этой области переключения поляризации на ватт-амперной характеристике зависит от многих параметров лазерного диода, в том числе и от коэффициента оптического ограничения. Таким образом, возможно модуляцией коэффициента оптического ограничения плавно изменять степень поляризации, а током накачки поддерживать постоянной мощность выходного излучения.

Модуляция коэффициента оптического ограничения осуществляется приложением напряжения на боковые контакты лазерного диода, нанесенные с обеих сторон полоска, как было предложено Гуревичем, Симиным и Шаталовым [15]. Положительное напряжение между боковыми контактами и подложкой «вытягивает» электроны из-под полоскового контакта, уменьшая тем самым коэффициент оптического ограничения, в то время как отрицательное напряжение увеличивает концентрацию носителей заряда в накачиваемой области, увеличивая коэффициент оптического ограничения.

Анализ режима «двойной» модуляции проводился по методике, описанной в §6.3. Вычисления показали наличие возможности прямого управления поляризацией лазерного излучения при практически постоянной выходной мощности, т.н. «скрамблирования».

## Заключение

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Предложена и проанализирована конструкция полупроводникового лазера с дифракционным выводом излучения и распределенным брегговским отражателем со стороны подложки. Показано, что предложенная конструкция позволяет существенно повысить эффективность лазера и обеспечивает генерацию одночастотного излучения высокой мощности с расходимостью, определяемой дифракционным пределом.
2. Предложена конструкция лазеров с распределенной обратной связью и распределенным брегговским зеркалом с искривленными штрихами решетки и клиновидным полоском. Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование лазеров предложенной конструкции. Показано, что цилиндрическая симметрия резонатора обеспечивает фокусировку всех мод выходного излучения полупроводникового лазера с распределенным брегговским зеркалом или распределенной обратной связью в общий фокус в плоскости p-n перехода.
3. Выявлены параметры, влияющие на размер фокусного пятна лазеров с искривленной решеткой обратной связи. Установлено, что размер фокусного пятна определяется числовой апертурой лазера, преломлением излучения на плоском выходном зеркале и шириной спектральной линии выходного излучения. Теоретически и экспериментально показано, что ширина спектральной линии лазера с искривленной решеткой обратной связи во многих случаях является ключевым фактором, определяющим размер фокусного пятна.
4. Показано, что при наличии отражения от плоских выходных граней лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи, его фаза плавно меняется по ширине выходного зеркала, вследствие чего могут возникать неоднородности в распределении интенсивности лазерного излучения. Предложена усовершенствованная конструкция лазера с искривленными штрихами решетки обратной связи, в которой исключается негативное влияние фазовых эффектов.
5. Обнаружено, что характеристики полупроводниковых лазеров с активной областью на основе квантовых точек, генерирующих излучение двух квантовых состояний, во многом определяются перераспределением энергии между квантовыми состояниями, что может вызывать полное прекращение лазерной генерации на время до 10-15 нс и более через 2-5 нс после первоначального включения при накачке импульсами тока

длительностью 30 нс, причем задержка возобновления лазерной генерации увеличивается с увеличением тока накачки.

6. Показано, что полупроводниковые лазеры с активной областью на основе квантовых ям, генерирующие излучение, соответствующее переходам между несколькими квантовыми уровнями, при накачке импульсами тока длительностью 150 нс демонстрируют спад ватт-амперной характеристики, не связанный с перегревом активной области. Показано, что спад мощности излучения при увеличении тока накачки связан с перераспределением энергии между квантовыми уровнями и проявляется в полном прекращении лазерной генерации на время до 100 нс и более через 15-30 нс после первоначального включения, причем задержка возобновления лазерной генерации увеличивается с увеличением тока накачки. Именно этим фактором, а не перегревом активной области, обусловлено ограничение выходной мощности таких лазеров при накачке короткими импульсами тока.
7. Продемонстрирована возможность модуляции добротности в полупроводниковых лазерах с активной областью на основе квантовых точек, генерирующих излучение двух квантовых состояний, за счет перераспределения энергии между квантовыми состояниями, что вызывает эффект, сходный с действием насыщающегося поглотителя, и выражается в генерации импульсов излучения возбужденного состояния длительностью 100-300 пс с периодом 0.5-1 нс, следующих за короткими провалами сходной длительности в излучении основного состояния (т.н. «темными импульсами»).
8. Продемонстрирована возможность обострения оптического сигнала вертикально-излучающих лазеров с вертикальным резонатором с оксидной апертурой с активной областью на основе квантовых точек в 200-500 раз и более по отношению к сигналу импульсной электрической накачки и получение импульсов длительностью 60-80 пс и менее при накачке 10-100 нс импульсами с периодом 1-10 мкс за счет совместного действия насыщения усиления при высоком уровне накачки и насыщающегося поглощения на краях оксидной апертуры.
9. Получено экспериментальное подтверждение теории об обусловленной насыщением усиления нелинейной зависимости квадрата частоты релаксационных колебаний от выходной мощности полупроводниковых лазеров. Теоретически предсказана и экспериментально обнаружена область малых мощностей выходного излучения лазеров с насыщающимся поглотителем, свободная от релаксационных колебаний,

что объясняется изменением наклона ватт-амперной характеристики лазерных диодов вблизи порога генерации при введении области насыщающегося поглотителя.

