

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ им. А.М. ПРОХОРОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Светиков Владимир Васильевич

СЕЛЕКЦИЯ МОД И УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ
МЕТОДАМИ ПЛАНАРНОЙ ВОЛНОВОДНОЙ ОПТИКИ

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Центре естественно-научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ЦЕНИ ИОФ РАН)

Научный руководитель: Пустовой Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, зав. отделом лазерной физики ИОФ РАН

Официальные оппоненты:

Казарян Мишик Айразатович, доктор физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, профессор, ФБГУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Бутов Олег Владиславович, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией волоконно-оптических технологий, ФБГУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Защита состоится 03 декабря 2018 г. в 15:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.063.03 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991, Москва, ул. Вавилова, 38, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Автореферат разослан « » октября 2018 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 002.063.03
канд. физ.-мат. наук

 Т.Б. Воляк

тел.

+7(499)503-8147

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Полупроводниковые лазеры благодаря своему высокому КПД, малым размерам и высокой технологичности изготовления получили наибольшее распространение среди источников когерентного излучения. Применяются полупроводниковые лазеры в таких отраслях как наука, обработка материалов, биомедицинские применения, навигация, телекоммуникация, охрана, а также во многих смежных отраслях. Современными требованиями, предъявляемыми к полупроводниковым лазерам, являются высокая яркость излучения, узость спектра (высокая когерентность), перестройка длины волны, а в ряде приложений – перестройка в соответствии с заданной сеткой частот.

Проблемой мощных полупроводниковых лазеров является возникновение множества поперечных мод. Это приводит не только к уширению спектра генерации, но и к ухудшению качества пучка из-за увеличения расходимости и невозможности фокусировки в малое пятно. Уменьшение числа активных поперечных мод и формирование супермоды затрудняется возникновением нитевидной структуры оптического потока внутри лазерного диода (ЛД) – т.н. филаментацией активной области лазерной структуры [1-5]. Эта проблема усугубляется динамикой интенсивности филаментов, а именно непрерывным перемещением максимумов интенсивности из одного филаментного канала в другой, что приводит к искажению волнового фронта пучка излучения.

В реальном лазерном диоде филаменты имеют слабую фазовую синхронизацию между собой, в результате чего они выступают практически независимыми источниками излучения. Это приводит к сильному угловому уширению пучка вдоль медленной оси и возникновению локализованных максимумов в дальнем поле. В совокупности указанные явления в широкополосковых ЛД приводят к довольно широкому спектру поперечных мод (вдоль медленной оси) лазерного диода, увеличивающемуся с ростом тока накачки. Следствием этого является сильное снижение качества пучка, что проявляется в существенном уменьшении его яркости.

Наряду с мощными лазерами широкое распространение получили мало-мощные одномодовые (вдоль медленной оси) лазеры, используемые в сетях

высокоскоростной передачи данных. Для этих приложений требуются высоко когерентные источники лазерного излучения. В настоящее время такими источниками являются массивы моночастотных излучателей [6-7]. Однако из-за габаритов затруднительно их использование в межчиповых и во внутрочиповых оптических соединениях. В связи с этим актуально создание моночипового источника многочастотного лазерного излучения, интегрированного со структурами, выполненными по микроэлектронным КМОП технологиям.

Цель и задачи работы

Целями работы являются разработка новых методов селекции поперечных мод и управления спектром излучения мощных широкоапертурных и низкоомощных одномодовых полупроводниковых лазеров, в основе которых лежат принципы планарной волноводной оптики.

В работе решены следующие задачи: сужение и стабилизация спектра излучения, управление спектром излучения и селекция поперечных мод (вдоль медленной оси) в широкополосковых, широкоапертурных секционированных и узкополосковых лазерных диодах.

Научная новизна работы

Определены режимы селекции поперечных мод в условиях резонансного взаимодействия спектрально неселективного пучка обратной связи с филаментной структурой широкополоскового лазера и с фиксированными каналами усиления секционированного лазера. Определены параметры генерации лазера с волноводным элементом, осуществляющим спектральную селекцию и фазовое согласование соседних областей выходного торца лазерного диода.

Представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты получены при исследовании лазерной генерации в новых геометриях внешнего резонатора и новых режимах работы планарных широкоапертурных и узкополосковых полупроводниковых лазеров. В частности:

1. показана наибольшая эффективность селекции поперечных мод широкополоскового лазерного диода в асимметричном V-резонаторе в режиме возбуждения бездифракционно распространяющегося пучка в филаментной структуре полупроводникового лазера;
2. построен лазер на основе полупроводникового широкополоскового ЛД и внешнего резонатора на основе числовой планарной голограммы, создающей на торце ЛД заданное амплитудно-фазовое распределение пучка ОС, реализована узкоспектральная генерация в режиме селекции основной моды и моды высокого порядка;
3. определены параметры лазерной генерации широкополоскового ЛД в резонаторе с планарной волноводной брэгговской решёткой, показана возможность лазерной генерации на истекающей моде планарного волновода, показана преимущественная генерация на моде высокого порядка с полупериодом, равным периоду расположения филаментов;
4. для широкополоскового полупроводникового лазера с волноводно-решёточным зеркалом (ВРЗ) обратной связи определены параметры лазерного излучения для случаев коллинеарного и неколлинеарного падения излучения на ВРЗ для ТМ и ТЕ поляризаций;
5. определены параметры лазерной генерации широкоапертурного (500 мкм) секционированного лазерного диода во внешнем резонаторе в условиях резонансного взаимодействия пучка ОС с фиксированной секционированной структурой ЛД для случаев спектрально-селективного и неселективного пучка ОС;
6. разработан и определены параметры излучения лазерного источника на основе поперечно одномодового полупроводникового лазера ($\lambda=1.55$ мкм) и внешнего планарного волноводного эшелона Майкельсона, изготовленного из SiON-волноводов низкой контрастности, получена лазерная генерация в режиме одного и двух интерференционных порядков эшелона Майкельсона.

