Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Центр физики наногетероструктур Лаборатория полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Разработка и исследование высокоярких лазерных линеек ближнего ИК-диапазона

> Аспирант: Крючков Владислав Артемович Направление: 03.06.01 Физика и астрономия Профиль: 1.3.11 Физика полупроводников

Санкт-Петербург 2025

оглавление

Оглавление2
Общая характеристика работы3
Основные результаты работы3
Список публикаций по теме исследования 4
Введение5
1. Литературный обзор7
Термины и определения7
Подходы, направленные на повышение выходной оптической
мощности9
Подходы, направленные на снижение латеральной расходимости 10
Подходы, направленные на снижение вертикальной расходимости 17
Заключение по литературному обзору 19
2 Повышение выходной оптической мощности и улучшение качества
луча в вертикальном направлении
Исследуемые образцы 21
Результаты экспериментов23
Заключение по разделу29
3 Улучшение качества луча в латеральном направлении
Исследуемые образцы 30
Эксперименты
Заключение по разделу
Заключение
Список использованных источников 40

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Тема работы: "Разработка и исследование высокоярких лазерных линеек ближнего ИК-диапазона"

Объект исследования – мощные полупроводниковые лазеры с полосковым контактом с длиной волны излучения 976 нм

Цель работы – повышение яркости лазеров в непрерывном, квазинепрерывном и импульсном режимах

Основные результаты работы

На основе применяемых в мировой практике подходов по повышению яркости лазерного диода по трём показателям, определяющим этот параметр (мощности, качеству выходного луча и размера излучающей области) были разработаны и изготовлены образцы лазеров, в которых обеспечивается оптимальное сочетание этих показателей.

Для создания образцов лазеров с высокой выходной оптической мощностью и высоким качеством луча по оси, перпендикулярной гетероструктуре была разработана и испытана микролинейка из 5 излучателей с апертурой 100 мкм каждый на основе асимметричной лазерной гетероструктуры с волноводом повышенной толщины, имеющая в результате высокое качество луча и высокую линейную яркость по вертикальной оси, соответствующей мировому уровню, до 143,6 Вт/мм рад. Удалось обеспечить низкое тепловое сопротивление, что позволило сохранить характер ВтАХ близкий к линейному до рабочих температур 100°С.

Для повышения яркости в латеральной плоскости была применена конструкция лазеров со сверхширокой апертурой, в которой за счёт протравленных мелких канавок с диэлектриком ограничивается усиление и интенсивность излучения в областях под канавками, излучение широкого активного полоска распределяется по множеству мелких микрополосков. Конструкция для лазеров с полной апертурой 800 мкм позволила обеспечить

стабильную работу в непрерывной токовой накачке до 10 А. Максимальная выходная оптическая мощность составила 52Вт при работе образцов в квазинепрерывном режиме (длительность импульса 400 мкс, частота повторения импульсов 10 Гц). Удалось наблюдать стабильную от уровня накачки расходимость до 12° в латеральном направлении и стабильную от тока картину дальнего поля. Это соответствует латеральному параметру качества луча до 37,35 мм·мрад и достаточно высокой латеральной линейной яркости до 1,39 Вт/ мм·мрад.

Список публикаций по теме исследования

[1] С. О. Слипченко, А. А. Подоскин, В. А. Крючков, В. А. Стрелец, И. С. Шашкин, и Н. А. Пихтин, «Квазинепрерывные микролинейки мощных полупроводниковых лазеров (λ= 976 нм) с увеличенной длиной резонатора на основе асимметричных гетероструктур с широким волноводом», Квантовая электроника, т. 53, вып. 1, сс. 6–10, 2023.

[2] В.А. Крючков, И.С. Шашкин, Д.Н. Николаев, В.В. Шамахов, М.И. Кондратов, А.Е. Гришин, В.А. Стрелец, Н.В. Шувалова, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин «Конструкция структурированного контакта мощных полупроводниковых лазеров для стабилизации латерального дальнего поля» стендовый доклад на 8-й Симпозиум «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», г. Санкт-Петербург, 15-18 апреля 2025 г.

введение

Применение лазерных линеек и матриц ближнего ИК-диапазона с выходной мощностью киловаттного диапазона на текущий день традиционно в таких областях, как лазерные системы прямой обработки материалов. а также накачка активных сред твердотельных лазеров, при этом появились и новые применения при проведении фундаментальных исследований (например, ускорение частиц), в спектроскопии и медицине.

Для всех подобных применений ранее предлагались различные подходы К формированию необходимого гауссоподобного профиля излучения диодного лазера [1], [2], [3], [4]. Все эти методы ограничены и требуют сложных дополнительных механизмов в лазерной системе [5]. Поэтому для полупроводниковых лазеров сохраняется, а в последние годы актуализируется не только необходимость получения высокой оптической мощности с одиночного лазерного излучателя, но и также задача снижения исходной расходимости и улучшения качества выходного луча лазерного диода для того, чтобы упростить задачу дополнительной коллимации выходного луча. Оба этих выходных показателя объединяет яркость лазерного диода. Повышенный интерес к высокоярким лазерным источникам, которые объединяют в себе и высокую оптическую мощность, и высокое качество луча, отражается также и в большом количестве статей различных групп исследователей, которые посвящены непосредственно данной тематике [5], [6], [7], [7], [8], [9].

В данной работе, после введения всех необходимых терминов и определений, будет представлен обзор методов как по повышению выходной оптической мощности лазерных диодов и линеек, так и методов улучшения качества выходного луча. Далее, в экспериментальной части, будут представлены примеры реализации многих рассмотренных методов на базе образцов мощных полупроводниковых лазеров, спроектированных и

полностью изготовленных в Лаборатории полупроводниковой люминесценции и инжекционных излучателей ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В данном разделе будут приведены термины и определения, связанные с тематикой яркости лазерных диодов, затем представлен обзор методов повышения яркости лазерных диодов по трём направлениям: 1. Повышение мощности, 2. Улучшение качества луча в латеральном 3. В вертикальном направлении.

Термины и определения

Яркость лазерного диода определяется [6] выходной оптической мощностью Р, площадью излучающей поверхности А и телесным углом Ω расходимости:

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{A} \cdot \mathbf{\Omega}}$$

Произведение параметров луча (ВРР – англ. «beam parameter product») является параметром, характеризующим качество луча. Поскольку для полупроводникового лазера расходимость и качество луча по оси, параллельной гетероструктуре и по оси, перпендикулярной гетероструктуре (т.н. медленная и быстрая ось соответственно) сильно разнятся и определяются различными физическими и технологическими факторами, корректнее ВРР определять отдельно в плоскости, параллельной (латеральное направлнение, lat) и перпендикулярной (вертикальное направление, vert) к гетероструктуре

$$BPP_{lat, vert} = \frac{\Theta_{lat, vert}}{2} \cdot \frac{w_{lat, vert}}{2}$$

θ и w - это полный угол расходимости и полная ширина луча в соответствующих направлениях в фокальной плоскости луча. Для лазерного диода ширина в параллельном направлении в фокальной плоскости равно ширине излучателя (т.н. апертуре), ширина в вертикальном направлении принимается за толщину волновода.