10. Теоретически исследована зависимость поляризации излучения полупроводникового лазера с напряженным активным слоем от его параметров, в результате чего найдена зависимость тока переключения поляризации излучения от параметров лазера, что позволяет заранее предсказать возможность переключения мод различных поляризаций или их бистабильности при изменении тока накачки, а также получена зависимость времени переключения поляризации лазерного излучения при изменении тока накачки от параметров лазера, что позволяет оптимизировать лазерную структуру для получения быстрого (порядка десятков пикосекунд) переключения поляризации лазерного излучения.
11. Предложен способ плавной перестройки поляризации излучения полупроводникового лазера при постоянной мощности излучения путем «двойной» модуляции (током накачки и изменением фактора ограничения), что позволит исключить влияние случайно возникающей поляризационной селективности оптического волокна на стабильность работы волоконно-оптических линий связи.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- A1. А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, Г.С.Соколовский, Релаксационные колебания в InGaAsP/InP ( $\lambda=1.55$  мкм) гетеролазерах с насыщающимся поглотителем // Письма в ЖТФ, **22**(4), 44-49 (1996).
- A2. Г.С.Соколовский, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, К вопросу о времени переключения поляризации излучения полупроводникового лазера // Письма в ЖТФ, **23**(9), 87-95 (1997).
- A3. М.А.Калитеевский, Е.Л.Портной, Г.С.Соколовский, Фазовые эффекты в полупроводниковом лазере с дифракционным выводом излучения // Письма в ЖТФ, **23**(18), 7-11 (1997).
- A4. Г.С.Соколовский, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, Модуляция поляризации излучения полупроводникового лазера при постоянной выходной мощности // Письма в ЖТФ, **24**(16), 84-90 (1998).

- A5. G.S.Sokolovskii, E.U.Rafailov, D.J.L.Birkin, W.Sibbett, High-power laser structures incorporating novel curved-gratings // *Journal of Optical and Quant. El.*, **31**(3), 215-221 (1999).
- A6. G.S.Sokolovskii, E.U.Rafailov, D.J.L.Birkin, W.Sibbett, Novel high-power laser structures incorporating curved-gratings // *IEEE Journal of Quant. El.*, **36**(12), 1412-1420, (2000).
- A7. D.A.Yanson, E.U.Rafailov, G.S.Sokolovskii, V.I.Kuchinskii, A.C.Bryce, J.H.Marsh, W.Sibbett, Self-focused distributed Bragg reflector QW laser diodes // *Proc. SPIE*, **5023**, 387-390 (2002).
- A8. Y.Boucher, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, G.S.Sokolovskii, Near-threshold spectral and modal characteristics of a curved-grating quantum-well distributed-feedback laser (c-DFB) // *Proc. SPIE*, **5023**, 361-364 (2002).
- A9. Y.Boucher, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii, G.S.Sokolovskii, Near-threshold spectral and modal characteristics of a curved-grating quantum-well distributed-feedback laser (c-DFB) // *Nanotechnology*, **14**(6), 615-618 (2003).
- A10. E.U.Rafailov, P.Loza-Alvarez, W.Sibbett, G.S.Sokolovskii, D.A.Livshits, A.E.Zhukov, V.M.Ustinov, Amplification of femtosecond pulses over by 18dB in a quantum-dot semiconductor optical amplifier // *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **15**(8), 1023-1025 (2003).
- A11. D.A.Yanson, E.U.Rafailov, G.S.Sokolovskii, V.I.Kuchinskii, A.C.Bryce, J.H.Marsh, W.Sibbett, Self-focussed distributed Bragg reflector laser diodes // *J. of Appl. Phys.*, **95**(3), 1502-1509 (2004).
- A12. Y.G.Boucher, A.G.Deryagin, V.I.Kuchinskii and G.S.Sokolovskii, Threshold crossing and spectral properties of a curved-grating distributed Bragg reflector quantum-well laser (c-DBR) // *Semicond. Sci. Technol.* **19**, 1010–1014 (2004).
- A13. 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 // *Trends in Optics and Photonics*, **98**, 282-287 (2005).
- A14. 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*, **31**(19), 28-34 (2005).