Научная и практическая значимость работы

Результаты данной работы расширяют представление о роли параметров пучка обратной связи (ОС) в селекции поперечных мод широкополосковых и

широкоапертурных секционированных ЛД. Предложены новые конструкции резонаторов полупроводниковых лазеров на основе спектрально-фазовых планарных волноводных отражателей без внутрирезонаторного преобразования волноводной моды ЛД в объёмную. Определены оптимальные режимы резонансного взаимодействия пучка ОС с периодической филаментной структурой ЛД и с фиксированной периодической структурой одномодовых излучателей секционированного лазера. Исследованные приёмы улучшения качества пучка мощных лазеров представляют практический интерес при проектировании перспективных конструкций резонаторов полупроводниковых лазеров высокой яркости, в том числе при проектировании новых конструкций монолитных полупроводниковых лазеров с интегрированной в структуру цепью обратной связи на основе цифровых планарных голограмм. Результаты исследований многочастотного лазера имеет практическую область использования в технологиях высокоскоростного оптического интерконнекта, в том числе для систем оптического интерконнекта межчиповой локализации и оптической коммуникации внутри КМОП-чипов сверхвысокой интеграции.

Методы и объекты исследований

Для решения перечисленных задач лазерные диоды размещались во внешних резонаторах. В частности, в работе использовались следующие приёмы и конструкции внешних резонаторов, а также проведены следующие исследования:

- 1) режимы селекции поперечных мод широкополоскового ЛД в резонаторе с фазово- и спектрально-неселективным зеркалом обратной связи в резонаторе V-типа определялись в зависимости от углового разворота зеркала ОС относительно оси ЛД;
- 2) спектральные и пространственные характеристики лазерного излучения в резонаторе со спектральной фильтрацией пучка обратной связи и его пространственным расширением исследовались в резонаторе с ВРЗ. Исследовались случаи ТМ- и ТЕ-поляризации света, падающего на ВРЗ, а также варианты коллинеарного и неколлинеарного взаимодействия света с ВРЗ.

- Параметры перестройки генерируемого лазерного излучения определялись при изменении угла разворота плоскости ВРЗ относительно падающего света;
- 3) параметры лазерной генерации в условиях резонансного взаимодействия пучка ОС с фиксированной структурой близко расположенных излучателей исследовались в V-резонаторе с секционированным ЛД. Исследовались асимметричный резонатор с одним зеркалом ОС и симметричный резонатор с двумя зеркалами ОС. Спектральная селекция пучка ОС осуществлялась дифракционной решётки в геометрии Литтмана–Меткалфа;
 - 4) параметры лазерной генерации в условиях спектрально-селективной ОС, формирующей на торце ЛД основную моду или моду высокого порядка, определялись в резонаторе с волноводной числовой планарной голограммой, ввод света в которую осуществлялся без фокусирующих элементов;
 - 5) параметры лазерной генерации в условиях создания спектрально-фильтрованной, но фазово-неселективной ОС исследовались в резонаторе с волноводным планарным брэгговским зеркалом;
 - 6) резонатор для мультисоставной генерации формировался на основе волноводного аналога эшелона Майкельсона.

Положения, выносимые на защиту

1. За счёт резонансного согласования филаментной структуры лазерного диода и пучка обратной связи в резонаторе без спектрально- и пространственно-селективных элементов селекция поперечной моды возможна только для низких уровней усиления для углов наклона зеркала обратной связи в 1.5–2 раза меньших брэгговского для филаментной структуры ЛД.
2. Формирование поперечной моды в широкополосковом полупроводниковом лазере во внешнем резонаторе происходит в результате конкуренции двух процессов: филаментирования активной области лазерного диода и амплитудно-фазового распределения пучка обратной связи.
3. Комбинация спектральной селекции и амплитудно-фазового согласования излучающих областей лазерного диода позволяет существенно уменьшить спектр поперечных мод и спектральную ширину лазерного излучения.

4. В резонаторе широкополоскового лазера с планарной брэгговской структурой увеличивается добротность поперечной моды высокого порядка с фазовым периодом, равным удвоенному периоду расположения филаментов на выходном торце лазерного диода.
5. Лазерная генерация секционированного лазерного диода в асимметричном резонаторе имеет дискретный характер в зависимости от угла возврата пучка обратной связи.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в ходе работы над диссертацией, подтверждается отсутствием противоречий с результатами, полученными в ведущих российских и зарубежных научных центрах.

Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на международных и Российских научных конференциях: ECONO/LAT 2016, Minsk; 15th International Conference "Laser Optics 2012", St. Petersburg, Russia, June 25-29; High-Power Diode Laser Technology and Applications IX, San Francisco, California, USA, January 22, 2011; CLEO: Science and Innovations 2011, Baltimore, Maryland United States, 1–6 May 2011, ISBN: 978-1-55752-910-7; 18th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'10), 2010; Международный форум по нанотехнологиям, Москва, 1-3 ноября, 2010; 17th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'09); ALT'05, (13th International Conference on Advanced Laser Technologies); Труды XLVIII научной конференции МФТИ, часть V, Москва, Долгопрудный, 2005; «European Conference on Integrated Optics and Technical Exhibition (ECIO)» 2001.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, пяти глав с изложением диссертационного материала, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 119 страниц, 80 рисунков и 3 таблицы.

Личный вклад автора

В диссертации изложены результаты работ, выполненные автором в течение 12 лет лично и в соавторстве. Во всех случаях автор диссертации принимал непосредственное участие в выборе направления исследований, постановке задачи, в проведении измерений, обработке, анализе и обсуждении результатов. Все вошедшие в диссертацию научные результаты получены автором лично или при его непосредственном участии.

Краткое содержание работы

Во введении представлена общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, определяется цель работы, новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен литературный обзор, в рамках которого проводится описание и анализ литературных источников, посвящённых методам селекции поперечных мод в широкоапертурных полупроводниковых лазерных диодах, управлению спектром генерации мощных и низкоомных одномодовых полупроводниковых лазеров.

Во второй главе представлены результаты исследований лазерной генерации широкополоскового лазерного диода при обратной связи, резонансной филаментной структуре активной области лазерного диода. Целью исследований было определение возможности и пограничных условий осуществления селекции поперечной моды в филаментируемом широкополосковом лазерном диоде в условиях спектрально-неселективной обратной связи. Исследования проводились при размещении ЛД в асимметричном V-резонаторе (рис.1).

