

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.223.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
ИМ. А. М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»,
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 02 июня 2025 г. № 26

О присуждении Панарину Вадиму Александровичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров» по специальности 1.3.19. Лазерная физика принята к защите 17 марта 2025 г. (протокол заседания № 22) диссертационным советом 24.1.223.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (119991 ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, д. 38, приказ о выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» от 12.12.2023 г. № 2290/нк).

Соискатель Панарин Вадим Александрович, 29 декабря 1976 года рождения. В 1999 году соискатель с отличием окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Материалы и компоненты твердотельной электроники» с присвоением квалификации инженер - физик.

Соискатель работает в должности заместителя генерального директора по производству – главного конструктора Общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Инжект» Госкорпорации "Росатом".

Диссертация выполнена в конструкторско-производственном отделении Общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Инжект» Госкорпорации "Росатом".

Научный руководитель – Гаранин Сергей Григорьевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, генеральный конструктор по лазерным системам – заместитель директора по лазерно-физическому направлению – директор института лазерно-физических исследований (ИЛФИ) Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (РФЯЦ – ВНИИЭФ) Госкорпорации "Росатом".

Официальные оппоненты:

Антипов Олег Леонидович, доктор физико - математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 333 отдела 330 Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Пихтин Никита Александрович, кандидат физико - математических наук, заведующий лабораторией полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

дали положительные отзывы о диссертации со следующими замечаниями:

1. Замечания Антипова О.Л.:

1) Теоретические расчёты коэффициента отражения объёмной решётки выполнены в плоско-волновом приближении по идеологии, близкой к ранее применённой Когельником для расчетов двухволнового взаимодействия в голографии. Однако, при экспериментальной реализации устройства пучок излучения достаточно сильно отличается от плоской волны, особенно в направлении «медленной оси» из-за поперечной многомодовости излучения. В связи с этим можно было бы провести оценку влияния кривизны волнового фронта пучка (или наклонных лучей) на селективность решётки и согласование её отражения с модой лазерного диода.

2) Хотелось бы видеть более полный анализ влияния нагрева объёмной решётки на характеристики излучения диодного лазера с такой решёткой. Так, например, в результате экспериментальных измерений выявлен дрейф длины волны излучения диодной линейки при росте тока накачки. В качестве гипотезы указано возможное влияние температурных изменений на период решётки, однако оценки этого эффекта отсутствуют.

3) Не приведено описание технологии создания объёмной брегговской решётки, которая использована в качестве внешнего селективного зеркала в настоящей работе. В связи с этим представляет также интерес сравнение технологии создания таких решёток другими группами (в частности, компанией “OptiGrate”) и характеристик аналогичных устройств с такими решётками.

4) В целом, диссертация написана достаточно понятным и простым языком. Однако, в тексте встречаются отдельные опечатки и стилистические погрешности. Например, довольно сложно и не очень понятно, на мой взгляд, сформулировано положение 2, выносимое на защиту.

2. Замечания Пихтина Н.А.:

1) Теоретическое моделирование линейки диодных лазеров с внешним резонатором, содержащим фазовую решётку, не распространено на надпороговый режим. Рассмотрена лишь в режиме усиленного спонтанного излучения.

2) По оформлению диссертации следует отметить разброс в размерах иллюстраций, нет единого формата, некоторые надписи мелкие. Редко, но встречаются несогласованные слова в предложениях и опiski в словах (см., например, стр. 18). Смысл абзаца, начинающегося на стр. 18 и заканчивающегося на стр. 19, вообще не понятен.

3) Не сразу понятен вывод на стр. 57: «размер излучающей области гетероструктуры должен быть не менее 0,5 мкм». Следует пояснить, о каком размере и по какому направлению идет речь. Тем более, что далее в тексте встречается фраза «размер излучающей области 200 мкм».

