

На правах рукописи



Панарин Вадим Александрович

МОЩНЫЕ ИСТОЧНИКИ СПЕКТРАЛЬНО УЗКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ

Специальность: 1.3.19. Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук

Саратов 2025

Работа выполнена в ООО «Научно-производственное предприятие «ИНЖЕКТ»

Научный руководитель

Гаранин Сергей Григорьевич

доктор физико - математических наук,
академик РАН,
генеральный конструктор по лазерным системам –
заместитель директора Федерального государственного
унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный
центр Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики» по лазерно-физическому
направлению – директор ИЛФИ.

Официальные оппоненты:

Антипов Олег Леонидович

доктор физико - математических наук,
ведущий научный сотрудник лаб. 333
отдела 330 Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук».

Пихтин Никита Александрович

кандидат физико - математических наук,
заведующий лаб. полупроводниковой люминесценции и
инжекционных излучателей
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
Российской академии наук.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полус» имени
М.Ф. Стельмаха»

Защита диссертации состоится «02» июня 2025 года в 15:00
на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу:
г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН
<https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.223.03,
кандидат физико-математических наук
тел. +7 (499) 503-8780

Осадчий Александр Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

К настоящему времени диодные лазеры нашли широкое применение в различных научно – технических областях. В частности, использование диодных лазеров в качестве источников накачки активных сред других типов лазеров придало новый импульс развитию последних. К ним относятся лазеры на основе редкоземельных элементов, например, неодимовых, эрбиевых и иттербиевых сред, в том числе твердотельные, оптоволоконные лазеры и усилители.

Это обусловлено двумя благоприятными особенностями диодных лазеров. Первая из них – это высокая эффективность (более 60%) прямого преобразования электрической энергии в энергию оптического пучка. Вторая – подстройка длины волны излучения диодного лазера к линии накачки за счет вариации химического состава активной области гетероструктуры диодного лазера и вариации его рабочей температуры. При этом такая подстройка длины волны диодного лазера к линии накачки среды подходит в основном для твердотельных сред, в которых линии поглощения достаточно широки (несколько нм и более).

В настоящее время в качестве перспективных сред для использования в мощных лазерах с высоким оптическим качеством пучка рассматриваются активные газовые среды на основе паров щелочноземельных элементов или атомов инертных газов.

Для газовых сред подстройка длины волны диодного лазера, которая использовалась ранее для твердотельных сред, уже оказывается недостаточной. Для эффективной накачки таких сред при рабочих давлениях газа требуются мощные источники спектрально узкополосного излучения. Ширина огибающей спектра лазерного излучения у диодной накачки должна быть не более 0,1 нм.

Кроме лазерных применений, оптическая накачка узкополосным излучением щелочноземельных элементов применяется в методах гиперполяризации благородных газов (оптической накачкой с обменом спинами – SEOP Spin - Exchange Optical Pumping), что в настоящее время рассматривается как перспективная в устройствах магнитно-резонансной спектроскопии. Процесс гиперполяризации позволяет достичь уровня поляризации ядерных спинов вплоть до теоретически достигаемого уровня 100%, позволяя увеличить чувствительность магнитно-резонансной томографии (МРТ) с использованием изотопов благородных газов на три порядка.

Эффективная оптическая накачка этих сред требует создания мощных (десятки и сотни Вт) диодных лазерных излучателей с контролируемым узкополосным спектром.

Степень разработанности темы исследования

На настоящее время доступные литературные данные по мощным (в диапазоне мощностей 50 ÷ 100 Вт) узкополосным (шириной спектра излучения $\leq 0,1$ нм) линейкам лазерных

диодов с полным описанием физических явлений, ответственных за генерацию мощного спектрально узкополосного излучения в них, недостаточны. Экспериментальные результаты и описание исследований, направленных на создание мощных узкополосных диодных лазеров, приведенные в профильной литературе и представленные в 1-ой главе настоящей работы, содержат примерно одинаковые результаты, основанные лишь на экспериментальных данных без глубокого анализа физических причин. Отсутствуют работы с полным, детальным описанием и теоретическим обоснованием физических явлений, ответственных за генерацию узкополосного излучения мощными линейками лазерных диодов.

Цели и задачи

Целью данной диссертационной работы являются исследования, направленные на определение физических механизмов, возникающих в мощных источниках спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров (линеек лазерных диодов), а также практическое применение полученных результатов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие связанные друг с другом основные задачи:

1. Провести исследования ряда физических механизмов в мощных диодных лазерных источниках излучения для выявления физических условий, ответственных за генерацию в них мощного спектрально узкополосного излучения.
2. Провести теоретические и экспериментальные исследования мощных линеек лазерных диодов в резонаторе с селективным зеркалом, представляющим собой объёмную брэгговскую (фазовую) решётку.
3. Определить оптимальные параметры составляющих элементов излучателя, связанные с интеграцией единичного диодного лазера в линейки лазерных диодов и с интеграцией линеек лазерных диодов в мощный спектрально узкополосный излучатель при их масштабировании.
4. Провести практическую апробацию полученных результатов.

Научная новизна.

1. Выявлены физические параметры излучающей области мощной линейки лазерных диодов во внешнем селективном резонаторе, такие как её изгиб и поперечный размер оптического пучка, которые определяют эффективность оптического согласования линейки с внешней частью резонатора.
2. Разработан метод расчета комплексных собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором, основанный на использовании трансляционных матриц 2×2 . Метод использован для анализа многоэлементного резонатора,

включающего в том числе и фазовую решётку и микрооптические элементы, такие как коллиматор быстрой оси (вертикальной расходимости – FАС).

3. Показано, что для устойчивого контроля частоты генерации линейки лазерных диодов во внешнем резонаторе необходимо оптимизировать эффективность фазовой решётки. С одной стороны, повышенная эффективность решётки уменьшает её спектральную селективность, с другой стороны слишком низкая эффективность влечёт понижение устойчивости спектра из-за больших перескоков частоты генерации.
4. Впервые проведены экспериментальные исследования линейки диодных лазеров с внешним резонатором, содержащим фазовую решётку в режиме усиленного спонтанного излучения. Проведено теоретическое моделирование спектра усиленного спонтанного излучения. Рассчитанный спектр достаточно хорошо согласуется с полученными экспериментальными результатами. Анализ структуры продольных мод экспериментального спектра усиленного спонтанного излучения позволяет оценить устойчивость спектрально узкополосной генерации лазерного диода во внешнем резонаторе.
5. Предложена и экспериментально реализована методика контроля и способ уменьшения изгиба линейки лазерных диодов, применение которых позволило уменьшить отклонения излучающих областей отдельных диодов в линейке лазерных диодов от их линейного расположения вдоль р-п перехода (смайл-smile) до значения $\leq 0,25$ мкм.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в создании метода расчета комплексных собственных частот продольных мод лазера с внешним многоэлементным резонатором, основанный на использовании трансляционных матриц. Данный метод может быть использован для расчета других типов лазеров с многоэлементными резонаторами.

Предложенный метод теоретического моделирования спектра усиленного спонтанного излучения применим для расчетов спектральных характеристик других типов диодных лазеров.

Практическая значимость заключается в том, что результаты проведенных в настоящей работе исследований легли в основу создания мощных компактных спектрально узкополосных излучателей диодных лазеров.

Результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, использованы при выполнении нескольких опытно - конструкторских работ на предприятии ООО «НПП «Инжент», и в настоящее время выпускается ряд изделий, часть которых размещена в электронном каталоге предприятия.

Достигнутый уровень мощности при масштабировании указанных источников характеризуется уровнем более 2 кВт. При использовании такого класса излучателей в качестве узкополосного источника оптической накачки в лазере на парах щелочноземельных элементов получена генерация с мощностью $P = 1$ кВт [1].

Полученные в данной работе результаты использовались также для создания на предприятии ООО «НПП «Инжект» лазерного диодного модуля для спин-обменной оптической накачки благородных газов для применения в магнитно-резонансной томографии (МРТ).

По итогам конкурса Лазерной ассоциации на лучшую отечественную разработку в области фотоники данная разработка удостоена диплома «Лауреат конкурса ЛАС 2024 года» I степени.

Методология и методы исследования

Методология проведенных исследований включает комплексный подход, объединяющий оптические (в том числе микрооптические), спектроскопические, теплофизические, профилометрические методы и математическое моделирование для изучения и анализа физических явлений в спектрально узкополосных мощных диодных лазерах и линейках. Методология включает в себя этапы подготовки экспериментальных образцов диодных лазеров, фазовых решеток, селективного лазерного резонатора, измерения спектральных и мощностных характеристик и последующий анализ полученных результатов.

В экспериментальных исследованиях использовались методы исследований, базированные на следующих установках и приведенных в их описании, а также отдельных методиках измерений оптических и электрофизических характеристик:

- разработанных в ходе выполнения работы установок измерений оптических параметров излучения линеек лазерных диодов; измерения изгиба активной области линейки лазерных диодов (смайла) и метода его измерения, юстировки оптических элементов (микролинз), юстировки брэгговских решёток и методы юстировок;

- разработанная в ходе выполнения работы методика измерения доли мощности лазерного излучения в спектральной полосе МИ 01/2017 №05/11.02.2021-01.00276-2014

- методика измерения мощности излучения по ГОСТ Р 51106-97 метод 5;

- методика измерения длины волны лазерного излучения и ширины огибающей спектра лазерного излучения по ГОСТ Р 51106-97 метод 9;

- 3D микроскоп Lext laser Microscope OLS 4100;

- профилометр Taylor Hobson TH PGI 1240;

- стенд для сборки линеек лазерных диодов на основе Budatec BS-320;

- установка разварки электрических контактов золотой проволокой TPT HB16.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод уменьшения значений отклонения отдельных излучающих областей в линейке лазерных диодов от линейного их расположения вдоль р-п перехода (смайла до значения менее 0.25 мкм) позволяет достигать близкое к дифракционному качеству пучка в вертикальном направлении (вдоль «быстрой» оси).