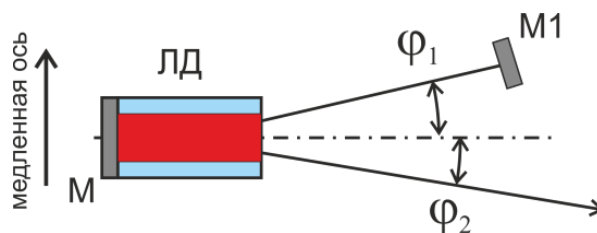


Рис.1 Внешний асимметричный V-резонатор (М-зеркало, М1-зеркало ОС, ЛД-лазерный диод, φ_1 -угол пучка ОС, φ_2 - угол выхода лазерного пучка).

В первом параграфе главы представлены результаты исследований лазерной генерации чипа без внешнего резонатора. Для этого использовался коммерческий ЛД без глубокого просветления выходного торца. Измерялся

спектр, угловое распределение в дальней зоне и распределение интенсивности свечения выходного торца ЛД. Методом аппроксимации гауссовыми функциями распределения интенсивности светимости торца ЛД было получено распределение филаментов вдоль торца ЛД, показавшее период их расположения в интервале 7–1 мкм.

Во втором параграфе главы представлены результаты исследования генерации лазерного диода во внешнем асимметричном V-резонаторе. В исследованиях использовался ЛД с глубоким просветлением выходного торца. Были определены углы разворота зеркала ОС, при которых наблюдалась лазерная генерация, измерены спектральные параметры ге-

нерации, измерены распределения интенсивности пучков в дальней зоне. Исследования показали дискретную зависимость лазерной генерации от угла разворота ЗОС (рис.2). При углах разворота ЗОС более $\theta=0.2^\circ$ генерация становится двухпучковой, с пучками сильно неравной интенсивности (рис.3а).

Двухлучевая генерация сохранялась до углов, меньших 2.5° . При угле $\theta=2.8^\circ$ наряду с двух пучковой генерацией возникает излучение в направлении оси ЛД. Спектр генерации в этом случае оставался узким, с шириной на полувысоте более чем в 3 раза меньшей ширины спектра ЛД без внешнего резонатора.

В экспериментах было получено, что селекция поперечной моды наблюдается до токов накачки, не превышающих двойной пороговый. При этом достигается 4-кратное сужение расходимости и 6-кратное сужение спектра генерации. Наиболее выраженный эффект селекции поперечной моды в ЛД

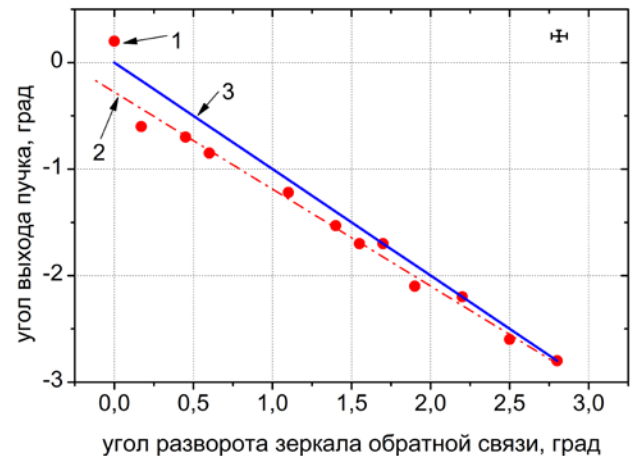


Рис.2 Зависимость угла выхода лазерного излучения от угла наклона ЗОС (1 – положения лазерной генерации, 2 – линейная аппроксимация положения углов лазерной генерации, 3 – прямая равенства углов наклона зеркала ОС и углов выходного пучка).

наблюдался при расположении зеркала ОС под углами примерно в 1.5–2 раза меньших брэгговских для измеренных периодов расположения филаментов. Это соответствует поперечному распределению поля бездифракционно распространяющегося пучка. При угле наклона зеркала ОС, равным брэгговскому для филаментной структуры, наблюдалась трёхпучковая картина интенсивности в дальней зоне.

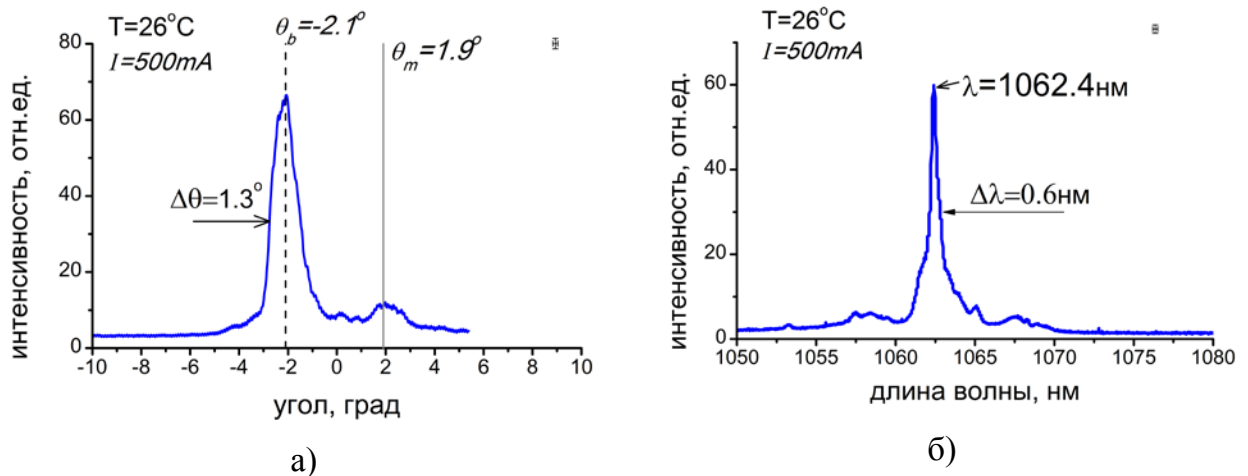


Рис.3 (а) Характерное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне для углов наклона ЗОС $\theta = 1.1\text{--}2.5^\circ$ (θ_m -угол наклона зеркала ОС, θ_b - угол выхода лазерного пучка); (б) пример спектра генерации.

В третьей главе представлены результаты исследований резонансного взаимодействия пучка обратной связи с периодически расположенными каналами усиления ЛД. Периодически расположенные усилительные каналы ЛД можно рассматривать в качестве «толстой» голографической решётки. При угловом вводе света в такую структуру проявляется резонансное взаимодействие пучка с периодически расположенными каналами. Для оценки спектральной селективности секционированной структуры были использованы выводы теории связанных волн Г. Когельника [8]. В рамках этой теории для угла скольжения $\Phi = \pi/2$ и при условии отсутствия потерь были определены характер дифракции и её зависимость от толщины решётки и её контрастности. Была проведена оценка спектральной селективности структуры, определено воздействие расходимости пучка обратной связи на спектральную селективность периодической структуры ЛД.