Произведения параметров луча можно также выразить через параметр М², т.е. через отношение расходимости данного пучка к расходимости идеального гауссова пучка в дальнем поле

$$BPP_{lat,vert} = M^2_{lat,vert} \cdot \frac{\lambda}{\pi}$$

Где λ – пиковая длина волны излучения лазера. При этом согласно ISO 11146 [10] для гауссоподобного пучка:

$$M^2_{lat,vert} = \frac{\Theta \cdot w \cdot \pi}{4 \cdot \lambda}$$

Выражение для яркости через ВРР:

$$Br = \frac{P}{BPP_{vert} \cdot BPP_{lat} \cdot \pi^2}$$

Выражение для яркости через M²:

$$Br = \frac{P}{M_{lat}^2 \cdot M_{vert}^2 \cdot \lambda^2}$$

Также могут рассматривать так называемую линейную яркость, то есть яркость по одной из осей:

$$Br_{lat,vert} = \frac{P}{BPP_{lat,vert}}$$

Важные замечания по яркости лазерного диода:

1. Яркость является неизменяемым свойством и не зависит от фокусировки или расфокусировки лазерного луча.

2. Изменение мощности, размера пятна, М², расхождения луча и/или длины волны приведет к изменению конечной яркости лазерного луча.

3. Яркость гауссова луча при его распространении не меняется. Это связано с тем, что яркость обратно пропорциональна телесному углу расходимости. Телесный угол, создаваемый лазерным лучом, пропорционален квадрату угла расходимости θ². Чем меньше расходимость, тем выше яркость лазера.

Важно также отметить, что расходимость для образцов принято считать по 95% от оптической мощности.

Подходы, направленные на повышение выходной оптической мощности

В настоящее время активно разрабатываются подходы, направленные на повышение мощности излучения полупроводниковых лазеров, работающих в непрерывном, а также в квазинепрерывном режиме, когда длительности импульсов находятся в диапазоне от сотен мкс до единиц мс [11], [12], [13]. Один из таких подходов основан на использовании линеек лазерных диодов.

Исторически мощные полупроводниковые лазеры изготавливались на основе гетероструктур с узким волноводом благодаря меньшим пороговым токам за счет большего фактора оптического ограничения в активной области, благодаря этому обеспечивается возможность использовать резонаторы меньшей длиной [5]. Альтернативным подходом к созданию мощных полупроводниковых лазеров стала конструкция гетероструктур с широким волноводом и низкими оптическими потерями (0.2-0.5см⁻¹), благодаря которым возможно применять лазерные чипы с длиной резонатора 3-5 мм без существенной потери в излучательной эффективности. В работах [15], [16] продемонстрированы мощности близкие к 1кВт для ширины линейки 1 см и с излучающими полосками шириной ~100мкм при отношении активной ширины апертуры к полной ширине чипа (т.н. фактор заполнения) 70%. Длинные резонаторы дают возможность использования конструкций со сверхширокими излучающими апертурами [12], [17].

Обычно в линейках лазерных диодов используются конструкции, в которых излучающие области имеют апертуру ~100 мкм и фактор заполнения до 80% [12], [18]. Однако в настоящее время получило активное развитие направление, когда линейки лазерных диодов формируются излучающими областями со сверхширокой апертурой [17], [19], [20], [21], [22], что способствует повышению качества модовой структуры, и выходной мощности.

Подходы, направленные на снижение латеральной расходимости

Разогрев по-прежнему остается фактором, который влияет на основные выходные характеристики лазеров – мощность, расходимость излучения в дальней зоне, ширину и стабильность спектра лазерной генерации. В этом случае расширение излучающей апертуры может привести к увеличению неоднородности температуры по площади сечения лазера и усилению разогрева активной области по сравнению с традиционными конструкциями, что оказывает негативное влияние на излучательные характеристики приборов [2]. В конструкциях со сверхширокой апертурой может возникнуть эффект тепловой линзы, который [23], [24] при достаточной плотности мощности ведёт к увеличению расходимости В плоскости, параллельной гетероструктуре.

Следовательно, для борьбы с негативным влиянием тепловой линзы предлагается в первую очередь улучшить тепловой дизайн лазерной сборки [24]. Например, использовании теплового тракта одинаковой ширины прямо под активной областью, чтобы обеспечить передачу тепла преимущественно вниз[25]. Немаловажным также является фактор согласованности лазерного кристалла и теплоотвода по тепловому коэффициенту расширения, этот фактор рассматривался в работе [26].

В работе [27] для стабилизации латерального профиля излучения латеральный профиль носителей на краях электрических контактов был изменен путем ионной имплантации. Для лазеров с апертурой 90 мкм было достигнут ВРР в латеральном направлении 2 мм мрад на уровне 7 Вт, что соответствует максимальной линейной яркости 3,5 Вт/мм мрад. Недостатками такого метода является снижение КПД предположительно из-за потери носителей заряда в точечных дефектах, возникающих в результате имплантации, вблизи активной области. В работе [28] был представлен двухэтапный процесс эпитаксиального выращивания с промежуточной имплантацией ионов Кремния или Кислорода (один вариант с имплантацией в активном слое, второй – в контактном слое, Рисунок 1.1), что позволило

сосредоточить излучение в апертуре 10-200 мкм до при ширине металлического контакта в 400 мкм. Лучшего результата авторы добились на излучающей апертуре 90 мкм – параметр луча - 2,2 мм мрад. В работе [29] ля полоска в 1000 мкм авторы добились максимальной мощности в 71 Вт, при этоv параметр луча составил около 75 мм мрад, что соответствует линейной яркости 0,95 Вт/мм мрад. Также важно упомянуть, что технология является достаточно сложной для качественной реализации.



Рисунок 1.1 - Двухэтапный процесс эпитаксиального выращивания с промежуточной имплантацией ионов Кремния или Кислорода (один вариант с имплантацией в активном слое, второй – в контактном слое)

Немаловажным для латерального дальнего поля также является стабилизация модового состава излучения. В расчётной работе [30] представлено воздействие на оптическое поле внутри резонатора путем контакта с непостоянным длинной по оси резонатора (Рисунок 1.2). Это дает возможность увеличить область активного усиления за счет формирования желаемой основной моды лазерного излучения, в то время как для мод более высокого порядка генерируются дополнительные дифракционные потери. Расчёты показывают улучшение параметра M² с 10 до 6 единиц.



Рисунок 1.2 - Структура волноводного слоя (упрощенная) и эффективный показатель моды в областях с различным составом волноводного слоя: (1) слой электрического контакта, (2) слой оболочки, (3) слои волновода, (4) активный слой, (5) подложка и (6) пассивирующий слой.

Другой подход к подавлению латеральных мод более высокого порядка, основанный на использовании антимодуляционного слоя с высоким показателем преломления, размещенного по краям полоска в волноводном слое лазерной гетероструктуры [31], Рисунок 1.3. Такие усовершенствования конструкции приводят к снижению коэффициента усиления латеральных мод высокого порядка. Латеральное расхождение в дальнем поле лазеров с апертурой 90-мкм, излучающих на длине волны 980 нм и содержащих такой антимодуляционный слой, сужается на 3° (до 4 мм мрад) при непрерывной выходной мощности 10 Вт, что соответствует линейной яркости 2,55 Вт/мм мрад.

Однако в конструкции лазера с широкой апертурой два последних описанных подхода будут селектировать только моды очень высокого порядка – под полоском останется фундаментальная мода, а также несколько мод более высокого порядка.



Рисунок 1.3 - антимодуляционный слой (справа) с высоким показателем преломления, размещенный по краям полоска в волноводном слое лазерной гетероструктуры и демонстрация (слева) его селективных свойств.