2. Применение брэгговской решётки с оптимальной эффективностью (50÷70)% в качестве выходного зеркала резонатора диодного лазера обеспечивает получения необходимой спектрально узкополосной генерации (0,1 нм и менее) и высокий коэффициент пропускания выходного пучка (более 70 %) за счёт его повышенной расходимости по медленной оси по сравнению с отражённым от брэгговской решётки пучком.

3. Методика расчета частот и добротности продольных мод внешнего многоэлементного резонатора диодного лазера, основанная на использовании трансляционных 2×2 матриц для амплитуд встречных волн, которая учитывает—основные физические механизмы позволяет моделировать спектральную структуру мод резонатора при всех практически значимых его параметрах.

4. Определен допустимый уровень 2×10^{-3} остаточного отражения от поверхностей элементов внешнего резонатора, выше которого происходит понижение устойчивости спектрально узкополосной генерации и появление дополнительных резонансов в спектральном распределении интенсивности, снижающих эффективность работы систем диодной накачки.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов основана на анализе выполненных ранее работ и подтверждается сравнением полученных теоретических результатов с экспериментальными. Исследования и разработки проводились на современном научно-технологическом оборудовании с использованием современных средств вычисления.

Апробация результатов выполнена в ходе выполнения опытно- конструкторских работ на предприятии ООО «НПП «ИНЖЕКТ», по результатам которых выпускается ряд изделий, основанных на результатах этой диссертационной работы. Часть этих изделий размещена в электронном каталоге предприятия:

1 Лазерные диодные модули LDM53-794-50-CW-L-ST [Электронный ресурс]. - 2023. - URL: <https://nppinject.ru/wp-content/uploads/2023/05/LDM53-794-50-CW-L-ST.pdf> (дата обращения: 23.05.2023).

2 Лазерные диодные модули LDM34-794-200-CW-L-ST [Электронный ресурс]. - 2023. - URL: <https://nppinject.ru/wp-content/uploads/2023/05/LDM34-794-200-CW-L-ST.pdf> (дата обращения: 23.05.2023).

Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и представлены автором на российских и международных конференциях: 13-я научно-техническая конференция (Саров, 2014), тринадцатая Всероссийская школа для студентов аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2023 г.); IX Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур: сборник тезисов докладов (Москва, 2023 г.); 1-ая Международная конференция «Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе» (Минск, 2022 г.); 2-ая Международная конференция «Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе» (Минск, 2024 г.).

По результатам работы запатентована полезная модель RU 229681 U1.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор разрабатывал экспериментальные установки, проводил экспериментальные и теоретические исследования, обрабатывал и анализировал полученные результаты. Материалы для публикаций подготавливались совместно с научным руководителем и соавторами. Автор принимал непосредственное участие в формировании технических заданий на гетероструктуры, брэгговские решётки и микрооптические элементы, входящие в состав излучателя. Автор непосредственно производил расчёты и разрабатывал основные узлы мощных лазерных источников спектрально узкополосного излучения, осуществлял техническое сопровождение их изготовления и принимал участие в разработке технологии изготовления.

Основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения.

Во введении обосновывается актуальность проводимых в данной диссертационной работе исследований, формируются цели и задачи работы. Показывается недостаточная степень разработанности темы исследования. Показывается научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Содержатся основные положения, выносимые автором на защиту, сведения об апробации результатов.

В главе 1 представлен аналитический обзор литературы, в котором описаны различные излучатели мощного лазерного излучения, и обоснован выбор линейки лазерных диодов (ЛЛД) в качестве наиболее эффективной для использования в мощных источниках спектрально узкополосного излучения. Рассмотрены различные способы сужения спектра излучения и обоснован выбор использования внешнего спектрально селективного резонатора на основе брэгговской решётки для использования в мощных источниках спектрально узкополосного

излучения на основе ЛЛД. Показано влияние разогрева брэгговской решётки и изгиба излучающей области ЛЛД – смайла на работу источника мощного спектрально узкополосного излучения.

В главе 2 исследованы критические параметры ЛЛД для её работы с внешним резонатором - приведено исследование проблемы согласования лазерного диода с внешней частью резонатора, а именно с спектрально селективным зеркалом. Показано, что главную роль в эффективности обратной оптической связи играют значения двух физических величин: полуширины распределения интенсивности моды лазерного диода на выходном зеркале - σ_L и величины отклонения оптического пучка лазера от оптической оси цилиндрической линзы (так называемый смайл). Коэффициент оптического согласования – ξ может быть представлен в виде:

$$\xi = \xi_0 \cdot \exp(-\zeta^2 / \sigma_L^2) \quad (1)$$

где ξ_0 – постоянный коэффициент.

Повышение ξ возможно как за счет увеличения σ_L , так и за счет уменьшения ζ .

Для уменьшения смайла (после анализа влияющих факторов) предложен и экспериментально реализован следующий метод, включающий в себя внедрение в гетероструктуры слоёв, содержащих фосфор, использование припоя с пластичными свойствами при сборке лазерных диодов, использование дополнительного процесса обработки меди (многоступенчатая химико – механическая полировка).

Данный метод позволил получить величину смайла менее 0,25 мкм (среднеквадратичное значение по количеству 100 шт. излучателей) для ЛЛД шириной 10 мм (Рис. 1).

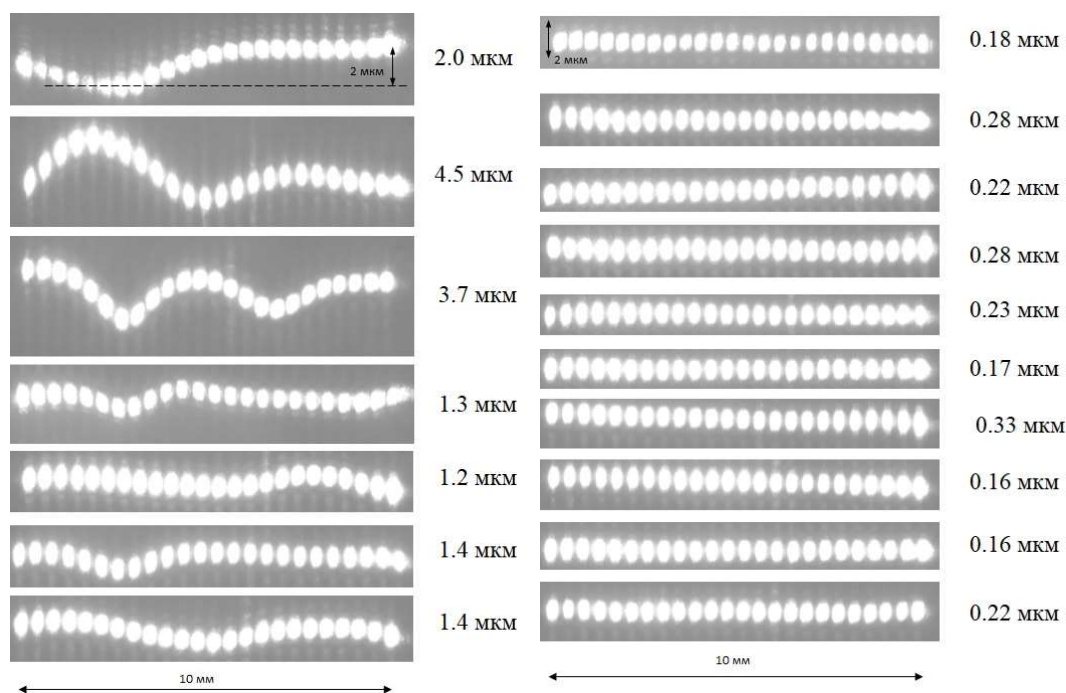


Рис. 1 – Изображения смайлов и их значения до (слева) и после (справа) внедрения изменений в технологию по результатам проведенных исследований.

В результате экспериментальной реализации указанных мероприятий увеличился ξ , что привело к повышению относительной доли мощности в источниках спектрально узкополосного излучения в заданном спектральном интервале (0,1 нм) на длине волны генерации (в пике) среднем с 84% до 98% (Рис. 2) при мощности излучения 100 Вт.