В экспериментальной части главы представлены исследования параметров генерации в резонаторе Фабри–Перо и в двухплечевых резонаторах симметричного и асимметричного типов. Были исследованы режимы генерации в зависимости от направления пучка обратной связи, приведены спектры и распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне для лазерного диода в симметричном и асимметричном резонаторах. Также продемонстрировано применение геометрии Литтмана–Меткалфа [9] в V-резонаторе для перестройки длины волны излучения. В экспериментах был использован широкоапертурный секционированный лазерный диод с периодом секций 8 мкм, шириной апертуры 500 мкм и длиной волны излучения 980 нм. На выходной торец ЛД было нанесено антиотражающее покрытие.

В экспериментах было найдено, что лазерная генерация происходит при дискретном наборе углов разворота зеркала обратной связи (рис.4а), при этом обнаружена сильно выраженная асимметрия углов выходного пучка и угла разворота зеркала ОС. Для ряда углов разворота наблюдалась двух- и трёхпучковая генерация (рис.4а). Измерение интенсивности пучков в зависимости от угла разворота зеркала ОС показало непостоянство выходной мощности излучения от угла разворота (рис.4б). Максимальная выходная мощность соответствовала случаю с тремя выходными пучками.

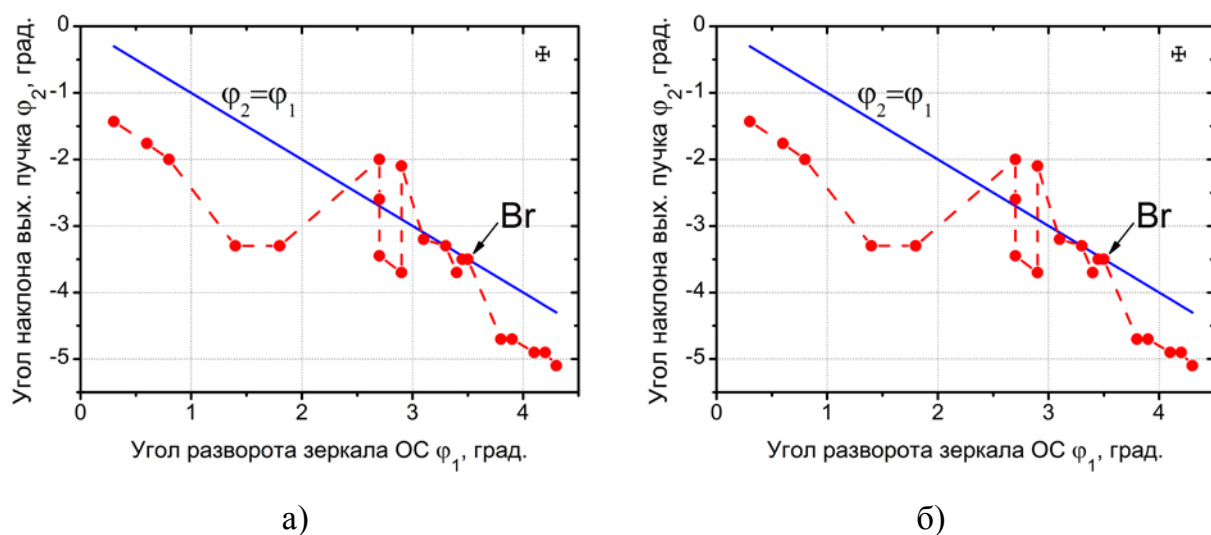


Рис.4 Зависимость параметров лазерных пучков от угла разворота зеркала ОС: а) зависимость угла выхода лазерного излучения φ_2 от угла направления луча обратной связи (угла разворота зеркала ОС) φ_1 (точками обозначены экспериментальные результаты, сплошная линия – зависимость $\varphi_2 = \varphi_1$), б) зависимость интенсивности выходных пучков от угла разворота зеркала ОС φ_1 .

Лазерный пучок с наименьшей расходимостью был получен при угле разворота примерно 4.2° , сам выходной пучок выходил под углом 4.8° (рис.5). Для этого режима генерации угловая ширина пучка при токе $I=2.7\text{ А}$ была равна $\Delta\theta_{1/2} = 0.3^\circ$, при токе $I=3.5\text{ А}$ $\Delta\theta_{1/2} = 0.44^\circ$.

В третьей части главы представлены результаты исследования генерации в симметричном V-резонаторе при расположении зеркал под углом Брэгга по отношению к секционированной структуре ЛД. В этой геометрии резонатора генерация характеризуется

симметричным расположением двух пиков интенсивности с угловым расстоянием в 6.8° . Угловая ширина пиков интенсивности на полувысоте незначительно увеличивалась с ростом тока накачки и при максимальном токе была равна $\Delta\theta_{1/2} = 0.8\text{--}0.9^\circ$, что свидетельствует об эффективной селекции

поперечных мод, при которой количество генерируемых мод стабилизируется в широком диапазоне рабочих токов.

Исследование генерации в условиях создания спектрально-селективной ОС проводилось с использованием дифракционной решётки в одном из плеч асимметричного резонатора, включенной по схеме Литтмана–Меткалфа. В экспериментах использовалась дифракционная решётка с плотностью штрихов $N = 1200\text{ штр/мм}$, расположенная неподвижно по отношению к ЛД. Перестройка длины волны осуществлялась внешним зеркалом. Была получена генерация с непрерывной перестройкой длины волны в пределах 8 нм со спектральной шириной линии излучения не более 0.3 нм при управляющем токе $I = 1.5\text{ А}$ и менее 1 нм при токе $I = 3.5\text{ А}$.