Ещё два подхода по снижению латеральной расходимости - конструкция одномодового гребенчатого волновода и конструкция с расширяющимся полоском, - продемонстрированы в работе [32], где оба подхода были монолитно интегрированы в одном лазерном чипе, образуя лазерный резонатор большой площади. Одномодовая секция действует как модовый фильтр, обеспечивая излучение, близкое к дифракционному, в то время как конический усилитель обеспечивает высокую выходную мощность. Такая конструкция позволила добиться параметра ВРР в латеральном направлении 1,5 мм мрад и линейной яркости по латеральной оси 3,3 Вт/мм мрад. Однако при таком подходе возникает проблема астигматизма пучка.



Рисунок 1.4 - Конструкция с расширяющимся полоском, дополненный брэгговской решёткой

Что касается лазеров со сверхширокой апертурой, то в сборках такого типа для снижения эффекта тепловой линзы применяется конструкция

структурированного полоска. Принцип заключается в формировании в эмиттерном слое периодических областей ограничения протекания тока, в результате чего излучающая апертура ограничивается рядом мелких излучающих областей, что позволяет стабилизировать излучение в дальнем латеральном поле (т.н. модуляция по изменению показателя преломления – index guiding). На обзоре данной концепции необходимо остановиться подробнее.

Подробно метод описан в книге [33]. Главное условие, при котором линейка лазерных диодов синхронизирована по фазе, заключается в резонансной связи утекающих волн (resonant leaky-wave coupling). Это достигается, когда расстояние между элементами массива соответствует нечётному числу полуволн для синфазного режима или чётному числу полуволн для срежима.

Формула резонансного условия:

$$s = m \cdot \frac{\lambda_1}{2}$$

где:

s — расстояние между элементами,

 λ_1 — длина волны в поперечном направлении,

т - нечётное число для синфазного режима, чётное для противофазного.

Это обеспечивает связь между элементами, когда каждый элемент одинаково связан со всеми остальными, что приводит к высокой когерентности и стабильности излучения.

При синфазном режиме (In-phase mode) все элементы излучают в одинаковой фазе (разность фаз $\Delta \varphi = 0^{\circ}$). Поля соседних элементов складываются конструктивно, усиливая друг друга. Формируется один центральный лепесток в дальней зоне (дифракционно-ограниченное излучение).

При противофазном режиме (Out-of-phase mode) соседние элементы излучают в противофазе (разность фаз $\Delta \phi = 180^{\circ}$). Поля в центре линейки

гасят друг друга, а по краям — складываются. В дальней зоне образуется два симметричных лепестка под углами.

Однако при неидеальной синхронизации фаз между излучателями возникает многомодовый режим. В таком режиме линейка лазерных диодов излучает несколько пространственных мод, что приводит к усложнению диаграммы направленности в дальней зоне. Причины возникновения многомодовости:

- Латеральная модовая конкуренция: Если оптическое усиление в активной среде лазерного диода позволяет поддерживать несколько поперечных мод.
- Неидеальная синхронизация: Разброс фаз между элементами изза неоднородностей в структуре или накачке.
- Высокий уровень накачки: При больших токах могут возбуждаться высшие моды, даже если вблизи порога доминирует основная мода.

В отличие от чистого синфазного (один пик) или противофазного (два пика) режимов, многомодовое излучение даёт сложную интерференционную картину:

- Несколько пар пиков (если доминируют моды с разными поперечными индексами),
- Уширение основного лепестка и появление боковых лепестков,
- Снижение контраста интерференции (видимости полос).

Для многомодового режима угловое положение пиков определяется вкладом каждой моды:

1. Каждая пространственная мода даёт свой набор пиков в дальней зоне.

2. Угловое расстояние между пиками кратно индексу т моды:

$$\Delta \theta_m \approx \frac{m\lambda}{s}$$

Где s – расстояние между элементами.

Один из методов реализации за счет формирования периодического омического контакта предложен в [34]. То есть, в контактном или в контактном и эмиттерном слое травятся мелкие меза-канавки, которые заполняются диэлектриком.

Однако более распространённым методом реализации концепции микрополоскового контакта является метод ионной имплантации. В работе [35] микрополосковая структура 400 мкм контакта была сформирована путем селективной имплантации ионов Гелия в контактный слой GaAs, которые вызывают снижение электропроводности. Помимо канавок, модулирующих показатель преломления, для стабилизации латерального модового состава с были V-образные предусмотрены канавки для предотвращения конкурирующих поперечных или кольцевых мод. Наилучшие характеристики были получены при использовании лазера с шагом излучателей 10 мкм и с уширяющимися полосками апертурой от 2 до 7 мкм. Латеральный угол расходимости в дальнем поле составил 13,5°, что соответствует латеральному параметру луча ~24 мм мрад и линейной яркости 1,46 Вт/ мм мрад.



Рисунок 1.5 - Схема реализации микрополоструктурированного контакта методом ионной имплантации

Дальше продвинулась группа исследователей в работах [29], [36], [37] которым для лазеров с общей апертурой от 400 до 1500 мкм удалось решить

проблему возниконовения кольцевых мод, им препятствует неглубокая имплантация контактного слоя из Гелия и Кислорода. Эта структурированная конструкция была совмещена с вышеупомянутым двухэтапным эпитаксиальным ростом.

Применяется структурирование контакта и для лазерных диодов стандартной апертуры 100 мкм. В работах [7], [38] был применён метод травления меза-канавок в эмиттерном слое лазерного диода. Близкий к предыдущим рассмотренным работам результат в 3,5 мм мрад в параллельной гетеропереходу плоскости и яркость 2,86 Вт/мм мрад достигнуты благодаря модуляции по показателю преломления, меза-канавками в пассивной области вдоль излучающего полоска, а также использованию гетероструктуры с повышенным КПД.



Рисунок 1.6 - Схематический чертеж лазерного диода широкой апертуры с эпитаксиальными слоями, профилем показателя преломления, профилями дальнего поля по латеральной и вертикальногй оси.

Подходы, направленные на снижение вертикальной расходимости

Не менее сложной задачей является снижение расходимости и улучшение качества картины дальнего поля по оси, перпендикулярной гетероструктуре (т.н. быстрой оси)

В работе [39] были продемонстрированы лазеры с малой апертурой в 5 мкм, для которых удалось достигнуть расходимость 11,4° в плоскости, перпендикулярной слоям гетероструктуры, на уровне половины максимума Bt. интенсивности оптическую мощность 1 что соответствует И параметру луча 0,179 и вертикальной яркости 5.58. вертикальному волновода Использование увеличенной толщины 8,6 мкм позволило уменьшить расходимость в вертикальном направлении до 17° [40] (BPP_{vert} = $0.638 \text{ мм} \cdot \text{мрад}, Br_{\text{vert}} = 2.038 \text{ Bt/мм} \cdot \text{мрад}).$ Формирование модового состава в таком толстом волноводе добились при помощи активной области, образованной несколькими квантовыми ямами InGaAs и компенсирующими барьерами GaAsP (Рисунок 1.7). Следует отметить усилия по оптимизации волноводов повышенной толщины. В частности, в работе [41] было получено расходимость в $25,2^{\circ}$ при толщине волновода 5,2 мкм (BPP_{vert} = 0.572 мм·мрад, Br_{vert}= 3.32 Вт/мм·мрад).