Ведущая организация Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М. Ф. Стельмаха», г. Москва, в своем положительном заключении, подписанным Ладугиным Максимом Анатольевичем, доктором физико-математических наук, начальником научно-производственного комплекса Акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М. Ф. Стельмаха», и утвержденным Генеральным директором Акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М. Ф. Стельмаха» Кузнецовым Е. В., указала, что диссертация Панарина Вадима Александровича на тему «Мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров», представленная к защите на соискание учёной степени кандидата физико - математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика, является законченной научно-квалификационной работой. По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости

полученных результатов представленная работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по действующему Положению о присуждении учёных степеней, утверждённому постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (ред. от 16.10.2024), а её автор Панарин Вадим Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика. Вместе с тем, работа не лишена некоторых недочетов и упущений:

- 1) В работе целесообразно было бы внести больше сокращений и представить перечень сокращений.
- 2) На стр. 43 диссертационной работы представлены причины появления эффекта «смайла». Одной из причин является «первоначальный изгиб самой лазерной гетероструктуры из-за разницы постоянных кристаллической решётки её слоев». Затем на стр. 44 представлено сравнение разных систем материалов для гетероструктуры. Однако из данного сравнения не ясно, почему приоритет отдан именно Al-free системе материалов. Известно, что по сравнению с AlGaAs системой Al-free имеет более низкую теплопроводность, что может негативно сказаться на отводе выделяемой тепловой мощности. Кроме этого, не до конца раскрыто, почему внедрение в гетероструктуру слоев, содержащих фосфор, уменьшает эффект «смайла».
- 3) В табл. 2.2 «Основной состав изначально используемой гетероструктуры» на стр. 60-61 текста диссертации перепутаны местами материалы волноводных $(\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P})$ и эмиттерных $[\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}]_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ слоев.
- 4) К сожалению, в работе не представлены результаты ресурсных испытаний разработанных лазерных диодных модулей.
- 5) В работе имеются некоторые оформительские ошибки и большой разброс размеров иллюстраций.

Вышесказанные замечания не снижают достоинств диссертационной работы Панарина Вадима Александровича, ее основные положения достаточно полно раскрыты в автореферате и публикациях диссертанта.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 6 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ. Все они входят в международные базы Web of Science и Scopus. В рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ по мощным источникам спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров, в указанных работах соискатель принял непосредственное участие при постановке и проведении теоретических и экспериментальных работ, обработке экспериментальных данных и оформлении (написании) публикаций.

На базе разработанных методов и устройств создан объект интеллектуальной собственности, защищенный патентом РФ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах.

Список наиболее значительных работ:

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/QE2012v042n02ABEH014734
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/QE2012v042n01ABEH014737
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 ($\lambda = 940-980$ 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 объёмную 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

На автореферат поступили 4 отзыва. Все отзывы положительные, но есть некоторые замечания:

1. От Качалина Григория Николаевича, доктора физико-математических наук, заместителя директора филиала МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Сарове, главного научного сотрудника ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ»:

- 1) В автореферате не представлены результаты ресурсных испытаний разработанных изделий;
- 2) Имеются оформительские ошибки и разброс геометрических размеров иллюстраций.

2. От Дракина Александра Евгеньевича, кандидата физико - математических наук, ведущего научного сотрудника ОКРФ ФИАН им П. Н. Лебедева:

- 1) Из текста автореферата не следует, проводилось ли изучение влияния несимметричности дальнего поля излучения на параметры составного резонатора с брэгговским зеркалом.
- 2) В автореферате встречаются лексические и стилистические ошибки в тексте (например, «на настоящее время» вместо «в настоящее время»).

3. От Леоновича Бориса Наумовича, доктора технических наук, заместителя генерального директора по научной работе ООО «Лассард»:

- 1) Из текста автореферата невозможно выяснить, какое направление критично к воздействию внешних условий для эффективной обратной связи во внешнем резонаторе (параллельное или перпендикулярное к $p - n$ переходу).
- 2) В тексте встречаются грамматические ошибки и опечатки (например, «на настоящее время» вместо «в настоящее время»).

4. От Шестакова Александра Валентиновича, кандидата физико - математических наук, главного специалиста ООО НТЦ «ЭЛС – 94»

- 1) Отсутствие в автореферате данных по результатам ресурсных испытаний;
- 2) Мелкие оформительские ошибки.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой степенью их компетенции в вопросах лазерной физики, подтвержденной большим числом публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, что позволяет им оценить достоверность полученных результатов и научно-практическую значимость рассматриваемой в диссертации проблемы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана новая 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.

Предложен метод теоретического расчёта комплексных собственных частот продольных мод лазерного диода 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.

Доказано, что спектральное распределение интенсивности усиленного спонтанного излучения ЛД с внешним резонатором, включающим брэгговскую решётку, позволяет оценить устойчивости спектрально узкополосной генерации.

Предложен метод уменьшения значений отклонения отдельных излучающих областей от линейного их расположения в линейке лазерных диодов, позволяющий получить величину смайла менее 0,25 мкм и достичь расходимости излучения линейки лазерных диодов после коллимации на уровне близкому к дифракционному качеству пучка.