- A15. Г.С.Соколовский, М.А.Каталуна, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, И.И.Новиков, М.В.Максимов, А.Е.Жуков, В.М.Устинов, В.Сиббет, Э.У.Рафаилов, Аномальные динамические характеристики полупроводниковых лазеров на квантовых точках, генерирующих излучение двух квантовых состояний // письма в ЖТФ, **33**(1), 9-16 (2007).
- A16. В.В.Дюделев, Г.С.Соколовский, С.Н.Лосев, А.Г.Дерягин, В.И.Кучинский, С.А.Никишин, М.Холтц, Э.У.Рафаилов, В.Сиббет, Фазовые эффекты в широкополосковых гетеролазерах с искривлёнными штрихами решетки обратной связи // Письма в ЖТФ, **33**(7), 43-49 (2007).
- A17. Г.С.Соколовский, Д.А.Винокуров, А.Г.Дерягин, В.В.Дюделев, В.И.Кучинский, С.Н.Лосев, А.В.Лютецкий, Н.А.Пихтин, С.О.Слипченко, З.Н.Соколова, И.С.Тарасов, Переключение генерации излучения двух квантовых состояний в полупроводниковых лазерах на квантовых ямах // Письма в ЖТФ, **34**(16), 58-64 (2008).

#### **Цитированная литература:**

- [1] Ж.И.Алферов, В.М.Андреев, Р.Ф.Казаринов, Е.Л.Портной, Р.А.Сулис, Полупроводниковый оптический квантовый генератор // Авторское свидетельство №392875 от 19.07.1971 г.
- [2] Р.Ф.Казаринов, Р.А.Сулис, Инжекционный гетеролазер с дифракционной решёткой на контактной поверхности // ФТП, **6**(7), 1359-1365 (1972).
- [3] H.Kogelnik, C.V.Shank, Coupled-wave theory of distributed feedback lasers // J. of Appl. Phys., **43**(5), 2327-2335 (1972).
- [4] W.Streifer, D.R.Scifres, R.D.Burham, Longitudinal modes in distributed feedback lasers with external reflectors // J. of Appl. Phys, **46**(1), 247-249 (1975).
- [5] S.Wang, Principles of Distributed Feedback and Distributed Bragg-Reflector Lasers // IEEE J. of Quant. El., **10**(4), 413-427 (1974).
- [6] R.Shubert, Theory of optical-waveguide distributed laser with nonuniform gain and coupling // J. of Appl. Phys., **45**(1), 209-215 (1974).
- [7] С.А.Гуревич, С.Ю.Карпов, Е.Л.Портной, Фазовые особенности отражения света брегговским зеркалом, обусловленные скачком диэлектрической проницаемости на его границе // Письма в ЖТФ, **11**(16), 989-993 (1985).

- [8] H.Hous, C.Shank, Antisymmetric taper of distributed feedback lasers // IEEE J. of Quant. El., **12**(9), 532-539 (1976).
- [9] С.Ю.Карпов, С.Н.Столяров, Распространение и преобразование волн в средах с одномерной периодичностью // УФН, **163**(1), 63-89 (1993).
- [10] G.P.Agrawal, N.K.Dutta, Semiconductor lasers, Second Edition, p.334 (New York, "Van Nostrand Reinhold" 1993).
- [11] С.А.Гуревич, Е.Л.Портной, М.Э.Райх, Поглощение света в пленочных волноводах GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As и его влияние на пороговые характеристики гетеролазеров с брэгговскими зеркалами // ФТП, **12**(6), 1160-1169 (1978).
- [12] Д.Ахмедов, Н.П.Бежан, Н.А.Берт, С.Г.Конников, В.И.Кучинский, В.А.Мишурный, Е.Л.Портной, Влияние внутренних деформаций на поляризацию излучения в гетеролазерных структурах InP-InGaAsP // Письма в ЖТФ, **6**(12), 705-708 (1980).
- [13] A.G.Deryagin, D.V.Kuksenkov, V.I.Kuchinskii, E.L.Portnoi, V.B.Smirnitskii, Wavelength and polarization switching in InGaAsP/InP DFB lasers // IEE Proc. Optoe., **142**(1), 51-54 (1995).
- [14] А.М.Ляпунов, Общая задача об устойчивости движения, с.365 (Москва, «Гостехиздат» 1950).
- [15] S.A.Gurevich, G.S.Simin, M.S.Shatalov, High frequency confinement factor modulation of diode lasers // Int. J. High Speed Electr. and Systems, **8**(7), 547-574 (1997).