Рисунок 1.7 – Конструкция гетероструктуры с несколькими квантовыми ямами InGaAs и компенсирующими барьерами

обратное решение Возможно также проблемы расходимости гетероструктуры волноводом. Была продемонстрирована тонким с расходимость в 15° для одной квантовой ямы [42] и в 10° для волновода на основе 6 квантовых ям [43]. Однако по причине отсутствия барьерных слоёв в гетероструктуре была отмечена значительная утечка носителей заряда, которая проявилась в низкой внутренней квантовой эффективности, составившей 70%. Чтобы решить проблему утечки носителей заряда, в работе [44] конструкция гетероструктуры была дополнена тонкими широкозонными барьерами, расположенными на границе раздела волновод-эмиттер, что позволило добиться для образцов расходимости в 18,5° при внутренней квантовой эффективности уже 97% (для стандартной апертуры).

Заключение по литературному обзору

Для проведения литературного обзора были рассмотрены научные работы различных групп исследователей по трём направлениям, определяющим параметр яркости лазерного диода: работы по повышению выходной оптической мощности, работы по снижению угловой расходимости в плоскости, перпендикулярной гетероструктуре, и работы по снижению угловой расходимости в плоскости, параллельной гетероструктуре.

Основными способами повышения выходной оптической мощности является снижение внутренних оптических потерь, утолщение волноводных слоёв гетероструктуры, применение лазерных диодов со сверхширокой апертурой, использование лазерных линеек, микролинеек или матриц лазерных диодов, а также улучшение теплового дизайна.

Для стабилизации и уменьшения расходимости в латеральной плоскости преимущественно применяются такие методы как улучшение теплового дизайна для снижения негативного эффекта тепловой линзы и модовая селекция - подавление латеральных мод высоких порядков. Отдельно нужно выделить метод стабилизации латерального дальнего поля, как структурирование контакта на небольшие сегменты, разделённые узкими областями со сниженной плотностью тока накачки. При корректном подборе ширины микроизлучателей, шага между ними, а также качественной технологической реализации конструкции возможно реализовать т.н. синфазный режим, при котором можно получить один пик излучения в латеральном дальнем поле. По большинству статей видно, что мировым уровнем в латеральном направлении являются линейные яркости 1...5 Вт/мм·мрад.

Что касается расходимости в плоскости, перпендикулярной гетероструктуре, то тут все методы улучшения дальнего поля связаны с усовершенствованием конструкции слоёв гетероструктуры, и одним из наиболее часто используемых решений можно назвать использование сверхтолстых волноводных слоев с барьерными слоями. Мировым уровнем являются параметры луча в вертикальном направлении примерно 0,5 мм·мрад.

2 ПОВЫШЕНИЕ ВЫХОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛУЧА В ВЕРТИКАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Исследуемые образцы

Как уже было сказано в литобзоре, на достижение в лазере высокой оптической мощости, а также на расходимость по оси перпендикулярной волноводу, влияет конструкция гетероструктуры. Для того, чтобы решить эти две задачи, была разработана GaAs/AlGaAs/InGaAs гетероструктура на длину волны излучения 976 нм (Рисунок 2.1). Расширение волновода ассиметричной конструкции до 4 мкм, позволило сократить внутренние оптические потери до 0.27 см⁻¹. В итоге было получена компромиссная конструкция с точки зрения низких внутренних оптических потерь, оптимальной расходимости в плоскости, перпендикулярной слоям гетероструктуры, и общей толщины гетероструктуры. Расчётная расходимость дальнего поля в плоскости, гетероструктуре, 13°. перпендикулярной составила Разработанная гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии в реакторе вертикального типа.

На основе разработанной гетероструктуры была изготовлена микролинейка из 5 излучателей апертурой 100 мкм каждый и большой длиной резонатора в 6 мм. Торцевые зеркала лазера были пассивированы отражающими и просветляющими покрытиями.



Рисунок 2.1 – Зонная диаграмма гетероструктуры

Для выбора конструкции микролинейки была проведена предварительная оценка максимального перегрева активной области линейки зависимости от значения фактора заполнения (отношение ширины В излучающей области к сумме ширин излучающей и пассивной областей). В расчетах было принято, что общая ширина микролинейки составляла 2мм. Выходная апертура микролинейки состояла из полосков шириной 100 мкм, которые были распределены равномерно. Таким образом, минимальное значение FF=5% соответствовало случаю одиночной излучающей области шириной 100мкм. В расчете тепловая мощность каждой излучающей области определялась в рамках приближения КПД=50% и суммарной оптической мощности 50Вт, излучаемой микролинейкой. На Рисунок 2.2 показаны результаты расчетов в рамках двухмерной стационарной модели. Видно, что, перегрев активной области снижается при увеличении фактора заполнения. Однако, наиболее существенное изменение перегрева наблюдается для малых значений фактора заполнения. Поэтому для экспериментальной конструкции микролинейки было выбрано значение фактора заполнения 25%.



Рисунок 2.2 – моделирование максимального перегрева активной области линейки в зависимости от значения фактора заполнения

На основе разработанной гетероструктуры были созданы микролинейки, включающие пять излучающих областей шириной 100мкм, каждая, и, разделенных пассивными областями шириной 300мкм, каждая, что обеспечило выбранное значение FF=25%. Продемонстрированные низкие внутренние оптические потери позволили использовать длину резонатора 6мм без существенного падения выходной излучательной эффективности. На выходные зеркала резонатора были нанесены просветляющие и отражающие покрытия. Микролинейки напаивались с помощью индиевого припоя рстороной вниз на медные теплоотводы.

Результаты экспериментов

Типичные формы оптического и токового импульсов для максимальной амплитуды 50А и длительности 1 мс показа на Рисунок 2.3. Максимальная пиковая мощность достигает 48.4 Вт, при этом, за время импульса уровень мощности падает на ~100мВт. Отсутствие теплового насыщения также демонстрирует ватт-амперная характеристика (ВтАХ) (Рисунок 2.4).



Рисунок 2.3 - Типичные формы оптического и токового импульсов для максимальной амплитуды 50 А



Рисунок 2.4 – Ватт-Амперная характеристика образцов в квазинепрерывном режиме накачки

Из полученной зависимости видно, что микролинейка характеризуется пороговым током 2.6А и наклоном 1.03Вт/А, значение которого сохраняется во всем диапазоне токов накачки выше порога, при этом спектр генерации несколько уширяется и смещается на 2.9нм в длинноволновую область (с 974нм/10А до 976.9нм/50А), что может свидетельствовать о несущественном перегреве, который не сказывается на излучательную эффективность. Изменение длительности импульса тока накачки в диапазоне 1.0-9.5мс привело к следующему. Для длительностей импульса тока накачки до 5мс наблюдается несущественное изменение уровня мощности (~100мВт) за время импульса в исследуемом диапазоне амплитуд токов накачки 0-42А (Рисунок 2.5). Максимальное снижение мощности в конце импульса относительно значения в начале импульса составило $\Delta P = 0.65BT$ и наблюдалось для длительностей 7.0-9.5мс. Из Рисунок 2.5 видно, что снижение мощности для длительности 9.5мс начинает проявляться с амплитуды тока 26А, при этом для максимальной амплитуды 42А уровень мощности стабилизируется уже через 5мс после начала импульса. Изменение мощности в течение импульса говорит о деградационных процессах в лазере. Исследования наработки лазеров на отказ не проводились.