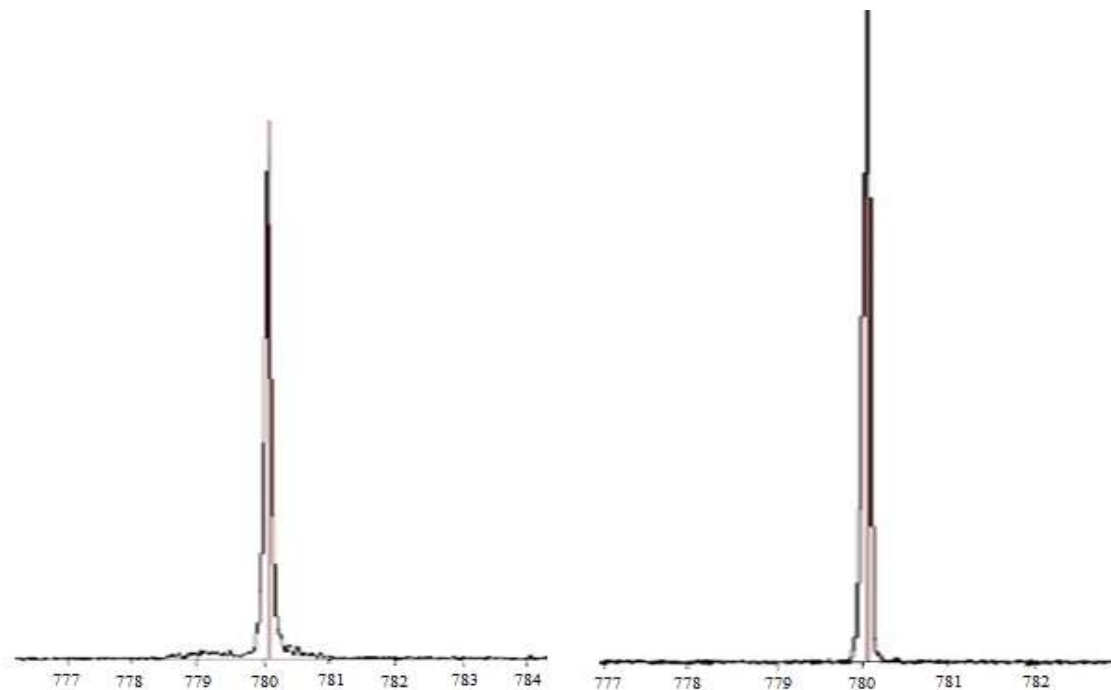


Рис. 2 – Типичные спектры при значении доли мощности в пике, 84% (слева) и 98% (справа). Сателлиты связаны с оцифровкой и особенностями работы спектрального прибора.

Представлена зависимость доли мощности в пике при уменьшении величины смайла ЛЛД (Рис. 3)

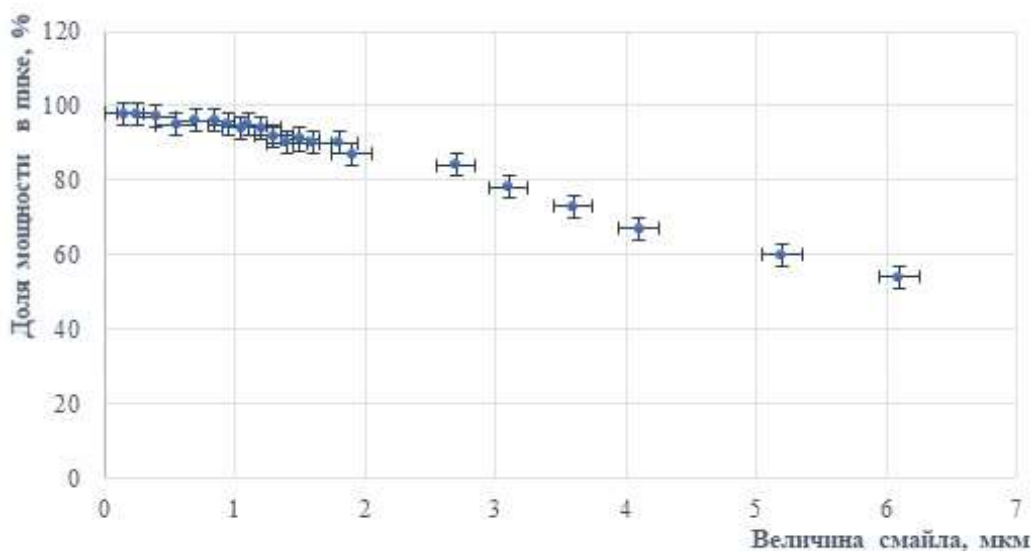


Рис. 3 – Зависимость доли мощности в пике при уменьшении величины смайла.

Представлены результаты исследования и оптимизации гетероструктуры типа $[Al_xGa_{1-x}]_yIn_{1-y}P$. Удалось увеличить размер излучающей области до уровня порядка 0,64 мкм (по уровню $1/e$). Профиль показателя преломления полученной гетероструктуры показан на Рис. 4.

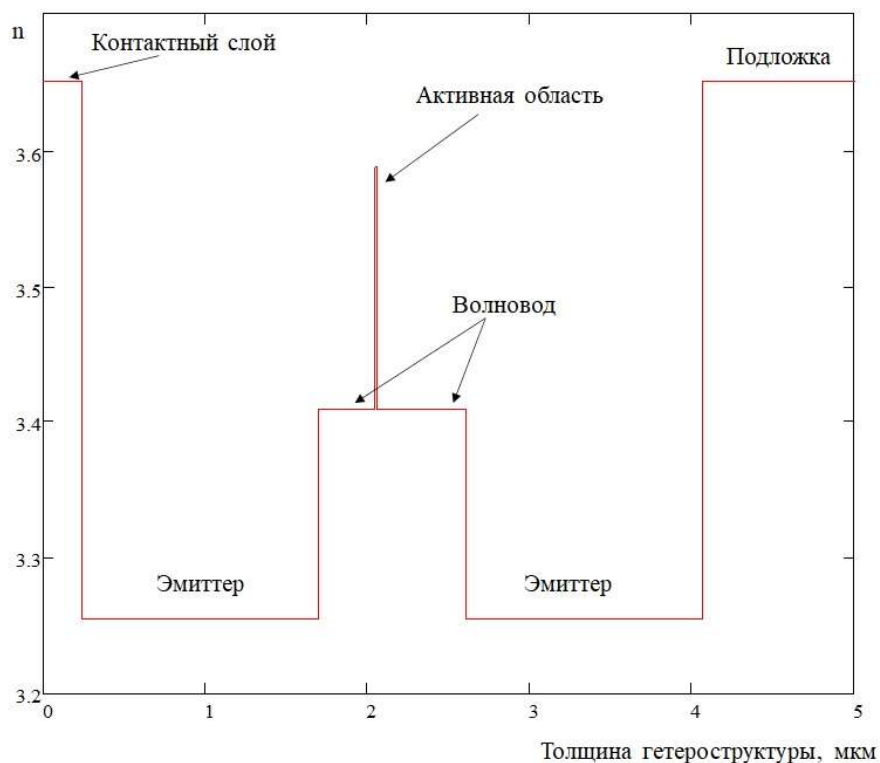


Рис. 4 – Профиль показателя преломления гетероструктуры

При этом удалось получить и более высокие значения мощности лазерного излучения ЛЛД (Рис. 5).

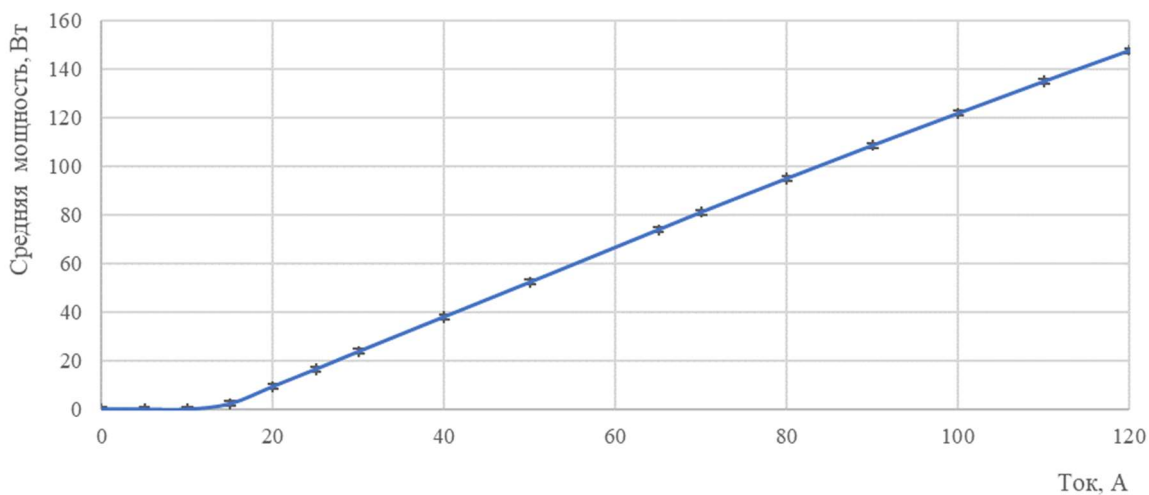


Рис. 5 – Типичная ватт-амперная характеристика ЛЛД, изготовленной из оптимальной по параметрам гетероструктуры.

Представлены результаты исследования ЛЛД с коллимирующей оптикой (Рис. 6) и внешний вид (Рис. 7) излучателя.