Четвёртая глава посвящена исследованию генерации широкополоскового лазерного диода в резонаторе с волноводно-решеточным зеркалом обратной связи (рис.6), выполняющим функции спектрального селектора и про-

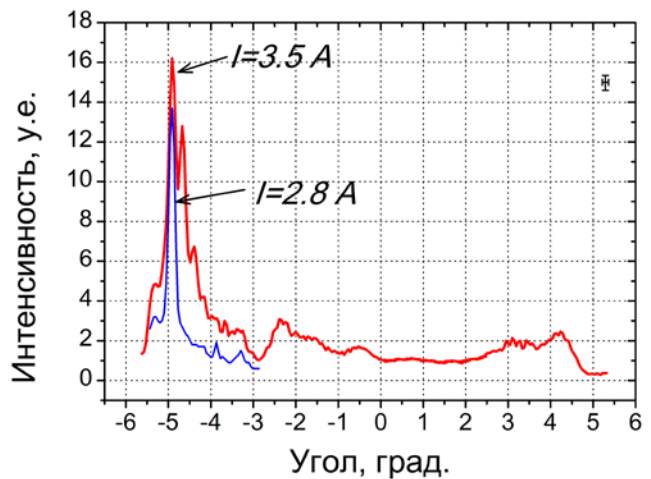


Рис.5 Угловое распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне для случая асимметричного V-образного резонатора.

странственного расширителя пучка обратной связи. Был применён двухплечевой резонатор, построенный по трехзеркальной схеме. Выходное зеркало имело коэффициент отражения 12%.

Были исследованы резонаторы с двумя вариантами взаимодействия внутрирезонаторного излучения с ВРЗ: коллинеарное и неколлинеарное. Для коллинеарного взаимодействия с ВРЗ, последнее рассчитывалось таким образом, чтобы 100% отражение от зеркала происходило для ТМ-излучения при угле падения Брюстера. Для этого ВРЗ рассчитывалось с условием возбуждения моды в -1 порядке. В этом случае зеркальное отражение от ВРЗ формируется исключительно за счёт излучательных потерь волноводной моды.

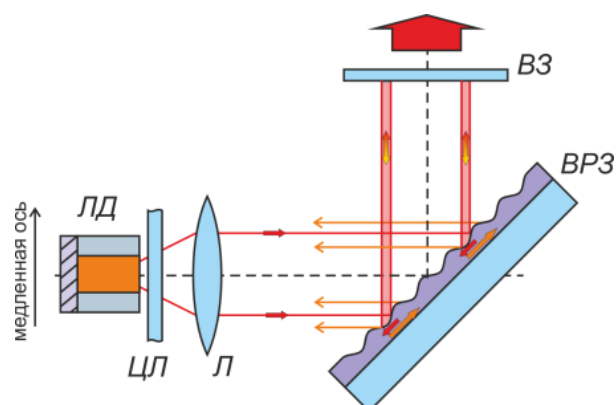


Рис.6 Схема резонатора с волноводно-решеточным зеркалом, поясняющая эффект уширения пучка ОС (ЛД – лазерный диод, ЦЛ – цилиндрическая линза, Л – собирающая линза, ВРЗ – волноводно-решеточное зеркало, ВЗ – 12% выходное зеркало).

Исследования лазерной генерации в резонаторе с ВРЗ показали, что в режиме коллинеарного падения излучения на ВРЗ наблюдалось сужение спектра лазерной генерации до 0.1 нм (уменьшение в 25 раз).

Перестройка длины волны за счёт изменения угла падения пучка на ВРЗ осуществлялась в пределах 18 нм. В режиме неколлинеарного падения сужение спектра происходило до 0.7 нм (уменьшение в 3.5 раза), перестройка длины волны осуществлялась в пределах 8 нм. В обоих случаях угловая расходимость пучков составила 0.15° .

Пятая глава посвящена исследованию селекции поперечных мод и стабилизации спектра излучения широкополоскового (100 мкм) ЛД в резонаторе, в котором на выходном торце лазерного диода внешним отражающим элементом формировалось поле излучения обратной связи с заданным распределением амплитуды и фазы. В экспериментах исследовались варианты формирования поля постоянной амплитуды и фазы, а также поля с амплитудно-фазовым распределением поперечной моды высокого порядка

(11 мкм). Для этой цели в качестве отражателей использовались волноводные числовые планарные голограммы (ЧПГ) [10,11]. В эту же главу вошли результаты исследований резонатора с внешним планарным волноводным брэгговским отражателем, возвращающим на торец ЛД спектрально узкое излучение обратной связи без пространственной фазовой селекции.

В главе представлены следующие исследования:

1. лазерная генерация отдельно стоящего ЛД без глубокого просветления выходной грани;
2. генерация лазерного диода с глубоким просветлением выходного торца при отражении от входной грани планарного волновода;
3. генерация лазерного диода с числовой планарной голограммой во внешнем резонаторе, формирующей отражение с постоянной амплитудой и фазой;
4. генерация лазерного диода с числовой планарной голограммой во внешнем резонаторе, формирующей в отражении поперечную (вдоль медленной оси) моду высокого порядка с фазовым периодом $\Lambda_{ph} = 11$ мкм;
5. генерация лазерного диода с планарным волноводным отражающим зеркалом на основе брэгговской решётки.

Общая схема диодного лазера с внешним резонатором, использовавшаяся в экспериментах, изображена на рис.7. Во всех экспериментах с внешним резонатором использовались лазерные диоды с глубоким просветлением выходной грани, которое обеспечивало режим люминесценции вплоть до номинального тока накачки $I_{nom} = 2$ А.

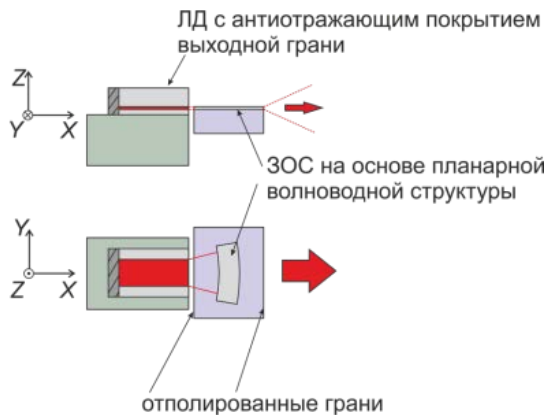


Рис.7 Схема диодного лазера с внешним резонаторным ЧПГ-зеркалом (ЗОС-зеркало ОС).