Рисунок 2.5 – Снижение мощности за время лазерного импульса

Набор ВтАХ, полученных для различных температур теплоотвода, показан на Рисунок 2.6. Увеличение температуры сопровождается падением пиковой мощности с 40.5Bt/42A/20°C до 25.7Bt/42A/100°C. Основные причины падения пиковой мощности связаны с ростом порогового тока с 2.6А/20°С до 8А/100°С и снижением наклона ВтАХ с 1.03Вт/А при 20°С до 0.77Вт/А при 100°С. Нелинейность ВтАХ, связанная с термическим насыщением, вносит несущественный вклад. Возможная причина такого поведения ВтАХ может быть связана с изменением характеристик лазерной гетероструктуры при увеличении температуры теплоотвода (увеличение внутренних оптических потерь и падение внутреннего квантового выхода [45]), а дополнительный перегрев активной области при увеличении амплитуды тока дает незначительный вклад. Данный вывод подтверждается динамикой длинноволновой границы спектра лазерной генерации (λ_{LW}) в зависимости от амплитуды тока накачки, полученной для различных температур теплоотвода (Рисунок 2.7). Из Рисунок 2.7 видно, что смещение длинноволновой границы при увеличении амплитуды тока накачки с 8А до 42А составляет 2.5-3нм во всем диапазоне температур 20-100°С.



Рисунок 2.6 – Ватт-Амперные характеристики при различных

температурах



Рисунок 2.7 – Сдвиг длинноволнового края спектра при различных температурах

Другая характерная особенность динамики выходной мощности при работе на повышенных температурах связана с изменением уровня мощности за время импульса. На Рисунок 2.86 показаны зависимости падения уровня выходной оптической мощности за время импульса (ΔP), при длительности

1мс, от амплитуды тока накачки, полученные для рабочих температур 20, 40, 60, 80, 100°С. Если для рабочих температур <60°С изменение в уровне мощности лазерного импульса заметно при амплитудах тока накачки близких к 42A, то для рабочей температуры 100°С падение мощности начинает проявляться уже при амплитуде тока 18A (Рисунок 2.86). Однако, наблюдаемые изменения уровня выходной оптической мощности за время импульса являются несущественными: максимальное значение ΔP и не превышает 0.7Вт для рабочей температуры 100°С и амплитуды тока накачки 42A (Рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 - Снижение мощности за время лазерного импульса при увеличенной температуре

Типичное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне для исследуемых микролинеек, и, полученное с помощью ССD камеры, показано на Рисунок 2.9. Угловые распределения интенсивностей для сечений в параллельной и перпендикулярной плоскостях, показаны на Рисунок 2.9. Для параллельной слоям гетероструктуры, плоскости, присутствует незначительная модуляция, характерная для многомодового режима генерации, при этом для перпендикулярной плоскости распределение имеет типичный вид, определяемый формой нулевой моды (Рисунок 2.9). Значения углов расходимости на уровне половины от максимума интенсивности составили для перпендикулярной плоскости 13° и параллельной плоскости 8°.



Рисунок 2.9 – Дальнее поле излучения лазерной линейки (слева) и угловая зависимость интенсивности (справа), где 1 – вертикальная расходимость, 2 - латеральная

Таким образом, из апертуры 5*100 мкм и толщины волновода 4 мкм мы можем рассчитать значения яркости лазерной линейки согласно формулам из Главы «Термины и определения» Раздела 1, углы расходимости необходимо считать на уровне 1/е² от пиковой интенсивности: 21° по в вертикальном направлении и 13° в латеральном.

Латеральный параметр луча:

$$BPP_{lat} = \frac{1}{4} \cdot (5 \cdot 0.1 \text{ мм}) \cdot \left(13^{\circ} \cdot \frac{10^{3} \cdot \pi \text{ мрад}}{180^{\circ}}\right) = 28,36(\text{мм * мрад})$$

Латеральная линейная яркость при максимальной мощности

Br_{lat} =
$$\frac{48.4}{28,36}$$
 = 1,71 (Вт/мм·мрад)

Вертикальный параметр луча:

$$BPP_{vert} = \frac{1}{4} \cdot (0.004 \text{ MM}) \cdot \left(21^{\circ} \cdot \frac{10^{3} \cdot \pi \text{ Mpag}}{180^{\circ}}\right) = 0.37(\text{MM} * \text{Mpag})$$

Вертикальная линейная яркость при максимальной мощности

$$Br_{vert} = \frac{48.4}{0.37} = 143.6(BT/мм·рад)$$

Полная яркость при максимальной мощности:

$$Br = \frac{48.4}{28,36 \cdot 0,37 \cdot \pi^2} = 0.47(BT/MM^2 \cdot pad^2)$$

Заключение по разделу

Полученные результаты продемонстрировали, что использование асимметричной лазерной гетероструктуры с толстым волноводом, обеспечивающей низкую расходимость излучения в дальнем поле и высокую стабильность излучательных характеристик температурную позволило получить образцы микролинеек полупроводниковых лазеров с низким производным параметром луча и высокой яркостью до 0.47 Вт/мм² рад². Экспериментально реализованные низкие внутренние оптические потери позволяют создавать микролинейки с увеличенной до 6 мм длиной резонатора без заметного падения внешней дифференциальной квантовой эффективности, а также с низкой расходимостью по оси, перпендикулярной гетероструктуре. Удалось обеспечить низкое тепловое сопротивление, что позволило сохранить характер ВтАХ близкий к линейному до рабочих температур 100°С. Работа созданных микролинеек при повышенных температурах и увеличенных длительностях импульсов тока накачки говорит о возможности дальнейшего повышения пиковой мощности в режиме генерации лазерных импульсов миллисекундной длительности, в частности за счет увеличения ширины излучательной апертуры и повышения фактора заполнения.

3 УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛУЧА В ЛАТЕРАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Исследуемые образцы

В работе [17] для решения задачи повышения выходной оптической мощности в квазинепрерывном режиме работы были разработаны и исследованы полупроводниковые лазеры со сверхширокой излучающей апертурой 800мкм монолитной конструкции. Недостатком такого подхода является нестабильное поведение латерального дальнего поля. Для решения проблемы высокой расходимости и стабилизация латерального дальнего поля вне зависимости от амплитуды тока накачки мощных полупроводниковых лазеров со сверхширокой апертурой предложена конструкция структурированного контакта.

В данной работе микроструктурированный контакт был сформирован маломодовыми полосками при общей ширине апертуры 800мкм. Это позволило реализовать профиль с периодическим усилением вдоль апертуры.

Стандартно мы имеем в конструкции полоскового лазера один сплошной контактный полосок. В данной же работе в эту конструкцию, помимо двух крайних глубоких канав, определяющих общую апертуру лазера, сформированы также микроканавки, заполненные диэлектриком, делящие апертуру на микросегменты. В областях, не закрытых диэлектриком – в микросегментах - ниже протекание тока, следовательно, заметно ниже усиление (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – (а) – ранее применяемая конструкция, (б) – Конструкция с микроканавками.

Для проведения экспериментов в лаборатории была разработана и выращена методом МОС-гидридной эпитаксии гетероструктура (Рисунок 3.2) с пиковой длиной излучения 976 нм, имееющая в своей основе волновод асимметричной конструкции с увеличенной до 2 мкм толщиной. Благодаря такой конструкции величина внутренних оптических потерь снижена до 0.7см⁻¹.