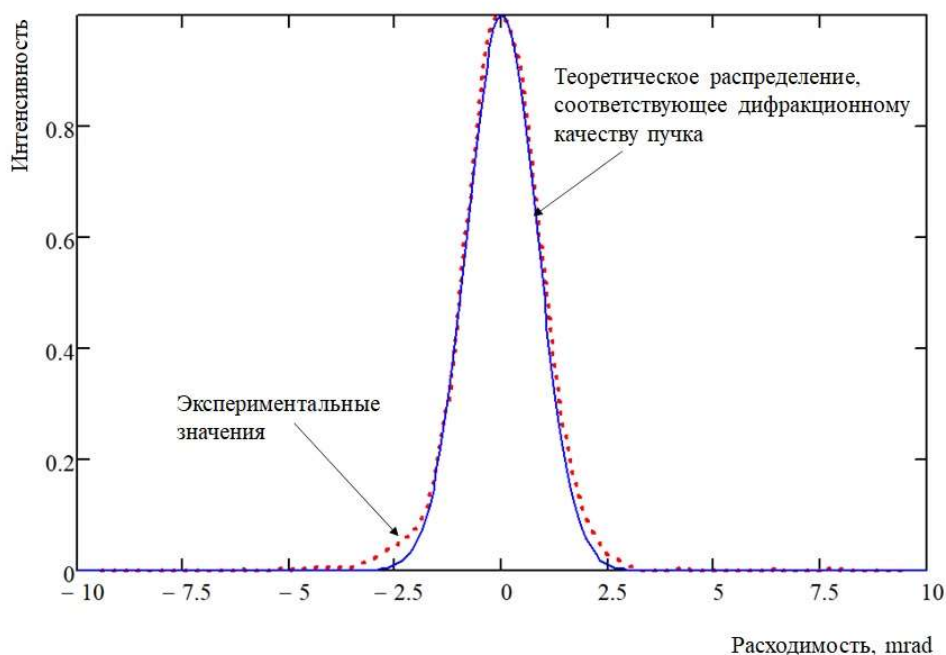


Рис. 6 – Типичная форма расходимости излучения после коллимации по быстрой оси. Распределение интенсивности: теоретическое, соответствующее дифракционному качеству пучка (сплошная) и полученные экспериментальные значения (пунктирная).

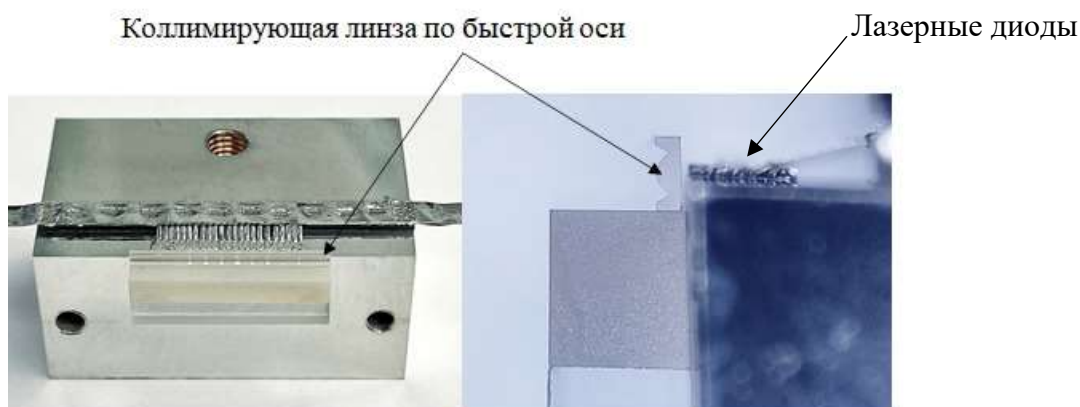


Рис.7 – Фотография ЛЛД с установленной коллимирующей линзой по быстрой оси.

Значения расходимости излучения по быстрой оси после коллимации составляли порядка 2,4 мрад по уровню $1/e$, что соответствует близкому к дифракционному качеству пучка (расходимость которого равна 2,3 мрад).

За счет уменьшения значения отклонения излучающей области отдельных лазерных диодов от единой плоскости ЛЛД было достигнуто близкое к дифракционному качество пучка.

Представлена оценка коэффициента согласования расходимости излучения, отраженного от брэгговской решётки (Рис. 8) для медленной оси ЛЛД.

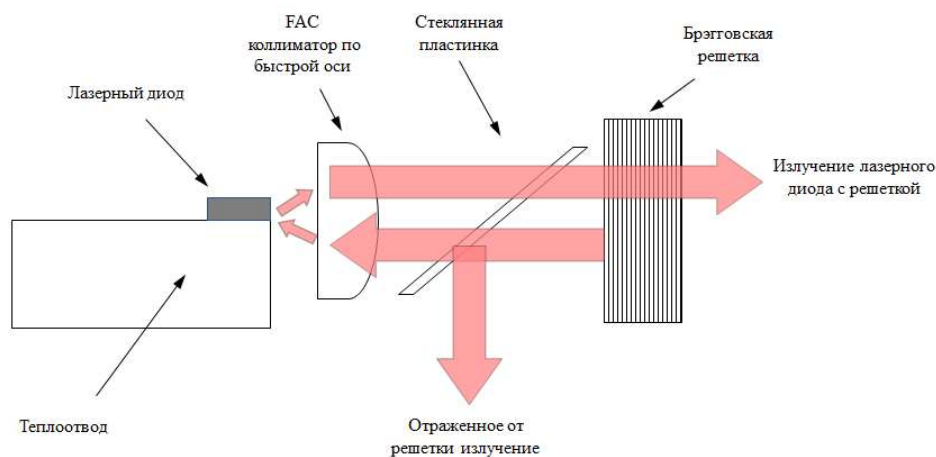


Рис. 8 – Схема измерения расходимости отраженного от брэгговской решётки излучения.

Величина расходимости отражённого от брэгговской решётки излучения (порядка 28 мрад при толщине решётки 6 мм, Рис. 9) меньше, чем величины расходимости излучения ЛЛД по медленной оси (типичное значение 135 мрад по уровню половинной интенсивности).

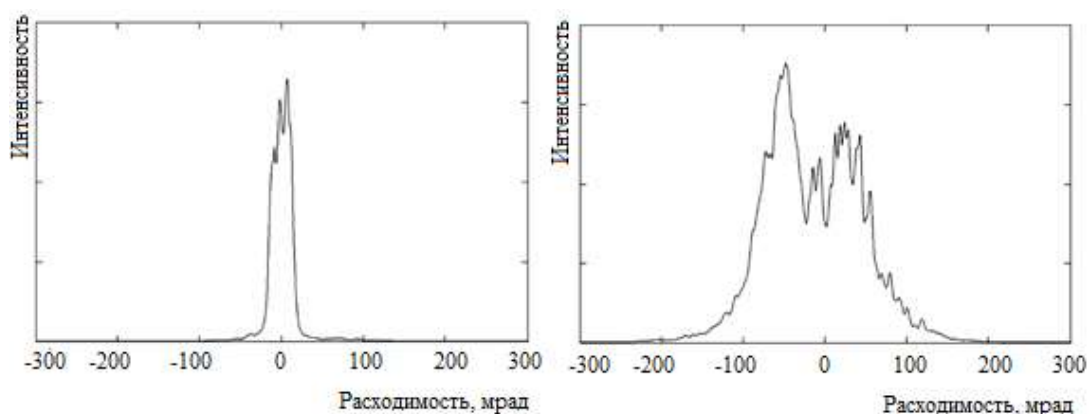


Рис. 9 – Расходимость излучения, слева - отражённого от брэгговской решётки по медленной оси, справа - типичная расходимость излучения ЛЛД по медленной оси.

Использование брэгговской решётки в качестве выходного зеркала резонатора диодного лазера обеспечивает достаточно высокий спектральный коэффициент отражения, необходимый для спектральной селективности, и одновременно высокий коэффициент пропускания выходного пучка за счет его повышенной расходимости по медленной оси.

В главе 3 приведены результаты исследований оптических характеристик лазерных диодов во внешнем резонаторе с селективным отражателем на основе брэгговской решётки.

Показано схематическое изображение ЛЛД с внешним спектрально селективным резонатором (Рис. 10).

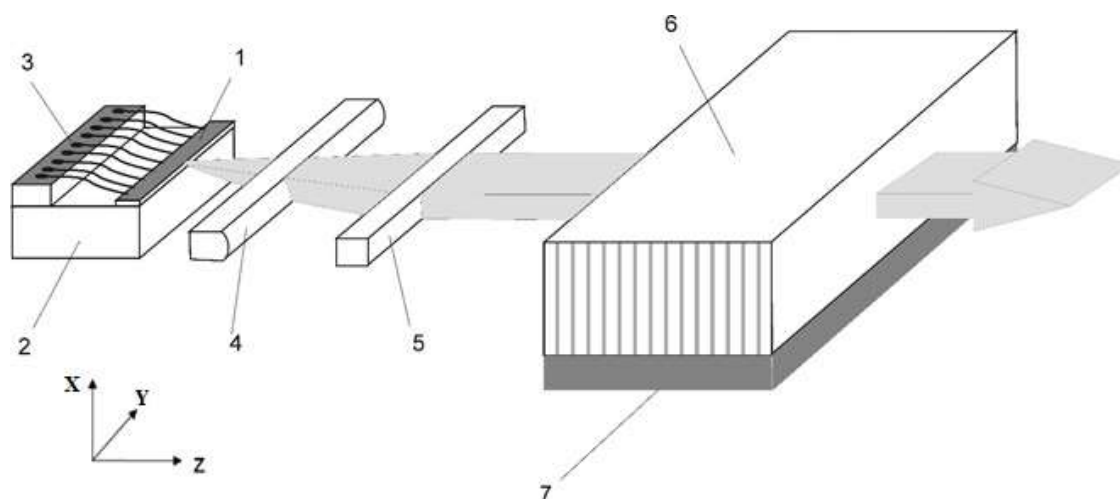


Рис. 10 – Схематическое изображение источника спектрально узкополосного излучения. 1-ЛД, 2-теплоотвод, 3-токоподводящая контактная площадка, 4-коллимирующая линза по быстрой оси, 5-коллимирующая линза по медленной оси, 6-брэгговская решётка, 7-пластина с нагревательным элементом.