Разработаны и созданы новые мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных лазерных диодов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказано, что методика расчёта частот и добротности продольных мод внешнего многоэлементного резонатора лазерного диода, 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.

Изложены следующие положения:

- метод уменьшения значений отклонения излучающих областей линейки лазерных диодов позволяет достигать близкое к дифракционному качеству пучка в вертикальном направлении;
- применение брэгговской решётки с оптимальной эффективностью (50÷70) % в качестве выходного зеркала резонатора диодного лазера обеспечивает получение необходимой спектрально узкополосной генерации (0,1 нм и менее) и высокий коэффициент пропускания выходного пучка;
- методика расчёта частот и добротности продольных мод внешнего многоэлементного резонатора диодного лазера, основанная на использовании трансляционных 2×2 матриц для амплитуд встречных волн, позволяет моделировать спектральную структуру мод резонатора при всех практически значимых его параметрах;
- при остаточном отражении от поверхностей элементов внешнего резонатора более 2×10^{-3} происходит понижение устойчивости спектрально узкополосной генерации и появление дополнительных резонансов в спектральном распределении интенсивности, приводящих к снижению эффективности работы систем диодной накачки.

Показано, что применение брэгговской решётки с оптимальной эффективностью (50÷70) % в качестве выходного зеркала резонатора лазерного диода обеспечивает одновременно необходимую спектрально узкополосную генерацию (0,1 нм и менее) и высокий коэффициент пропускания выходного пучка (более 70 %).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработан специальный термостабилизатор для брэгговской решётки, позволяющий совмещать (с точностью $\leq 0,005$ нм) максимумы длин волн излучений отдельных линеек лазерных диодов при их масштабировании в мощный излучатель.

Созданы мощные компактные спектрально узкополосные излучатели диодных лазеров на основе проведенных в настоящей работе исследований. Предприятием ООО «НПП «ИНЖЕКТ» выпускаются изделия, разработанные на основе результатов исследований, выполненных в данной диссертационной работе.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

В работе показано, что физические параметры излучающей области мощной линейки лазерных диодов во внешнем селективном резонаторе, такие как её изгиб и поперечный размер оптического пучка, определяют эффективность оптического согласования линейки с внешней частью

резонатора. 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.

Разработан метод расчёта комплексных собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором, основанный на использовании трансляционных матриц 2×2 . Метод использован для анализа многоэлементного резонатора, включающего фазовую решётку и микрооптические элементы, такие как коллиматор быстрой оси (вертикальной расходимости – FAS).

Впервые проведены экспериментальные исследования линейки лазерных диодов 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.

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 - n перехода (смайла) до значения $\leq 0,25$ мкм.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что все выводы диссертации обоснованы и подтверждены сравнением полученных теоретических результатов с экспериментальными и их практической реализацией. Исследования и разработки проводились на современном научно-технологическом оборудовании с использованием современных средств вычисления и применением специально разработанных экспериментальных установок. Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях и представлены соискателем на российских и международных конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в постановке и проведении экспериментальных и теоретических работ по исследованию физических процессов, происходящих в мощных линейках лазерных диодов в составном резонаторе с внешним спектрально селективным зеркалом. Соискатель принимал непосредственное участие в определении требуемых технических характеристик лазерных гетероструктур, брэгговских решёток и микрооптических элементов, входящих в состав мощного спектрально узкополосного излучателя. Соискатель разработал экспериментальные

установки, выполнил экспериментальные и теоретические исследования, обработал и проанализировал совместно с руководителем полученные результаты. Панарин В. А. непосредственно выполнил расчёты и разработал основные узлы мощных лазерных источников спектрально узкополосного излучения, осуществлял техническое сопровождение их изготовления и принимал участие в разработке технологии изготовления. Материалы для публикаций подготовлены совместно с научным руководителем и соавторами.

Соискатель Панарин Вадим Александрович ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, замечания ведущей организации, оппонентов и на замечания, приведённые в отзывах на автореферат. Согласился с некоторыми замечаниями и привёл собственную аргументацию.

На заседании 02 июня 2025 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития лазерной физики и заключающееся в определении физических механизмов, возникающих в мощных источниках спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров, присудить Панарину Вадиму Александровичу учёную степень кандидата физико - математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: «за» 17, «против» 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета
академик РАН



Гарнов
Сергей
Владимирович

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Осадчий
Александр
Валентинович

02 июня 2025 г.