Рисунок 3.2 - Зонная диаграмма гетероструктуры

На базе выращенной гетероструктуры были изготовлены образцы лазеров с длиной резонатора 3 мм. Проводились эксперименты с тремя вариантами микроструктурирования 800 мкм полоска:

• №2: сегменты 50 мкм через область непрокачки в 5мкм, фактор заполнения 91%

- №3: сегменты 10 мкм через 10мкм, фактор заполнения 50%
- №4: сегменты 20 мкм через 5мкм, фактор заполнения 80%

Эксперименты

При измерениях в квазинепрерывном режиме (Рисунок 3.3а) (длительность импульса 400 мкс, частота следования импульсов 10 Гц) достигнуто до 52 Вт мощности с образцов. В непрерывном режиме (Рисунок 3.3б) накачки. В обеих режимах выявлено небольшое преимущество по мощности и по напряжению образцов с шагом 20 через 5 мкм, также образцы данной группы склонны к лучшей воспроизводимости Ватт-Амперных характеристик.



Рисунок 3.3 – Ватт-Амперные характеристики образцов в квазинепрерывном (а) и непрерывном (б) режимах

При исследовании образцов в дальнем поле у разных образцов одного построста может наблюдаться одна или несколько из поддерживаемых мод (Рисунок 3.4). Происходит неидеальная синхронизация фаз между излучателями, возникает многомодовый режим, ранее разобранный в литобзоре на основе [33]. Разброс общего вида дальнего поля виден вне зависимости от порядка микроструктурировния, во всех трёх может возникать мода 0,1 и 2-го порядков (табл. 3.1) Также сопоставление картин дальнего поля при разных уровнях накачки (1,5 и 2 порога генерации) даёт возможность

сделать вывод о том, что вид поля и относительная расходимость практически не увеличивается с ростом тока накачки.



 Мода 0-го порядка
 Мода 1-го порядка
 Мода 2-го порядка

 Рисунок 3.4 – Картины дальнего поля в квазинепрерывном режиме
 генерации (длительность импульса 400 мкс, частота следования 10 Гц),

 наблюдаемые в образцах
 наблюдаемые в образцах

Таблица 3.1 – Картины дальнего поля внепрерывном в параллельной плоскости отсортированы по вариантам микроструктрирования на уровнях накачки 1,5 (чёрный график) и 2 (красный) порога





Из анализа угловой расходимости излучения лазеров в латеральном направлении (Рисунок 3.5) мы видим, что общий вид поля коррелирует с общей расходимостью. Для образцов, у которых удалось добиться единственной моды в дальнем поле, значительно ниже расходимость, и наоборот.



Рисунок 3.5 – Угловая расходимость в параллельном направлении на уровне 1/е² с картинами в дальнем поле

Объяснение невоспроизводимости дальнего поля может дать анализ ближнего поля, то есть распределения интенсивности излучения вдоль излучающей апертуры лазера, Данный анализ был произведён при помощи CCD-камеры, на которую попадало излучение лазера, прошедшее через специальную съюстированную систему линз, формирующую параллельный пучок света. Картины ближнего поля в общем виде и в детальном виде представлены на Рисунок 3.6. Во-первых, на общем виде ближнего поля заметна неодинаковая интенсивность излучения сегментов (Рисунок 3.6а). Вовторых, неодинаковыми по интенсивности также являются области между сегментами (Рисунок 3.6б). Это говорит о проблемах с качеством реализации микроструктурированного контакта на постростовом этапе подготовки лазерных образцов.





Решение проблемы невоспроизводимости лежит в оптимизации конструкции гетероструктуры путём добавления стоп-слоя (слой, отличающийся по составу, ограничивающий травление на нужной глубине), а также усилении волноводных свойств микрополосков до той степени, при которой под каждым сегментом будет удерживаться только фундаментальная мода.

Перейдём к расчёту яркости. Латеральный параметр луча для каждого варианта микроструктурирования:

$$BPP_{lat50-5} = \frac{1}{4} \cdot (0.8 \text{ MM}) \cdot \left(15.8^{\circ} \cdot \frac{10^{3} \cdot \pi \text{ Mpag}}{180^{\circ}}\right) = 55.15(\text{MM} * \text{Mpag})$$
$$BPP_{lat20-5} = \frac{1}{4} \cdot (0.8 \text{ MM}) \cdot \left(10.7^{\circ} \cdot \frac{10^{3} \cdot \pi \text{ Mpag}}{180^{\circ}}\right) = 37.35(\text{MM} * \text{Mpag})$$

$$BPP_{lat10-10} = \frac{1}{4} \cdot (0,8 \text{ мм}) \cdot \left(20,1^{\circ} \cdot \frac{10^{3} \cdot \pi \text{ мрад}}{180^{\circ}}\right) = 70,16 (мм * мрад)$$

Максимальная линейная латеральная яркость достигнута при использовании шаблона 20 через мкм и накачке, обеспечивающей выходную оптическую мощность 52 Вт:

Br_{lat} =
$$\frac{52}{37.35}$$
 = 1,39 (Вт/мм·мрад)

Вертикальный параметр луча:

$$BPP_{vert} = \frac{1}{4} \cdot (0,002 \text{ MM}) \cdot \left(42^{\circ} \cdot \frac{10^{3} \cdot \pi \text{ Mpag}}{180^{\circ}}\right) = 0,367(\text{MM} * \text{Mpag})$$

Максимальная полная яркость достигнута при использовании шаблона 20 через 5 мкм и накачке, обеспечивающей выходную оптическую мощность 52 Вт

$$Br = \frac{52}{55,13 \cdot 0,367 \cdot \pi^2} = 0.38 (BT/мм^2 \cdot мрад^2)$$

Заключение по разделу

Лазеры с широкой лазерной апертурой, структурированной на небольшие сегменты, разделённые узкими областями со сниженной плотностью тока накачки, имеют более стабильное латеральное дальнее поле.

Конструкция структурированного контакта в лазерных диодах сверхширокой апертуры позволила обеспечить стабильную работу в непрерывной токовой накачке до 10 А. Получено до 52 Вт мощности для образцов в квазинепрерывном режиме (длительность импульса 400 мкс, частота повторения импульсов 10 Гц). Удалось наблюдать стабильную от уровня накачки расходимость до 12° в латеральном направлении и стабильную от тока картину дальнего поля. Это соответствует латеральному параметру луча 37,35 мм·мрад и латеральной линейной яркости 1,39 Вт/ мм·мрад.

Не удалось добиться воспроизводимости латерального дальнего поля от образца к образцу: возможно, имеют место неоднородности растекания тока при большой ширине лазерной апертуры, что приводит к возбуждению мод 0-го, 1-го и 2-го порядков одновременно или по отдельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённого литературного обзора научных работ различных групп исследователей были определены основные подходы по улучшению яркости лазерного диода по трём направлениям, определяющим этот параметр.

Для создания образцов лазеров с высокой выходной оптической мощностью и высоким качеством луча ПО оси, перпендикулярной гетероструктуре была разработана и испытана микролинейка из 5 излучателей с апертурой 100 мкм каждый на основе асимметричной лазерной гетероструктуры с волноводом повышенной толщины, имеющая в результате с высокое качество луча и высокую линейную яркость по вертикальной оси, соответствующей мировому уровню, до 143,6 Вт/мм рад. Удалось обеспечить низкое тепловое сопротивление, что позволило сохранить характер ВтАХ близкий к линейному до рабочих температур 100°С.

