

ОТЗЫВ

Официального оппонента, кандидата физико-математических наук,
заведующего лабораторией полупроводниковой люминесценции и
инжекционных излучателей

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

Российской академии наук

Пихтина Никиты Александровича,

на диссертацию 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.

Актуальность работы определяется необходимостью создания мощных (десятки и сотни ватт) диодных лазерных излучателей с контролируемым узкополосным спектром.

В настоящее время в качестве перспективных сред для использования в мощных лазерах с высоким оптическим качеством луча рассматриваются активные газовые среды на основе паров щелочноземельных элементов или атомов инертных газов. Для эффективной оптической накачки таких сред требуются источники спектрально узкополосного излучения с огибающей шириной не более 0,1 нм. А для достижения уровней мощности узкополосного излучения в несколько сотен ватт, с хорошим качеством луча, необходимы мощные узкополосные (менее, чем полоса поглощения газовых сред) источники оптической накачки.

Аналогичные требования предъявляются к излучению для спин-обменной оптической накачки благородных газов в перспективных устройствах магнитно-резонансной спектроскопии.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– выявлены физические параметры излучающей области мощной линейки лазерных диодов, а именно: её изгиб и поперечный размер

оптического пучка, определяющие эффективность оптического согласования с внешней частью резонатора;

- разработан метод расчёта комплексных собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором (трансляционные матрицы 2×2), который использован для анализа многоэлементного резонатора с фазовой решёткой и коллиматором быстрой оси (вертикальной расходимости – FAS);

- показана необходимость оптимизации эффективности фазовой решётки для устойчивого контроля частоты генерации линейки лазерных диодов во внешнем резонаторе ввиду того, что с одной стороны, повышенная эффективность решётки уменьшает её спектральную селективность, а с другой – низкая эффективность влечёт понижение устойчивости спектра из-за больших перескоков частоты генерации;

- впервые проведены экспериментальные исследования линейки диодных лазеров с внешним резонатором, содержащим фазовую решётку в режиме усиленного спонтанного излучения и проведено его теоретическое моделирование;

- проведено теоретическое моделирование спектра усиленного спонтанного излучения и показана корреляция рассчитанного спектра с полученными экспериментальными результатами, а также проведен анализ структуры продольных мод экспериментального спектра усиленного спонтанного излучения, что 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 p-n перехода (смайл – smile) до значения не более 0,25 мкм.

Теоретическая значимость работы состоит в создании метода расчёта 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 работы состоит в том, что результаты проведенных в настоящей работе исследований легли в основу создания

мощных компактных спектрально узкополосных излучателей диодных лазеров.

Результаты исследований, проведенных в настоящей работе, а именно, возможность создания мощных компактных спектрально узкополосных излучателей диодных лазеров с возможностью масштабирования успешно реализованы. В настоящий момент ООО «НПП «Инжект» производит линейку продукции, разработанной благодаря внедрению этих научных результатов в производственный процесс. Достигнут уровень мощности при масштабировании более 2 кВт.

Результаты исследований также были применены при создании на предприятии ООО «НПП «Инжект» лазерного диодного модуля для спин-обменной оптической накачки благородных газов. Эффект используется для создания перспективных систем магнитно-резонансной томографии.

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

Во введении обоснована актуальность проводимых в данной диссертационной работе исследований, сформулированы цели и задачи работы.

В главе 1 представлен аналитический обзор литературы, относящейся к выбранной теме.

В главе 2 исследованы критические параметры линейки лазерных диодов, влияющие на оптические потери во внешнем резонаторе.

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

В главе 4 изложены результаты теоретического анализа структуры мод линейки лазерных диодов с внешним резонатором.

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

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы и даны рекомендации по направлениям дальнейших исследований.

Панарин В. А. в результате проведения диссертационной работы разработал метод теоретического расчёта комплексных собственных частот продольных мод диодного лазера с внешним резонатором, основанный на использовании трансляционных матриц. Данный метод позволяет производить расчёт резонатора, содержащего произвольное количество оптических элементов, в том числе и фазовую решётку.

Панариным В.А. разработана методика для оценки устойчивости спектрально узкополосной генерации по результатам анализа экспериментальной структуры продольных мод спектрального распределения интенсивности усиленного спонтанного излучения.

Панариным В.А. 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.

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.

Соискателем 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.

Панарин В.А. предложил рекомендации по направлениям дальнейших исследований, которые могут быть направлены на выяснение причин, ограничивающих дальнейшее увеличение мощности узкополосных диодных лазеров с высокой яркостью.

Основываясь на вышесказанном, обоснованность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в настоящей диссертационной работе, не вызывают сомнений.

Достоверность методов исследования данной диссертационной работы основана на использовании современного научно-технологического оборудования, включающего современные метрологические и вычислительные средства.

Достоверность и апробация результатов диссертации основана на анализе выполненных ранее работ и подтверждается сравнением полученных

теоретических результатов с экспериментальными, а также подтверждаются согласованностью полученных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Все результаты, полученные в настоящей работе, имеют реальное практическое применение.

Основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и представлены соискателем на российских и международных конференциях. По результатам работы запатентована полезная модель.

Апробация результатов была осуществлена в процессе опытно-конструкторских работ на экспериментально-производственной базе ООО «НПП «ИНЖЕКТ», что подтвердило их практическую применимость и позволило организовать выпуск новых изделий.

К диссертационной работе имеются некоторые замечания:

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»

Вышеперечисленные замечания носят частный характер и никоим образом не влияют на общую положительную оценку работы. Результаты диссертационной работы безусловно представляют научную и практическую ценность.

Автореферат соискателя полностью и адекватно отражает содержание диссертационной работы. По теме диссертационной работы Панарин В.А. имеет 6 опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и один патент РФ на полезную модель.

Диссертационная работа «Мощные источники спектрально узкополосного излучения на основе интегрированных диодных лазеров» Панарина Вадима Александровича является самостоятельной и завершённой научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и

практической ценностью. Работа соответствует всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 16.10.2024), предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Автор диссертационной работы, Панарин Вадим Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Пихтин Никита Александрович,
кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.10. Физика полупроводников, заведующий лабораторией полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

Телефон (812) 297-2245, эл. почта: post@mail.ioffe.ru

_____ Пихтин Н.А.

Дата, подпись

29.04.2025

Подпись Пихтина Н. А. удостоверяю

29.04.2025