

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор
АО «НИИ «Полюс»
им. М.Ф. Стельмаха»
Е.В. Кузнецов

«30» 04 2025 г.

ОТЗЫВ

**ведущей организации – Акционерного общества «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха»
на диссертационную работу
Панарина Вадима Александровича
«Мощные источники спектрально узкополосного излучения на
основе интегрированных диодных лазеров»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.**

Диссертационная работа Панарина Вадима Александровича посвящена исследованиям, направленным на определение физических механизмов, возникающих в мощных источниках спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров (линеек лазерных диодов), а также практическому применению полученных результатов.

Основными направлениями исследований автора являются изучение ряда физических механизмов в мощных диодных лазерных источниках излучения для выявления физических условий, ответственных за генерацию в них мощного спектрально узкополосного излучения, проведение теоретических и экспериментальных исследований мощных линеек лазерных диодов в резонаторе с селективным зеркалом, представляющим собой объемную брэгговскую (фазовую) решётку, определение оптимальных параметров составляющих элементов излучателя, связанных с интеграцией единичного диодного лазера в линейки лазерных диодов и с интеграцией линеек лазерных диодов в мощный спектрально узкополосный излучатель при их масштабировании, а также проведение практической апробации полученных результатов.

Основные результаты диссертационной работы:

- Разработан оригинальный метод теоретического расчёта комплексных собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором. Метод позволяет производить расчёт резонатора, содержащего произвольное количество оптических элементов, в том числе и фазовую решётку;

- Разработана методика для оценки устойчивости спектрально узкополосной генерации диодного лазера с внешним резонатором, включающим брэгговскую решётку;

- Установлено, что величина расходимости отраженного излучения по медленной оси от брэгговской решётки примерно в 4 раза меньше величины расходимости собственного излучения линейки лазерных диодов. Этим объясняется достаточно большой коэффициент отражения для обеспечения оптического согласования между волноводом диодных лазеров и внешним брэгговским зеркалом, достаточно хороший коэффициент пропускания выходного пучка;

- Установлено, что на эффективное оптическое согласование между волноводом диодных лазеров и внешней брэгговской решёткой влияет величина «смайла» линейки лазерных диодов. За счет внедрения в лазерную гетероструктуру слоёв, содержащих фосфор, технологических новшеств при сборке лазерных диодов на теплоотвод и в технологическом процессе подготовки медного теплоотвода-контактной пластины, достигнуты значения смайла менее 0,25 мкм для линейки лазерных диодов шириной 10 мм. Указанные технологические приёмы и использование цилиндрической асферической микролинзы с фокусным расстоянием 286 мкм в качестве коллимирующей линзы по быстрой оси уменьшили расходимость излучения до 2,4 мрад, что близко к дифракционному качеству;

- Достигнуты значения выходной мощности линеек лазерных диодов на уровне 100 Вт в узкой спектральной полосе 0,08 нм. Данный результат получен за счет использования 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;

- Определены значения остаточных коэффициентов отражения от просветлённых поверхностей элементов внешнего резонатора, которые могут приводить к появлению нежелательных резонансов в спектральном распределении излучения.

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

Во введении обосновывается актуальность проводимых в данной диссертационной работе исследований, формулируются 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 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 линеек лазерных диодов. Показано влияние разогрева брэгговской решётки и изгиба излучающей области линеек лазерных диодов – смайла на работу источника мощного спектрально узкополосного излучения.

В главе 2 исследованы критические параметры линеек лазерных диодов 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 и величины отклонения оптического пучка лазера от оптической оси цилиндрической линзы (так называемый смайл). Для уменьшения смайла предложен и экспериментально реализован метод проведения техпроцесса сборки лазерных линеек, включающий в себя использование припоя с пластичными свойствами при сборке лазерных диодов, использование дополнительного техпроцесса обработки медной контактной пластины (многоступенчатая химико – механическая полировка). Применение указанных техпроцессов позволило уменьшить величину смайла ниже 0,25 мкм для линеек лазерных диодов шириной 10 мм.

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

спектральные характеристики лазерных диодов 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 лазерных диодов, отличающихся разными значениями остаточного коэффициента отражения передней грани.

В главе 4 представлен проведённый теоретический анализ структуры мод лазерных диодов с внешним резонатором, позволяющий производить расчёт резонатора, содержащего произвольное количество оптических элементов, в том числе и фазовую решётку.

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

Следует подчеркнуть, что полученные в диссертации результаты представлены последовательно и изложены логично. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

Вместе с тем работа не лишена некоторых недочетов и упущений:

- В работе целесообразно было бы внести больше сокращений и представить перечень сокращений;
- 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 слоёв». 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 слоёв, содержащих фосфор, уменьшает эффект «смайла»;
- 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 ($[\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}]_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$) слоёв;
- К сожалению, в работе не представлены результаты ресурсных испытаний, разработанных лазерных диодных модулей;
- В работе имеются некоторые оформительские ошибки и большой разброс размеров иллюстраций.

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

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Тема диссертации Панарина Вадима Александровича важна и актуальна и относится к специальности 1.3.19. Лазерная физика.

2. Основные результаты являются новыми. Решён ряд достаточно трудных задач в области лазерной физики в части мощных источников спектрально узкополосного излучения. Были экспериментально и теоретически исследованы, а также разработаны и созданы новые мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных лазерных диодов

3. Полученные результаты опубликованы в 6 работах в ведущих рецензируемых журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ, представлены на 5 международных и Всероссийских научных конференциях, а также отражены в одном РИД.

4. В целом диссертация является завершённым научным исследованием, вносящим заметный вклад в данный раздел современной лазерной физики.

5. Представленные в диссертации результаты будут востребованы в дальнейших изысканиях при исследовании, разработке и создании мощных источников спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров. Она может быть интересна для научных и образовательных учреждений, в которых ведутся исследования мощных источников спектрально узкополосного излучения, а также для промышленных предприятий. К их числу относятся РФЯЦ «ВНИИЭФ», ООО «НПП «Инжект», организации холдинга «Швабе».

6. Диссертационная работа Панарина Вадима Александровича «Мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые решение актуальной научной задачи – определение физических механизмов, возникающих в мощных источниках спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров (с практическим применением полученных результатов), имеющей существенное значение для специальности 1.3.19. Лазерная физика.

На основании вышеприведённого можно заключить, что диссертация Панарина Вадима Александровича 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, утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (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.

Диссертация Панарина Вадима Александровича обсуждена, и отзыв на диссертационную работу обсужден и утвержден на заседании секции НТС «Полупроводниковые приборы» АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха» (протокол № 6 от 23.04.2025) в научно-производственном комплексе «Квантовая электроника и радиофотоника».

Отзыв составил:

Ладугин Максим Анатольевич,
начальник научно-производственного
комплекса,
доктор физико-математических наук

Ладугин М.А. /

30.04.2025

Сведения о ведущей организации: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха»

Адрес: 117342, г. Москва, ул., Введенского, д. 3, корп. 1

Тел.: +7 495 333-00-03

Электронная почта: bereg@niipolyus.ru

Сайт: <https://niipolyus.ru>