Исследованы экспериментально спектральные характеристики (рисунок 11) лазерных диодов ЛД с внешним спектрально селективным резонатором в спонтанном режиме излучения и на пороге генерации при разных остаточных коэффициентах отражения на выходной (передней) грани.

Показано различие в спектрах для ЛД № 1 и № 2, отличающихся разными значениями остаточного коэффициента отражения передней грани. При наличии резонансов Фабри-Перо (ФП) диода или решётки (излучатель №1) частота лазерной генерации определяется не только частотой $\omega_{br} = \omega_0$, но также и положением ближайшей к ней частоты ФП резонанса. В этом случае может наблюдаться эффект «затягивания» лазерной частоты или её перескока на частоту ближайшего ФП резонанса (Рис. 11б).

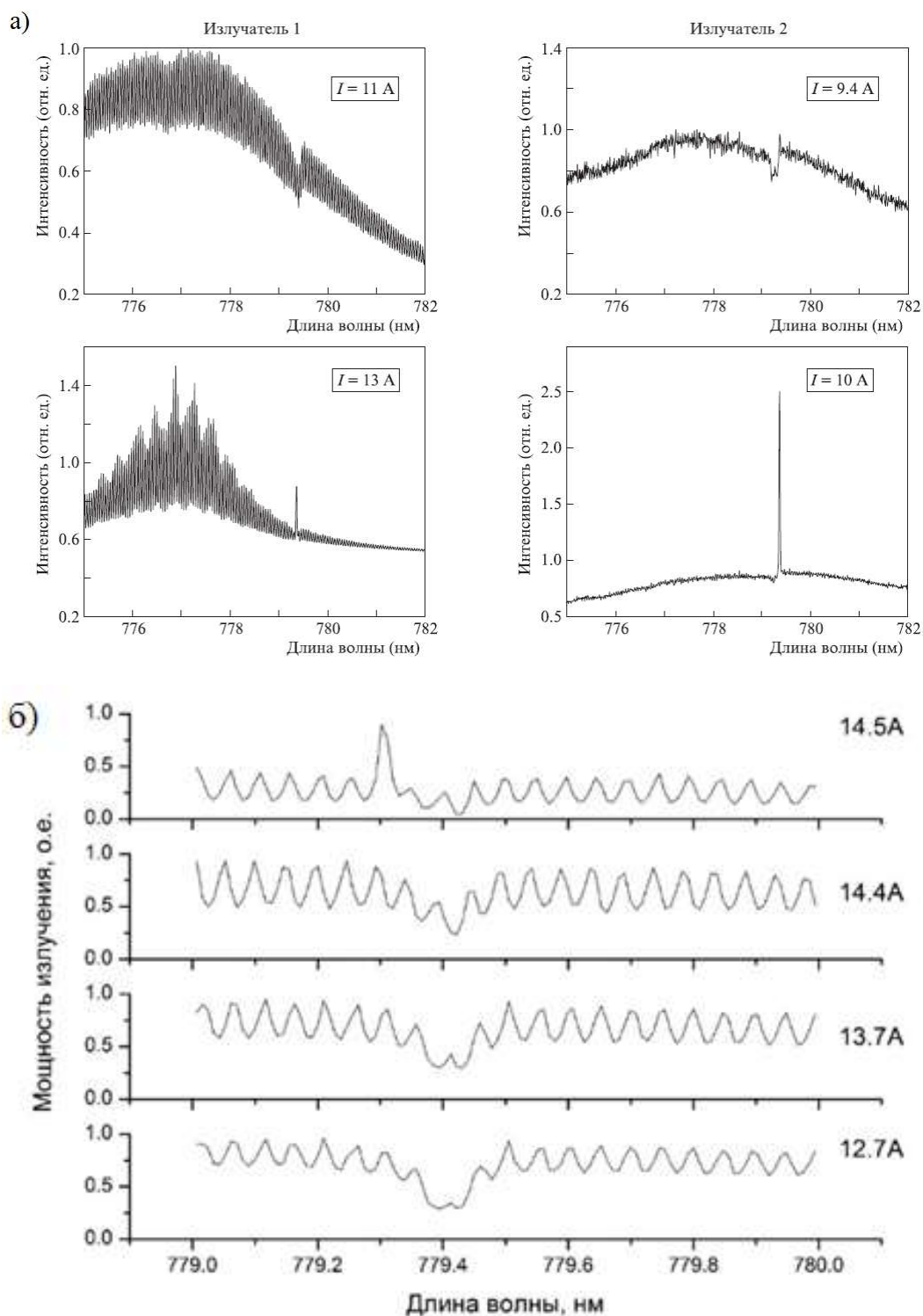


Рис. 11 – а) Спектры излучения двух одиночных ЛД из разных излучателей (отличающихся различным значением остаточного коэффициента отражения передней грани) при токах накачки, предшествующих развитой лазерной генерации, б) переход от усиленного спонтанного излучения в режим лазерной генерации при увеличении тока накачки для излучателя №1.

Спектральное распределение интенсивности усиленного спонтанного излучения ЛД с внешним резонатором, включающим брэгговскую решётку, свидетельствует о структуре продольных мод для оценки устойчивости спектрально узкополосной генерации.

В главе 4 представлен результат теоретического анализа структуры мод ЛЛД с внешним резонатором на основе брэгговской решётки (Рис 12.).

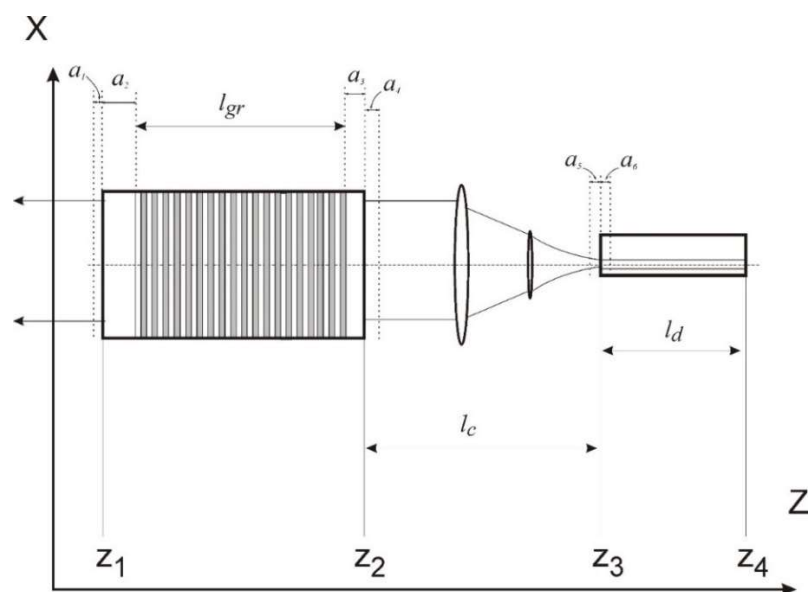


Рис. 12 – Схема лазерного диода с внешним резонатором, содержащим фазовую решётку. Линейные размеры областей: решётки - $(z_1+a_2 < z < z_2-a_3)$, коллимирующей оптики - $(z_2+a_4 < z < z_3-a_5)$, лазерного диода - $(z_3+a_6 < z < z_4)$. Переходные области: первая - область выходной грани решётки $(z_1-a_1 < z < z_1+a_2)$, вторая - входной грани решётки $(z_2-a_3 < z < z_2+a_4)$ и третья – область выходной грани диода $(z_3-a_5 < z < z_3+a_6)$. Резонатор содержит 10 разных ФП резонаторов.

Для нахождения уравнения для собственных частот резонатора был использован аппарат трансляционных матриц 2×2 для преобразования амплитуд пары встречных волн при переходе их через все области. Изменение амплитуды E_1 и E_2 пары плоских волн одной частоты ω при переходе через произвольную область раздела двух однородных сред с показателями преломления n_1 и n_2 :

$$E_1 = \frac{1}{2} \{ e^{-i\omega t} u_1(z) + c. c. \}, u_1(z) = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z}, \quad k_1 = \frac{\omega n_1}{c}$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \{ e^{-i\omega t} u_2(z) + c. c. \}, u_2(z) = A_2 e^{ik_2 z} + B_2 e^{-ik_2 z}, \quad k_2 = \frac{\omega n_2}{c} \quad (3)$$

Линейность волнового уравнения позволяют определить связь между A_1 и B_1 с одной стороны области раздела (слева) и A_2 и B_2 с другой (справа) в общем виде:

$$\begin{pmatrix} A_2 \\ B_2 \end{pmatrix} = \hat{T} \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad \hat{T} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \beta^* & \alpha^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

Определив все матрицы преобразования, возможно представить амплитуды встречных волн A_5 и B_5 в плоскости $z = z_3 + a_6$ в виде:

$$\begin{pmatrix} A_5 \\ B_5 \end{pmatrix} = \hat{T}_{ext} \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} A_0 \\ B_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Матрица преобразования \hat{T}_{ext} встречных волн внешними элементами резонатора приобретёт вид:

$$\hat{T}_{ext} = \hat{T}_3 \times \hat{T}_c \times \hat{T}_2 \times \hat{T}_{gr} \times \hat{T}_1 \quad (5)$$

Отношение амплитуд встречных волн A_5/B_5 можно интерпретировать как некий комплексный коэффициент отражения $R_{ext}(\omega) = A_5/B_5$ от эквивалентного внешнего зеркала, образованного всеми внешними элементами резонатора и собственной выходной гранью диода.