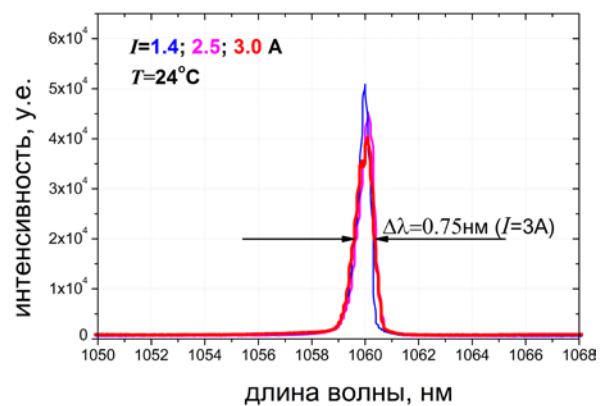


Рис.8 Спектр лазерной генерации при различных токах накачки.

Основные результаты представленных исследований:

1. Продемонстрирована селекция основной поперечной (вдоль медленной оси) моды и селекция моды высокого порядка. Наряду с селекцией поперечных мод продемонстрированы сужение и стабилизация лазерного спектра во всём диапазоне рабочих токов (рис.8).
2. В случае селекции основной моды получено уменьшение расходимости пучка с 6.5 до 3° для пятикратного превышения порогового тока накачки, спектральная ширина излучения была уменьшена с 4.5 до 0.5 нм при максимальном токе накачки ($I = 7.5I_{th}$). Наблюдалось уменьшение параметра M^2 , характеризующего качество пучка в перетяжке, с 15 до 4 (рис.9б,в).
3. В случае селекции моды высокого порядка получено уменьшение расходимости пучка с 6.5 до 2° для четырёхкратного превышения порогового тока ($I = 4I_{th}$) и до 2.5° для пятикратного превышения ($I = 5I_{th}$). Спектральная ширина излучения была уменьшена до 0.6 нм при $I = 5I_{th}$.
4. Измерением и анализом распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне в резонаторе с планарной брэгговской структурой показано увеличение добротности поперечной моды высокого порядка с фазовым периодом, равным удвоенному периоду расположения филаментов на выходном торце ЛД.
5. Из сопоставления расчётных значений спектра волноводных мод планарной структуры отражателя и измерения спектров генерации при различном взаимном расположении плоскостей волновода ЛД и планарного волноводного зеркала было показано, что продольные моды лазерного диода в резонаторе определяются конкуренцией неистекающих и истекающих мод волноводного зеркала ОС.

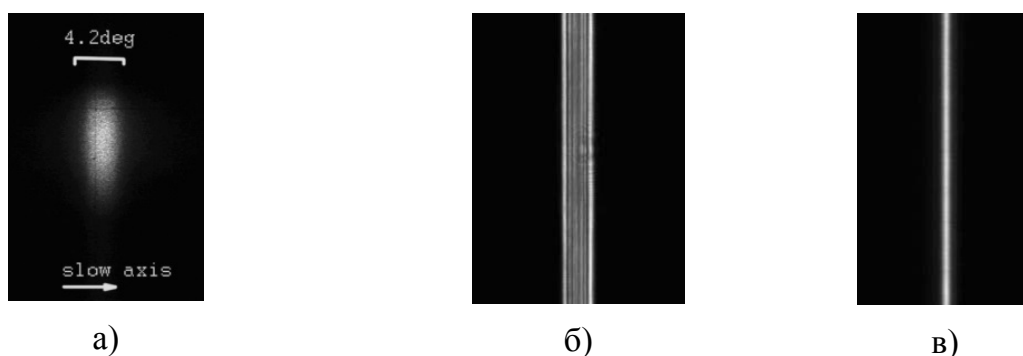


Рис.9 Изображения пучка: а) в дальней зоне, б) перетяжка лазерного пучка серийного ЛД, в) перетяжка лазерного пучка ЛД с ЧПГ.

Шестая глава посвящена исследованию резонатора со спектрально-селективным элементом на канальных волноводах низкой контрастности. Данный резонатор предназначался для получения многочастотной лазерной генерации маломощного ЛД. В резонаторе в качестве внутрирезонаторного спектрального элемента использовался планарный волноводный эшелон Майкельсона (ЭМ). В главе изложена предложенная методика расчёта волноводного эшелона и приведены результаты экспериментального исследования как самой волноводной структуры, так и генерации лазерного диода в резонаторе с этой структурой.

Показано, что использование волноводного эшелона Майкельсона из низкоконтрастных ($\Delta n/n = 0.03$) одномодовых SiON-волноводов в качестве внутрирезонаторного элемента позволяет осуществить селекцию продольных мод на заданных длинах волн. Были исследованы две геометрии резонатора: 1) с ЭМ в качестве заднего отражателя и 2) с ЭМ в качестве выходного зеркала.

В исследованиях получена лазерная генерация на частотах, соответствующих областям пропускания волноводной структуры, при полном подавлении собственных частот генерации (рис.10). В том числе была достигнута генерация на частотах двух соседних интерференционных порядках пропускания эшелона (рис.10б). В экспериментах была получена лазерная генерация с соотношением сигнал/шум более 25 дБ и со спектральной шириной у основания спектрального пика $\Delta\lambda = 0.1-0.5$ нм.

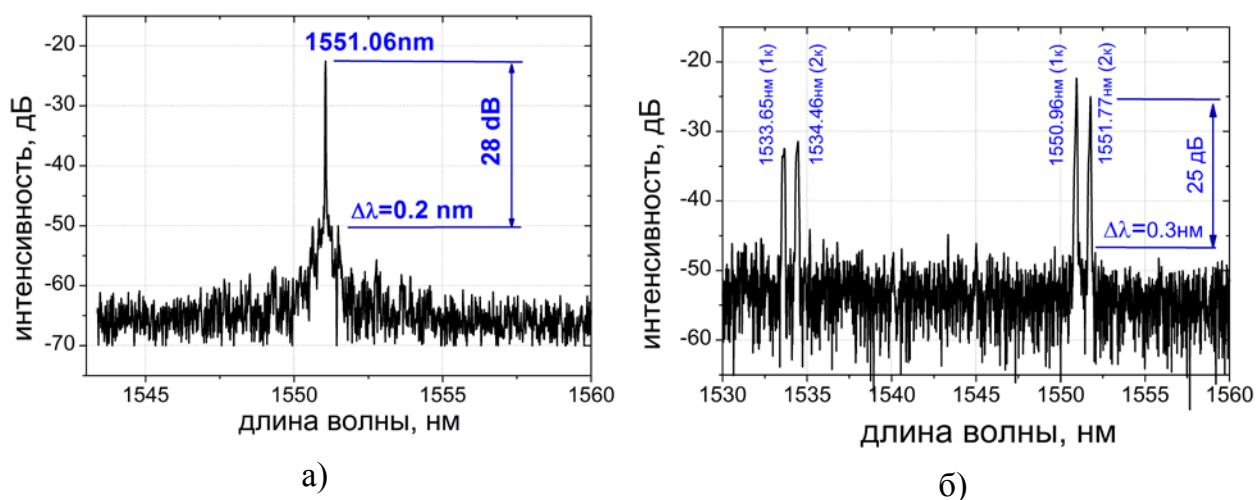


Рис.10 Спектры лазерной генерации: а) спектр лазерного диода во внешнем резонаторе; б) спектр многочастотной генерации, соответствующий генерации в двух соседних порядках интерференции AWG-структуры.