Для повышения яркости в латеральной плоскости было применена конструкция лазеров со сверхширокой апертурой, структурированной на небольшие сегменты, разделённые узкими областями со сниженной плотностью тока накачки. Конструкция для лазеров с полной апертурой 800 мкм позволила обеспечить стабильную работу с в непрерывной токовой накачке до 10 А. Получено до 52 Вт мощности для образцов в квазинепрерывном режиме (длительность импульса 400 мкс, частота повторения импульсов 10 Гц). Удалось наблюдать стабильную от уровня накачки расходимость до 12° в латеральном направлении и стабильную от тока картину дальнего поля. Это соответствует латеральному параметру луча составил до 37,35 мм·мрад и достаточно высокой латеральной линейной яркости до 1,39 Вт/ мм·мрад.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] H. Zbinden и J. E. Balmer, «Q-switched Nd:YLF laser end pumped by a diodelaser bar», *Opt. Lett.*, т. 15, вып. 18, сс. 1014–1016, сен. 1990, doi: 10.1364/OL.15.001014.
- [2] J. R. Leger и W. C. Goltsos, «Geometrical transformation of linear diode-laser arrays for longitudinal pumping of solid-state lasers», *IEEE J. Quantum Electron.*, т. 28, вып. 4, сс. 1088–1100, апр. 1992, doi: 10.1109/3.135232.
- [3] E. Langenbach и H.-J. Heimbeck, «High-power diode laser collimators», в *Design and Engineering of Optical Systems*, SPIE, авг. 1996, сс. 453–456. doi: 10.1117/12.246691.
- [4] W. A. Clarkson и D. C. Hanna, «Efficient Nd:YAG laser end pumped by a 20-W diode-laser bar», *Opt. Lett.*, т. 21, вып. 12, сс. 869–871, июн. 1996, doi: 10.1364/OL.21.000869.
- [5] H.-G. Treusch, A. Ovtchinnikov, X. He, M. Kanskar, J. Mott, и S. Yang, «Highbrightness semiconductor laser sources for materials processing: stacking, beam shaping, and bars», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, т. 6, вып. 4, сс. 601– 614, июл. 2000, doi: 10.1109/2944.883374.
- [6] P. Shukla, J. Lawrence, и Y. Zhang, «Understanding laser beam brightness: A review and new prospective in material processing», *Opt. Laser Technol.*, т. 75, сс. 40–51, дек. 2015, doi: 10.1016/j.optlastec.2015.06.003.
- [7] H. An *u др.*, «Advances in high power and high brightness laser bars with enhanced reliability», представлено на SPIE LASE, M. S. Zediker, Ред., San Francisco, California, USA, фев. 2013, с. 86050U. doi: 10.1117/12.2004979.
- [8] P. Crump *u др.*, «Novel approaches to increasing the brightness of broad area lasers», представлено на SPIE OPTO, А. А. Belyanin и P. M. Smowton, Ред., San Francisco, California, United States, мар. 2016, с. 97671L. doi: 10.1117/12.2210951.
- [9] H. Wenzel *u др.*, «High-brightness diode lasers achievements and challenges», май 2013.
- [10] A. M. Raitsin и M. V. Ulanovskii, «A Methodology for Correct Measurement of the Spatial-Energy Characteristics of Laser Beams», *Meas. Tech.*, т. 64, вып. 6, сс. 433–439, сен. 2021, doi: 10.1007/s11018-021-01951-z.
- [11] P. A. Crump *u др.*, «Efficient, high power 780 nm pumps for high energy class mid-infrared solid state lasers», в *High-Power Diode Laser Technology XVIII*, M. S. Zediker, Ред., San Francisco, United States: SPIE, мар. 2020, с. 3. doi: 10.1117/12.2545991.
- [12] M. M. Karow *u др.*, «Efficient 600-W-Laser Bars for Long-Pulse Pump Applications at 940 and 975 nm», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, т. 29, вып. 19, сс. 1683–1686, окт. 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2743242.
- [13] M. M. Karow, D. Martin, P. Della Casa, G. Erbert, и P. A. Crump, «Design progress for higher efficiency and brightness in 1 kW diode-laser bars», в *High*-

Power Diode Laser Technology XVIII, M. S. Zediker, Ред., San Francisco, United States: SPIE, мар. 2020, с. 4. doi: 10.1117/12.2545918.

- [14] М. А. Ладугин *и др.*, «Линейки лазерных диодов на основе квантоворазмерных гетероструктур AlGaAs/GaAs с КПД до 70%», *Квантовая электроника*, т. 47, вып. 4, сс. 291–293, 2017.
- [15] H. Zhang, X. Liang, W. Cai, C. Zah, и X. Liu, «Optimization of micro channel heat sinks for high-power 9xx-nm laser diodes», представлено на SPIE OPTO, B. Witzigmann, M. Osiński, и Y. Arakawa, Ред., San Francisco, California, United States, фев. 2017, с. 1009829. doi: 10.1117/12.2256112.
- [16] J. Hostetler *u др.*, «Passive cooling effects of low and high fill-factor 937 nm 1 cm arrays», M. S. Zediker, Ред., фев. 2008, с. 68760A. doi: 10.1117/12.763443.
- [17] Слипченко С. О. и др, «Квазинепрерывные мощные полупроводниковые лазеры (1060 нм) со сверхширокой излучающей апертурой», *Квантовая* Электроника, т. 52, вып. 4, сс. 340–342, 2022.
- [18] J. Hostetler u др., «Passive cooling effects of low and high fill-factor 937 nm 1 статауз», представлено на Lasers and Applications in Science and Engineering, M. S. Zediker, Ред., San Jose, CA, фев. 2008, с. 68760A. doi: 10.1117/12.763443.
- [19] S. O. Slipchenko $u \partial p$., «Tunnel-Coupled Laser Diode Microarray as a kW-Level 100-ns Pulsed Optical Power Source ($\lambda = 910$ nm)», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, т. 34, вып. 1, сс. 35–38, янв. 2022, doi: 10.1109/LPT.2021.3134370.
- [20] С. О. Слипченко *и др.*, «Вертикальные стеки мощных импульсных (100 нс) полупроводниковых лазеров киловаттного уровня пиковой мощности на основе мезаполосковых волноводов со сверхширокой (800 мкм) апертурой на длине волны 1060 нм», *Квантовая Электроника*, т. 52, вып. 2, сс. 171–173, 2022.
- [21] С. О. Слипченко *и др.*, «Мощные импульсные полупроводниковые лазеры (910 нм) мезаполосковой конструкции со сверхширокой излучающей апертурой на основе туннельно-связанных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs», *Квантовая Электроника*, т. 52, вып. 2, сс. 174–178, 2022.
- [22] D. Schröder *u др.*, «Increased power of broad-area lasers (808nm/980nm) and applicability to 10-mm bars with up to 1000Watt QCW», представлено на Lasers and Applications in Science and Engineering, M. S. Zediker, Ред., San Jose, CA, фев. 2007, с. 64560N. doi: 10.1117/12.700021.
- Шашкин и [23]И. C. *dp*., «Исследование динамики разогрева В квазинепрерывном режиме активной области мощных полупроводниковых лазеров (1060 нм) со сверхширокой излучающей апертурой (800 мкм)», Квантовая Электроника, т. 52, вып. 9, сс. 794–798, 2022.
- [24] M. Winterfeldt *u dp.*, «Assessing the influence of the vertical epitaxial layer design on the lateral beam quality of high-power broad area diode lasers»,

представлено на SPIE LASE, M. S. Zediker, Ред., San Francisco, California, United States, мар. 2016, с. 973300. doi: 10.1117/12.2210838.