Система трансляционных матриц позволяет анализировать резонатор на Рис. 12 как эквивалентный резонатор ФП. Одно из двух зеркал этого резонатора имеет коэффициент отражения $R_{ext}(\omega)$, а другое R_4 , с протяженной средой между ними длины l_d , показателем преломления n_d , и коэффициентом усиления $g(\omega)$.

Пороговое условие и уравнения для нахождения частот продольных мод ФП резонатора диодного лазера определяются из граничных условий и записываются в виде:

$$R_{ext}(\omega) \cdot R_4 \cdot \exp\{[2i\omega n_d(\omega)/c + g(\omega)] \cdot l_d\} = 1 \quad (6)$$

На Рис. 13 представлены результаты расчётов для внешнего резонатора, в котором коэффициенты отражения $R_{1,2,3} = 0$. Резонатор состоит только из двух зеркал, одно из которых «глухое» ($R_4 = 1$), а другое – фазовая решётка (выходное зеркало).

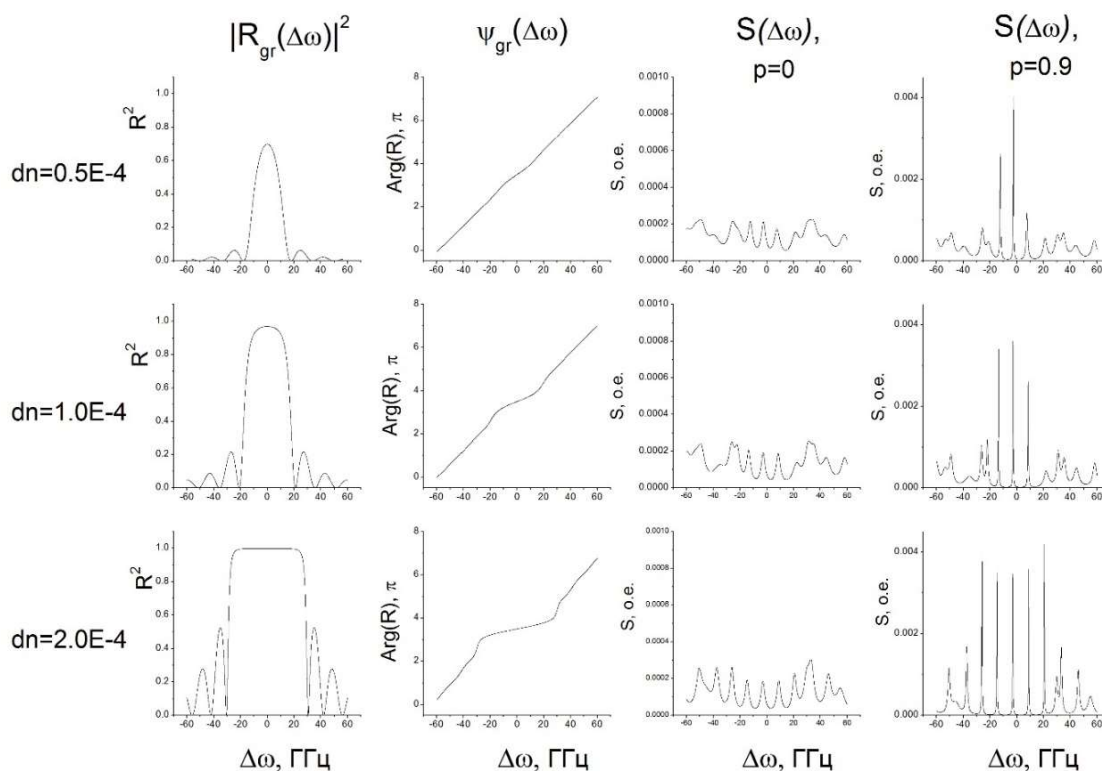


Рис. 13 – Спектральные зависимости $|R_{gr}|^2$ - коэффициента отражения (по интенсивности) и ψ_{gr} - фазового сдвига решётки для различных значений dn - амплитуды модуляции показателя преломления в решётке, а также соответствующие спектры S – усиленного спонтанного излучения для простого двухзеркального резонатора ФП и различных накачек p – значений тока в относительных величинах ($J = J_{прозр} + p \cdot (J_{th} - J_{прозр})$).

Представлена структура мод более сложного резонатора (Рис. 14). Этот резонатор имеет те же параметры, что и предыдущий, за исключением $R_2 = 0,05$, $R_3 = 0,15$. Спектр представлен в основном модами диодного резонатора. Из-за того, что спектральный максимум усиления диода и максимум спонтанного излучения сдвинуты в коротковолновую сторону относительно частоты ω_0 , интенсивность мод диодного резонатора максимальна вблизи этого спектрального максимума усиления. Модуляция огибающей интенсивности этих мод с частотным периодом ~ 214 ГГц – результат взаимодействия двух резонаторов ФП, образованных отражениями R_2, R_3 и диодным резонатором с близкими значениями оптических длин $l_c = 0,55$ см и $l_d \cdot n_0 = 0,525$ см. Такое взаимодействие резонаторов выглядит как «биение» близких частот межмодовых расстояний двух резонаторов.

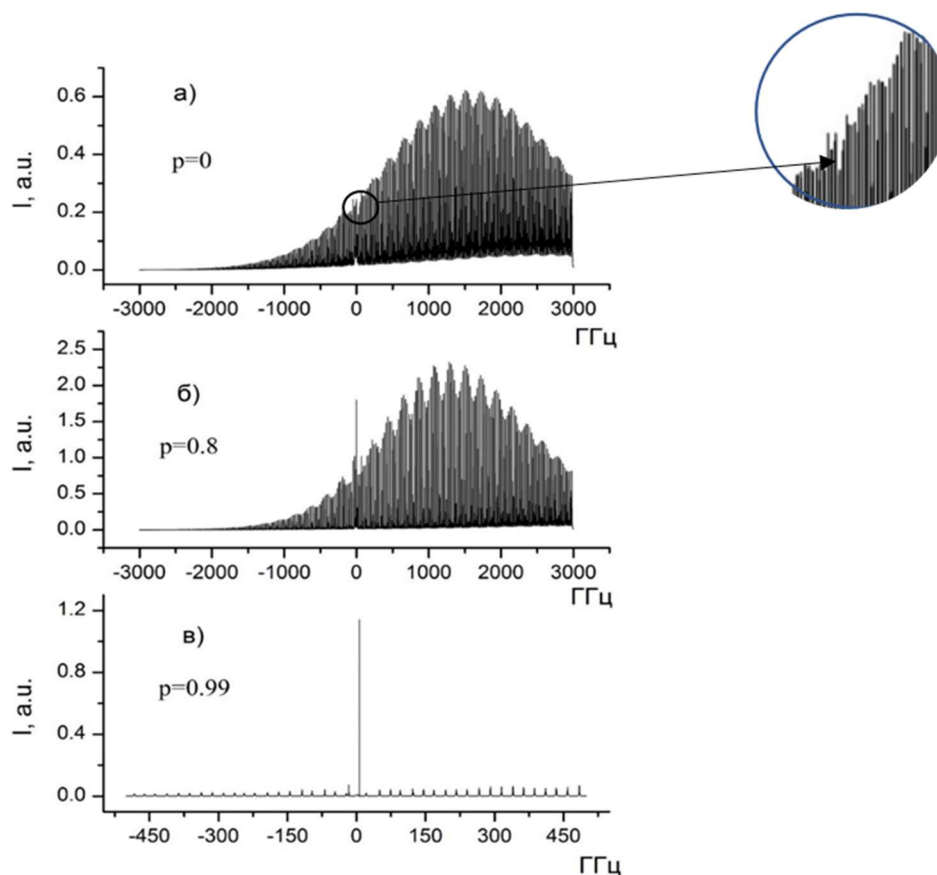


Рис. 14 – Рассчитанные спектры усиленного спонтанного излучения для комбинированного резонатора при различных значениях тока в относительных величинах p , ($J = J_{\text{прозр}} + p \cdot (J_{\text{th}} - J_{\text{прозр}})$).

При токе накачки близком к порогу прозрачности ($J_{\text{прозр}}$) для мод на частотах в окрестности частоты ω_0 усиление отсутствует (Рис. 14а). В спектральной окрестности ω_0 имеет место некоторый «провал» в интенсивности спонтанного излучения. Это результат действия решётки как дополнительного спектрального фильтра, ослабляющего выходное спонтанное излучение из резонатора.

При увеличении тока растет усиление и в окрестности частоты ω_0 . Добротность комбинированного резонатора на частоте ω_0 становится больше добротности мод на других частотах за счет дополнительного отражения от решётки. Поэтому рост усиленного спонтанного излучения в окрестности ω_0 происходит быстрее, чем на всех других частотах (Рис. 14б).