Заклучение

В работе проведены экспериментальные исследования методов селекции поперечных и продольных мод в широкополосковых и широкоапертурном секционированном лазерных диодах, основанных на принципах волноводной оптики. Решены задачи сужения и стабилизации спектра излучения, управление спектром излучения и селекция поперечных мод (вдоль медленной оси) и продольных мод.

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Показано, что за счёт резонансного согласования филаментной структуры лазерного диода и пучка обратной связи в резонаторе без спектрально- и пространственно-селективных элементов селекция поперечной моды возможна только для малых токов накачки. В резонаторе такого типа при токах вплоть до 2-кратного порогового, продемонстрировано 4-кратное сужение расходимости и 6-кратное сужение спектра генерации.
2. Показана дискретная зависимость лазерной генерации секционированного широкоапертурного лазерного диода в асимметричном V-резонаторе от угла разворота зеркала обратной связи. Продемонстрировано 7-кратное уменьшение расходимости и 3-кратное уменьшение спектральной ширины при максимальном токе накачки. Показано, что секционированная структура лазерного диода обладает спектральной селективностью, препятствующей

непрерывной перестройке длины волны при фиксированном угле возврата пучка обратной связи.

3. Разработан внешний резонатор с волноводно-решёточным зеркалом обратной связи, выполняющим функции спектрального селектора и пространственного расширителя пучка обратной связи. Показано 25-кратное сужение спектральной ширины излучения и 35-кратное уменьшение расходимости. Получена плавная перестройка длины волны излучения лазера в пределах 18 нм.

4. В резонаторе с планарной брэгговской структурой показано увеличение добротности поперечной моды высокого порядка с фазовым периодом, равным удвоенному периоду расположения филаментов на выходном торце лазерного диода. Показано, что продольные моды лазерного диода во внешнем планарном волноводном резонаторе определяются конкуренцией неистекающих и истекающих мод зеркала обратной связи.

5. Разработаны резонаторы для широкополосковых полупроводниковых лазеров с волноводным зеркалом обратной связи на основе числовой планарной голограммы. Показана селекция основной моды и моды высокого порядка, в обоих случаях достигнута частотная стабилизация генерации и сужение спектра до 5 раз при максимальном токе накачки.

6. Получена генерация узкополоскового лазерного диода во внешнем резонаторе с интегрально-оптическим волноводным эшелонном Майкельсона, выполненным на SiO_2/SiON волноводах. Получена устойчивая узкополосная лазерная генерация с шириной спектра 0.1 нм и глубиной контраста 25 дБ, продемонстрирована генерация в двух соседних интерференционных порядках эшелона Майкельсона.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

По результатам исследований, вошедших в диссертационную работу, опубликованы 7 статей в рецензируемых журналах, 2 статьи в сборнике SPIE, материалы были представлены на 7 международных и российских конференциях и форумах:

1. В.В. Светиков, М.А. Кононов, «Исследование лазерной генерации лазерного диода с широким полосковым контактом в асимметричном V-резонаторе со спектрально неселективным зеркалом обратной связи», // **Квантовая электроника**, т.48, №8, с.706-710 (2018)
2. В.В. Светиков, Д.Х. Нурлигареев, "Широкоапертурный секционированный лазерный диод во внешнем V-образном резонаторе", // **Квантовая электроника**, т.44, №9, с.810-814 (2014)
3. V. Svetikov, C. Peroz, I. Ivonin, S. Dhuey, S. Cabrini, S. Babin, A. Goltsov, V. Yankov, "Selection of high-order lateral modes in broad area laser diode by digital planar hologram", // **J. Opt. Soc. Am. B**, vol. 30, No. 3, pp.610-614 (2013)
4. V. Svetikov, I. Ivonin, A. Koshelev; L. Velikov, Yu. Vorobiev, A. Goltsov, V. Yankov, "Suppression of lateral modes in wide aperture laser diodes by digital planar holograms", // **Proceedings of SPIE** v.7918, 79180P (2011)
5. Goncharov A.A., Kuzmin S.V., Svetikov V.V., Trusov N.V. "The semiconductor laser diode with the integrated AWG-multiplexer as external cavity." // **Proceedings of SPIE**, v.6344б p.63442A (2006).
6. Гончаров А.А., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Трусов Н.В. "Интегрально-оптический демультимплексор на основе волноводной структуры SiO₂-SiON. // **Квантовая электроника**, т.35, №12 (2005), с.1163-1166.
7. Гончаров А.А., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. "Интегрально-оптический аналог эшелона Майкельсона, его основные свойства и приложения." // **Квантовая электроника**, т.34, №8 (2004), с.755-760.
8. Гончаров А.А., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. "Интегрально-оптическое устройство спектрального уплотнения и разуплотнения каналов связи" // **Радиотехника**, 2004, №12, с.54-60, (исправление: 2005, №10).
9. V.A. Sychugov, D.Kh. Nurligareev, V.V. Svetikov, I.F. Salakhutdinov, B.N. Zvonkov, N.V. Baidus, S.V. Nekorkin, and H.J.W.M. Hoekstra, "Tunable Wide-Aperture Semiconductor Laser with an External Waveguide–Grating Mirror", // **Laser Physics**, v.12, No.4, pp. 691–696 (2002)