- [25] J. G. Bai *u др.*, «Mitigation of thermal lensing effect as a brightness limitation of high-power broad area diode lasers», представлено на SPIE OPTO, A. A. Belyanin и Р. М. Smowton, Ред., San Francisco, California, фев. 2011, с. 79531F. doi: 10.1117/12.875849.
- [26] C. Lauer *u др.*, «Advances in performance and beam quality of 9xx-nm laser diodes tailored for efficient fiber coupling», представлено на SPIE LASE, М. S. Zediker, Ред., San Francisco, California, USA, фев. 2012, с. 824111. doi: 10.1117/12.908421.
- [27] M. Winterfeldt, P. Crump, S. Knigge, A. Maabdorf, U. Zeimer, и G. Erbert, «High Beam Quality in Broad Area Lasers via Suppression of Lateral Carrier Accumulation», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, т. 27, вып. 17, сс. 1809–1812, сен. 2015, doi: 10.1109/LPT.2015.2443186.
- [28] P. Della Casa *u др.*, «High power broad-area lasers with buried implantation for current confinement», *Semicond. Sci. Technol.*, т. 34, вып. 10, с. 105005, окт. 2019, doi: 10.1088/1361-6641/ab39b8.
- [29] S. Arslan *u др.*, «Efficient, High Power, Wide-Aperture Single Emitter Diode Lasers Emitting at 915 nm», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, т. 36, вып. 16, сс. 977–980, авг. 2024, doi: 10.1109/LPT.2024.3419552.
- [30] H.-C. Eckstein, U. D. Zeitner, A. Tünnermann, W. Schmid, U. Strauss, и C. Lauer, «Mode shaping in semiconductor broad area lasers by monolithically integrated phase structures», *Opt. Lett.*, т. 38, вып. 21, с. 4480, ноя. 2013, doi: 10.1364/OL.38.004480.
- [31] H. Wenzel, P. Crump, J. Fricke, P. Ressel, и G. Erbert, «Suppression of Higher-Order Lateral Modes in Broad-Area Diode Lasers by Resonant Anti-Guiding», *IEEE J. Quantum Electron.*, т. 49, вып. 12, сс. 1102–1108, дек. 2013, doi: 10.1109/JQE.2013.2288002.
- [32] P. Crump u др., «Development of high-power diode lasers with beam parameter product below 2 mm×mrad within the BRIDLE project», представлено на SPIE LASE, M. S. Zediker, Ред., San Francisco, California, United States, мар. 2015, с. 93480D. doi: 10.1117/12.2077617.
- [33] D. Botez и D. R. Scifres, Ред., *Diode Laser Arrays*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [34] S. O. Slipchenko *u др.*, «Stable Lateral Far Field of Highly Dense Arrays of Uncoupled Narrow Stripe Ridge Waveguide 1060 nm Lasers», *J. Light. Technol.*, т. 40, вып. 9, сс. 2933–2938, май 2022, doi: 10.1109/JLT.2022.3144663.
- [35] R. Platz, G. Erbert, W. Pittroff, M. Malchus, K. Vogel, и G. Tränkle, «400 um stripe lasers for high-power fiber coupled pump modules», *High Power Laser Sci. Eng.*, т. 1, вып. 1, сс. 60–67, мар. 2013, doi: 10.1017/hpl.2012.1.
- [36] В. King *u др.*, «GaAs-Based Wide-Aperture Single Emitters with 68 W Output Power at 69% Efficiency Realized Using a Periodic Buried-Regrown-Implant-Structure», в 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe &

European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), Munich, Germany: IEEE, июн. 2023, сс. 1–1. doi: 10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10232435.

- [37] Md. J. Miah, A. Boni, S. Arslan, D. Martin, P. D. Casa, и P. Crump, «Optimizing Vertical and Lateral Waveguides of kW-Class Laser Bars for Higher Peak Power, Efficiency and Lateral Beam Quality», *IEEE Photonics J.*, т. 14, вып. 3, сс. 1–5, июн. 2022, doi: 10.1109/JPHOT.2022.3165399.
- [38] H. An, Y. Xiong, C.-L. J. Jiang, B. Schmidt, и G. Treusch, «Methods for slow axis beam quality improvement of high power broad area diode lasers», представлено на SPIE LASE, M. S. Zediker, Ред., San Francisco, California, United States, мар. 2014, с. 89650U. doi: 10.1117/12.2040986.
- [39] R. Platz, B. Eppich, J. Rieprich, W. Pittroff, G. Erbert, и P. Crump, «High duty cycle, highly efficient fiber coupled 940-nm pump module for high-energy solid-state lasers», *High Power Laser Sci. Eng.*, т. 4, с. е3, 2016, doi: 10.1017/hpl.2016.5.
- [40] A. Pietrzak *u др.*, «1060-nm Ridge Waveguide Lasers Based on Extremely Wide Waveguides for 1.3-W Continuous-Wave Emission Into a Single Mode With FWHM Divergence Angle of \$9^{\circ}\times 6^{\circ}\$», *IEEE J. Quantum Electron.*, т. 48, вып. 5, сс. 568–575, май 2012, doi: 10.1109/JQE.2012.2184526.
- [41] S. Zhao *u др.*, «High-power high-brightness 980 nm lasers with >50% wallplug efficiency based on asymmetric super large optical cavity», *Opt. Express*, т. 26, вып. 3, с. 3518, фев. 2018, doi: 10.1364/OE.26.003518.
- [42] S. O. Slipchenko, A. A. Podoskin, N. A. Pikhtin, A. Yu. Leshko, A. V. Rozhkov, и I. S. Tarasov, «Semiconductor InGaAs/GaAs injection lasers with waveguides based on a single quantum well», *Tech. Phys. Lett.*, т. 39, вып. 4, сс. 364–366, апр. 2013, doi: 10.1134/S1063785013040251.
- [43] N. V. Dikareva, B. N. Zvonkov, I. V. Samartsev, S. M. Nekorkin, N. V. Baidus, и А. A. Dubinov, «GaAs-Based Laser Diode with InGaAs Waveguide Quantum Wells», *Semiconductors*, т. 53, вып. 12, сс. 1709–1711, дек. 2019, doi: 10.1134/S1063782619160085.
- [44] I. S. Shashkin *u др.*, «Single-Mode Lasers (1050 nm) of Mesa-Stripe Design Based on an AlGaAs/GaAs Heterostructure with an Ultra-Narrow Waveguide», *Semiconductors*, т. 54, вып. 4, сс. 489–494, апр. 2020, doi: 10.1134/S1063782620040181.
- [45] D. A. Veselov, Y. K. Bobretsova, A. A. Klimov, K. V Bakhvalov, S. O. Slipchenko, и N. A. Pikhtin, «Internal optical loss and internal quantum efficiency of a high-power GaAs laser operating in the CW mode», *Semicond. Sci. Technol.*, т. 36, вып. 11, с. 115005, 2021, doi: 10.1088/1361-6641/ac1f83.