Из Рис. 14 (в) можно видеть, что при дальнейшем приближении тока к порогу лазерной генерации J_{th} в спектре остается только одна доминирующая мода в области брэгговского резонанса. Таким образом, несмотря на отстройку максимума усиления относительно ω_0 , одночастотный режим лазерной генерации будет иметь место только в области брэгговского резонанса. Хотя численные результаты получены в допороговом режиме работы лазера, тем не менее, можно утверждать, что одночастотный режим генерации сохранится и в лазерном режиме, если разница в значениях мнимой части частот для других мод достаточно велика. Спектры, представленные на Рис. 14, находятся в хорошем согласии с соответствующими экспериментальными результатами, описанными в главе 3.

Изменения частот $\Omega_m = \omega_m - \omega_0$ для мод, попадающих в спектральный контур селективности решётки в окрестности ω_0 , при изменении оптической длины l_{dg} ($l_{dg} = n_{dg} \cdot l_d$) - резонатора лазерного диода, приводящей к изменению фазы $0 \leq \delta\varphi_d \leq \pi$ приведены на Рис. 15.

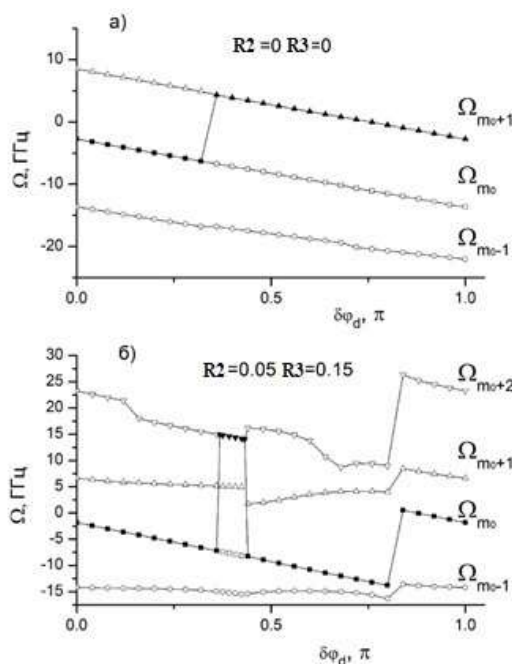


Рис. 15 – Зависимость разности частот $\Omega_m = \omega_m - \omega_0$ для нескольких мод резонатора от девиации фазового набега $\delta\varphi_d$, связанного с изменением оптической длины резонатора лазерного диода. Заполненными (зачерненными) символами обозначены моды с наибольшим значением добротности, ток накачки в относительных величинах $p = 0,99$; а) двухзеркальный ФП резонатор ($R_1, R_2, R_3 = 0$); б) комбинированный четырехзеркальный резонатор ($R_2 = 0,05, R_3 = 0,15$).

Такое изменение частот мод является характеристикой устойчивости спектра излучения лазера по отношению к внешним воздействиям на резонатор. В наиболее простом случае ($R_{2,3} =$

0, Рис. 15а.) наряду с плавным изменением частоты можно видеть вполне ожидаемый «перескок» – скачкообразное изменение добротности моды с переносом максимального значения добротности на соседнюю моду, расположенную на частотном расстоянии ≈ 11 ГГц – межмодовое расстояние для внешнего резонатора. В режиме лазерной генерации такой «перескок» соответствовал бы переключению частоты лазерной генерации при выходе её за границу селективности решётки, т.е. потери устойчивости резонатора.

В более сложном резонаторе (наличие отражений $R_{2,3} \neq 0$, Рис. 15б) показано, что подобный «перескок» может происходить с изменением частоты существенно большим, чем на Рис. 15а. В данном случае он соответствует межмодовому расстоянию диодного резонатора. Также интервал «перескока» – диапазон значений $\delta\varphi_d$ - в котором сохраняется изменённое состояние добротности, существенно меньше, чем в случае простого двухзеркального резонатора (Рис. 15а). Это результат увеличенной скорости спектрального смещения, для добротности мод комбинированного четырёхзеркального резонатора с близкими оптическими длинами.

Наличие отражения от внутренних границ элементов резонатора на уровне $\geq 2.0 \cdot 10^{-3}$ при типичных остальных его параметрах может сопровождаться появлением дополнительных резонансов в структуре спектра мод и тем самым усложнять её с одновременным понижением устойчивости спектрально узкополосной генерации.

В приложении описаны промышленно выпускаемые предприятием ООО «НПП «ИНЖЕКТ» изделия, разработанные на основе исследований, выполненных в данной диссертационной работе.

В ходе выполнения работы разработан составной теплоотвод для брэгговской решётки (Рис. 16а), позволяющий совмещать (с точностью $\leq 0,005$ нм) максимумы длин волн излучений отдельных ЛЛД при их масштабировании, и мощный излучатель - ЛЛД с внешним резонатором на основе брэгговской решётки (Рис. 16б).

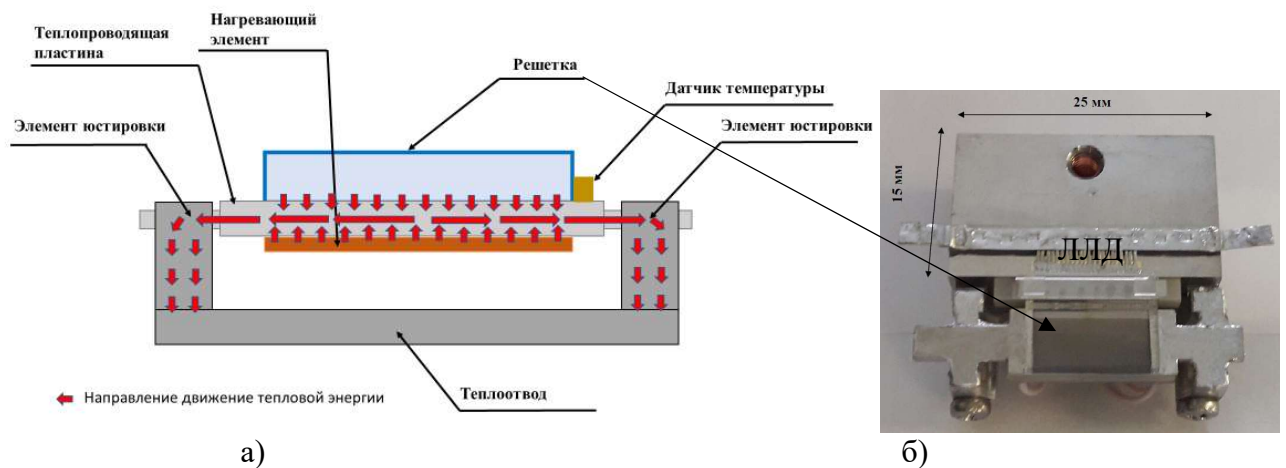


Рис. 16 – Схематическое изображение теплоотвода - терморегулятора брэгговской решётки (а) и внешний вид ЛЛД с внешним резонатором на основе брэгговской решётки (б).

Ширина огибающей спектра (на уровне половины максимума) ЛЛД с внешним резонатором на основе брэгговской решётки составляла 0,08 нм, мощность излучения 100 Вт (Рис. 17).

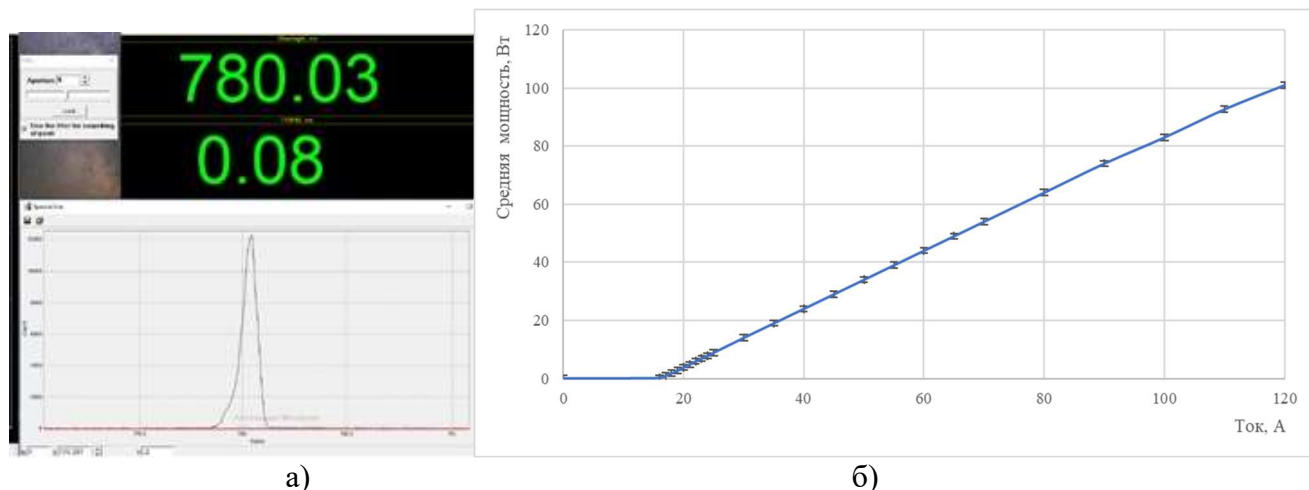


Рис.17 – Типичные спектральные параметры разработанного излучателя, измеренные с помощью спектрального прибора SHR (а) и ватт – амперная характеристика (б)

С использованием разработанного излучателя также были разработаны и внедрены в производство лазерные модули LDM53-794-50-CW-L-ST с мощностью излучения 50 Вт и шириной спектра излучения не более 0,1 нм (а) и LDM34-794-200-CW-L-ST с мощностью излучения 200 Вт и шириной спектра излучения не более 0,1 нм.