10. Б.Н. Звонков, К.Е. Зиновьев, Д.Х. Нурлигареев, И.Ф. Салахутдинов, В.В. Светиков, В.А. Сычугов, "Перестраиваемый широкоапертурный полупроводниковый лазер с внешним волноводно-решёточным зеркалом", // **Квантовая электроника**, т.31, №1, с.35-38 (2001)

Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих конференциях:

1. V.V. Svetikov, P.I. Pustovoy, "Semiconductor laser diode into asymmetrical V-shaped cavity with non spectral- and non phase- selective feedback mirror.", // **ECONO/LAT 2016**, Minsk,

2. V. Svetikov, I. Ivonine, C. Peroz, S. Babin, S. Dhuey, S. Cabrini, A. Goltsov, V. Yankov, "Lateral modes selection in broad area laser diodes by digital planar hologram", // **15th International Conference "Laser Optics 2012"**, St. Petersburg, Russia, June 25-29, 2012

3. V. Svetikov, I. Ivonin, A. Koshelev; L. Velikov, Yu. Vorobiev, A. Goltsov, V. Yankov, "Suppression of lateral modes in wide aperture laser diodes by digital planar holograms", // **High-Power Diode Laser Technology and Applications IX**, San Francisco, California, USA, January 23-25, 2011

4. C. Peroz, S. Dhuey, A. Goltsov, B. Harteneck, I. Ivonin, V. Svetikov, S. Babin, S. Cabrini, and V. Yankov, "Digital Planar Holograms fabricated by Step and Repeat UV nanoimprint lithography: from spectrometer chip to higher power laser diodes", // **CLEO:2011 – Laser Applications to Photonic Applications**, Baltimore, Maryland United States, 1–6 May 2011, ISBN: 978-1-55752-910-7, https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2011.CMEE7

5. V. V. Svetikov, A. Yu. Goltsov, I. A. Ivonin, V. V. Yankov, "Laser Mode Selection of Broad Area Laser Diode by External Spectral-Phase Planar Mirror", // **ALT'10** (18th International Conference on Advanced Laser Technologies), September 11-16, 2010, Egmond aan Zee, Netherlands.

6. A. Koshelev, V. Svetikov, I. Ivonin, A. Goltsov, V. Yankov, "Use of digital planar nanoholography for increasing brightness of high power laser diodes", // **Международный форум по нанотехнологиям**, Москва, 1-3 ноября, 2010

7. V.V. Svetikov, V.A. Sychugov, "Broad-area semiconductor laser diode with sectioned electric contact into external Bragg resonator", //ALT'09 (17th International Conference on Advanced Laser Technologies), September 26–October 1, 2009, Antalya, Turkey
8. Goncharov A.A., Kuzmin S.V., Svetikov V.V., Trusov N.V. "The semiconductor laser diode with the integrated AWG-multiplexer as external cavity.", //ALT'05, (13th International Conference on Advanced Laser Technologies), September 3–6, 2005, Tianjin, China
9. Гончаров А.А., Кузьмин С.В., Светиков В.В., Трусов Н.В. "Полупроводниковый лазерный диод с интегральным AWG-мультиплексором во внешнем резонаторе", //Труды XLVIII научной конференции МФТИ, часть V, Москва, Долгопрудный, 2005, с.126-127
10. N.V. Baidus, B.N. Zvonkov, H.J.W.M. Hoekstra, D.Kh. Nurligareev, I.F. Salakhutdinov, V.V. Svetikov, V.A. Sychugov, "Tunable wide-aperture semiconductor laser with an external waveguide-grating mirror", //10th European Conference on Integrated Optics, //ЕСІО 2001 - Heinz Nixdorf MuseumsForum, Paderborn, Germany, 4 Apr 2001 – 6 Apr 2001.

Литература

- [1] Thompson G.H.B., //Opto-electronics, 1972, v.4, p.257
- [2] Бахерт Х.-Ю, Богатов А.П., Елисеев П.Г. //Квантовая электроника, 1978, т.5, №3, 603
- [3] А.П. Богатов, А.Е. Дракин, А.А. Стратонников, В.П. Коняев, "Яркость и филаментация оптического потока мощных квантоворазмерных $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ -лазеров, работающих в непрерывном режиме", //Квантовая электроника, 2000, т.30, №5, с.401-405
- [4] J. G. McInerney, P. O'Brien, P. Skovgaard, M. Mullane, J. Houlihan, E. O'Neill, J.V. Moloney and R.A. Indik, "Towards filament-free semiconductor lasers", //Proc. of SPIE, 2000, v.3944, pp. 375-386.
- [5] P. M. Snowton et al., " Filamentation and linewidth enhancement factor in In-GaAs quantum dot lasers ", //Appl. Phys. Lett., 2002, v.81, No.17, pp. 3251-3253.

- [6] T.-P. Lee, C. Zah, R. Bhat, W. Young, B. Pathak, F. Favire, P. Lin, N. Andreadakis, C. Caneau, A. W. Rahjel, M. Koza, J. K. Gamelin, L. Curtis, D. D. Mahoney, and A. Lepore, "Multiwavelength DFB laser array transmitters for ONTC reconfigurable optical network testbed," //Journal of Lightwave Technology, 1996, vol. 14, no. 6, pp. 967– 976.
- [7] S. L. Lee, I. F. Jang, C. Y. Wang, C. T. Pien, and T. T. Shih, "Monolithically integrated multiwavelength sampled grating DBR lasers for dense WDM applications," //IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, vol. 6, no. 1, pp. 197–206.
- [8] Kogelnik H. //The Bell System Technical Journal, 1969, v.48, no.9, p.2909.
- [9] M.G. Littman, H.J. Metcalf, "Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander", //Applied Optics, 1978, v.17, No14, pp.2224-2227.
- [10] Yankov, V., Babin, S., Ivonin, I., Goltsov, A., Morozov, A., Polonskiy, L., Spector, M., Talapov, A., Kley, E.-B., Schmidt, H., "Multiwavelength Bragg Holograms and their Application to Optical MUX/DEMUX Devices." //Photonic Technology Lett., 2003, v. 15, pp. 410-412.
- [11] Yankov, V., Babin, S., Ivonin, I., Goltsov, A., Morozov, A., Polonskiy, L., Spector, M., Talapov, A., Kley, E.-B., Schmidt, H., Dahlgren, R., "Photonic Bandgap Quasi-Crystals for Integrated WDM Devices.", //Invited report 4989-25, Photonics West, San Jose, (2003)