Заключение

В результате диссертационной работы были экспериментально и теоретически исследованы, а также разработаны и созданы новые мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных лазерных диодов.

В результате диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1 Разработан метод теоретического расчёта комплексных собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором, основанный на использовании трансляционных матриц 2×2 , который позволяет адекватным образом находить соответствующие значения для резонаторов. Метод позволяет производить расчёт резонатора, содержащего произвольное количество оптических элементов, в том числе и фазовую решётку.

2 Разработана методика для оценки устойчивости спектрально узкополосной генерации по результатам анализа экспериментальной структуры продольных мод спектрального распределения интенсивности усиленного спонтанного излучения диодного лазера с внешним резонатором, включающим брэгговскую решётку.

3 Установлено, что величина расходимости отраженного излучения по медленной оси от брэгговской решётки (порядка 28 мрад при толщине решётки 6 мм) примерно в 4 раза меньше величины расходимости собственного излучения линейки лазерных диодов по медленной оси

(типичное значение 135 мрад по уровню половинной интенсивности). Это обеспечивает одновременно достаточный коэффициент отражения для обеспечения оптического согласования между волноводом диодных лазеров и внешним брэгговским зеркалом с высокой спектральной селективностью и необходимый коэффициент пропускания выходного пучка за счет его повышенной расходимости по медленной оси.

4 Установлено, что на эффективное оптическое согласование между волноводом диодных лазеров и внешней брэгговской решёткой (брэгговским зеркалом) влияет величина «смайла» линейки лазерных диодов (смайл - отклонение от линейного расположения вдоль p-n перехода излучающих областей лазерных диодов в линейке). За счет внедрения в лазерную гетероструктуру слоёв, содержащих фосфор, использования припоя с пластичными свойствами при сборке лазерных диодов на теплоотвод и использования дополнительного процесса обработки медного теплоотвода достигнуты значения смайла $\leq 0,25$ мкм для линейки лазерных диодов шириной 10 мм. Использование цилиндрической асферической микролинзы с фокусным расстоянием 286 мкм в качестве коллимирующей линзы по быстрой оси излучения линеек лазерных диодов с уменьшенным «смайлом» позволяет получать расходимость излучения на уровне 2,4 мрад, что соответствует близкому к дифракционному качеству пучка.

5 Экспериментально показано, что за счёт использования линеек лазерных диодов на основе гетероструктур в системе AlGaInP/GaAs с увеличенным размером излучающей области до уровня $\sim 0,64$ мкм и уменьшенным смайлом до 0,25 мкм в лазере с внешним резонатором, содержащим фазовую решётку, достигаются значения выходной мощности на уровне 100 Вт в спектральной полосе 0,08 нм. При этом доля мощности в спектральном пике для источников мощного спектрально узкополосного излучения достигала уровня 98 %.

6 Определены значения остаточных коэффициентов отражения ($\geq 2.0 \cdot 10^{-3}$) от просветлённых поверхностей элементов внешнего резонатора, при типичных остальных его параметрах, которые могут приводить к появлению дополнительных резонансов в структуре спектра мод и тем самым усложнять ее с одновременным понижением устойчивости спектрально - узкополосной генерации.

7 На основе полученных результатов исследований, выполненных в данной диссертационной работе, на предприятии ООО «НПП «ИНЖЕКТ» разработаны и в настоящее время промышленно выпускаются мощные узкополосные излучатели на основе интегрированных диодных лазеров с брэгговской решёткой, в том числе масштабированные.

Последующие исследования могут быть направлены на выяснение причин, ограничивающих дальнейшее увеличение мощности узкополосных диодных лазеров с высокой яркостью и на поиск экспериментальных и технологических путей их преодоления. Интересно, также расширение области применений разработанного метода расчета комплексных

собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором к другим типам лазеров с многоэлементными резонаторами.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Лазер на парах цезия с диодной накачкой и прокачкой лазерной среды по замкнутому циклу / А.В. Богачев, С.Г. Гаранин, А.М. Дудов, В.А. Ерошенко, С.М. Куликов, Г.Т. Микаелян, **В.А. Панарин**, В.О. Паутов, А.В. Рус, С.А. Сухарев // Квантовая электроника. - 2012. - Т. 42. - N 2. - С. 95-98. DOI: 10.1070/QE2012v042n02ABEN014734

2. Линейки лазерных диодов на основе гетероструктур AlGaPAs/GaAs с компенсацией механических напряжений / А.А. Мармалюк, М.А. Ладугин, И.В. Яроцкая, **В.А. Панарин**, Г.Т. Микаелян // Квантовая электроника. - 2012. - Т. 42. - N 1. - С. 15-17. DOI: 10.1070/QE2012v042n01ABEN014737

3. Мощный источник спектрально-узкополосного излучения на основе интегрированных лазерных диодов с внешним резонатором / **В.А. Панарин**, Г.Т. Микаелян, И.В. Галушка, Н.Н. Беглецова, И.А. Зимин, А.Е. Дракин, Н.В. Дьячков, Т.И. Гущик, А.П. Богатов // Квантовая электроника. - 2022. - Т. 52. - N 9. - С. 789-793. DOI: 10.3103/S1068335623130080

4. Улучшение параметров вольт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров InGaAs/AlGaAs/GaAs ($\lambda = 940\text{--}980$ нм) с расширенным асимметричным волноводом / Н.А. Волков, К.Ю. Телегин, Н.В. Гультиков, Д.Р. Сабитов, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, А.А. Падалица, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Л.И. Шестак, А.А. Козырев, **В.А. Панарин** // Квантовая электроника. - 2022. - Т. 52. - N 2. - С. 179-181. DOI: 10.1070/QEL17987

5. Структура аксиальных мод диодного лазера с внешним резонатором, содержащим объемную фазовую решётку / А. П. Богатов, А. Е. Дракин, Н.В. Дьячков, Г.Т. Микаелян, **В.А. Панарин** // Квантовая электроника. - 2023. - Т. 53. - N 7. - С. 519-526. DOI: 10.3103/s1068335623601954

6. Мощные линейки лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур (Al)GaAs/AlGaAs/GaAs и GaAsP/GaInP/GaAs / Н. В. Гультиков, К. Ю. Телегин, А. Ю. Андреев, Л.И. Шестак, **В.А. Панарин**, М. Ю. Старынин, А. А. Мармалюк, М. А. Ладугин // Квантовая электроника. – 2023. – Т. 53. – №. 8. – С. 667-671. DOI: 10.3103/S1068335623602224

Результаты работы были доложены на следующих научных конференциях:

1. Лазер на парах рубидия с поперечной накачкой лазерными диодами и протоком активной среды / И.В. Андреев, А.В. Богачев, С.Г. Гаранин, В.А. Ерошенко, Г.Н. Качалин, Н.А. Кирдяев, С.М. Куликов, С.А. Кунин, С.Н. Певный, Д.Н. Пивкин, **В.А. Панарин**, А.С. Сафронов, С.А. Сухарев // Молодежь в науке: сборник докладов 13-й научно-технической конференции (28-30 октября 2014 г.) / ФГУП "Российский федеральный ядерный центр -

Всероссийский науч.-исслед. ин-т экспериментальной физики" (РФЯЦ ВНИИЭФ); [авт.- сост.: Н. Н. Попова, Е. В. Забавин]. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. - 2015. - 659 с.

2. **Панарин В.А.** Диодные лазеры: разработка, производство, применение / В.А. Панарин, Г.Т. Микаелян, И.В. Галушка // Тринадцатая Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: Сборник докладов (27-29 сентября 2022 г.) / Под общ. ред. С. Г. Гаранина. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2023.-199с.

3. Мощные непрерывные линейки лазерных диодов (770-880нм) с КПД до 70%, изготовленные на основе Al-free гетероструктур / М. А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А. Ю. Андреев, И. В. Яроцкая, Н. В. Гультиков, Л. И. Шестак, **В. А. Панарин** // IX Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур: сборник тезисов докладов (29 ноября – 1 декабря 2023 г.) / Москва: ФИАН, 2023.-104с.

4. Мощные полупроводниковые лазеры – перспективные изделия полупроводниковой фотоники / Д.А. Автайкин, А.А. Козырев, М.А. Копёнкин, А.И. Куницкий, Г.Т. Микаелян, **В.А. Панарин**, С.Н. Соколов, М.Ю. Старынин, Л.И. Шестак // 1-ая Международная конференция Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе: Тезисы докладов (23 – 27 мая 2022 г.) / Минск: Беларусь, 2022.-50с.

5. Современные полупроводниковые лазеры и их применения / О.В. Коренченко, **В.А. Панарин**, С.Н. Соколов, М.Ю. Старынин // 2-ая Международная конференция Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе: Тезисы докладов (20 – 24 мая 2024 г.) / под ред. Г.И. Рябцева, З.Н. Соколовой, Е.А. Невар. - Минск: Институт физики НАН Беларусь, 2024.-82с.

Патенты:

1. Патент 229684 РФ, Н 01 S 5/022. Лазерный модуль с волоконным выходом излучения высокой энергетической яркости / Е. В. Борисов, Л.С. Молодых, **В.А. Панарин** и др. – 2024127646; заявл. 19.09.2024; опубл. 21.10.2024, Бюл №30