

УДК 621.373.826

**И.С. Набиуллин^{1,2}, С.О. Слипченко³, И.С. Шашкин³,
Н.А. Рудова³, А.Э. Ризаев³, И.С. Васильевский², Н.А. Пихтин³**

¹ Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
Пермь, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ ОДНОМОДОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ 950-980 НМ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Исследуются параметры гребенчатого волновода полупроводниковых лазерных диодов с точки зрения достижения максимальной мощности в одномодовом режиме. Проведено измерение ватт-амперных и вольт-амперных характеристик, спектра, расходимости излучения по обеим осям в зависимости от тока накачки; построены зависимости порогового тока и дифференциальной эффективности от длины резонатора; определены потери и внутренний квантовый выход. Наибольшую оптическую мощность в одну сторону с выходной грани естественно-сколотого резонатора продемонстрировали лазерные диоды длиной 2000 мкм – 190 мВт при токе накачки 375 мА.

Ключевые слова: лазерный диод, одномодовый режим лазерной генерации, гребенчатый волновод.

AN ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS STUDY OF HIGH-POWER SINGLE-MODE 950-980 NM RANGE LASER DIODES

¹ Perm Research and Production Instrument-Making Company,
Perm, Russian Federation

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow Russian Federation

³ Physical-Technical Institute named after V.I. A.F. Ioffe of the Russian Academy
of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

The study considers ridge waveguide characteristics in context of achieving maximum power and single-mode lasing. The watt-ampere and current-voltage characteristics, the spectrum, the radiation divergence along both axes depending on the pump current are measured, the dependences of the threshold current and differential efficiency vs the resonator length are plotted, the losses and the internal quantum yield are determined. Laser diodes with 2000 um resonator length showed the highest optical power – 190 mW at 375 mA pump current.

Ключевые слова: laser diode, single-mode lasing, ridge waveguide.

Введение

Полупроводниковые гетероструктуры позволяют реализовать лазеры в широком диапазоне длин волн: от ультрафиолетовой [1] до дальней инфракрасной области [2]. На данный момент наиболее мощными и эффективными являются лазерные диоды на основе системы твердых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs, излучающие в диапазоне длин волн 900–1100 нм [3,4]. Особый частный интерес вызывают лазеры, достигающие высокой мощности в одномодовом режиме генерации в диапазоне 950–980 нм, который удобен для накачки легированных эрбием оптических волокон [5, 6]. Данные узлы называются усилителями спонтанной эмиссии и используются в системах передачи информации [7], навигационных приборах [8], системах опроса оптических датчиков [9] и в иных приложениях, где требуются очень узкие и контролируемые пучки света с высокой степенью когерентности.

Для достижения возможности прокачки многоканальных систем, увеличения точности и чувствительности приборов требуется обеспечивать высокую оптическую мощность источников излучения. В одномодовых лазерах мощность, как правило, ограничена зажиманием мод более высокого порядка при повышении тока накачки, а также высокими оптическими потерями [10]. При использовании двойных гетероструктур с отдельным электронным и оптическим ограничением (РО ДГС) и квантовой ямой увеличение толщины волновода позволяет снизить оптические потери, однако это может приводить к возникновению поперечных (по быстрой оси) мод высших порядков [10]. Повышать мощность возможно также путем увеличения объема активной области за счет числа квантовых ям [11], их толщины (в пределах возможных составов тройного раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и критических толщин) [12], длины резонатора и ширины латерального (ребенчатого) волновода [13], что увеличивает объем прокачки электрическим током. Увеличение размеров резонатора также улучшает отвод тепла [13]. Увеличение активной области, однако, имеет предел, обусловленный, в частности, дополнительными электрическими и оптическими потерями за счет увеличения сопротивления структуры и, как следствие, перегрева [14], а также ростом вклада безызлучательной рекомбинации [15]. Известны единичные работы, где для повышения максимальной мощности и для выпрямления ватт-амперной характеристики (ВтАХ) при сохранении одно-

дового режима работы используются наклонные [16] и искривленные [17] в плоскости гетероструктуры волновода.

Толщина волновода, кроме того, влияет на расходимость излучения. Для достаточно толстых волноводов, начиная с определенного значения (специфичного для каждой конструкции) [18], чем больше толщина волновода, тем меньше его расходимость [19]. Уменьшение расходимости важно для повышения эффективности ввода излучения из чипа в оптическое волокно [20] либо для увеличения дальности действия систем, использующих лазеры с выводом излучения в открытое пространство [21].

Одновременно с высокой мощностью требуется высокий срок службы. Сохранение исходных параметров лазера со временем достигается путем расширения волновода и, как следствие, уменьшения плотности мощности на единицу площади [10]. Не менее значимый вклад в увеличение срока службы вносит пассивация сколотых излучающих граней полупроводникового лазера [22].

На модовый состав лазерной генерации влияют главным образом модальное усиление и модальные потери для каждой моды, а управлять модальными усилением и потерями можно, меняя геометрию полоска: ширину и толщину гребенчатого волновода, ширину канавок, а также используя другие более сложные методы. В частности, известны работы по оптимизации конструкции поперечного волновода, сформированного в планарной гетероструктуре, для подавления мод высших порядков [3, 10, 23]. В данных работах расчет модового распределения использовался для определения оптимального положения квантовой ямы в волноводе. При расположении квантовой ямы в точке, где усиление фундаментальной моды превышает усиление мод высших порядков, достигается режим одномодовой генерации [24]. Благодаря данной конструкции возможно реализовать лазер с одновременно малым числом мод и низкой расходимостью. Однако для реализации одномодового режима как для поперечного, так и для продольного волновода необходимо решать задачу, связанную с расчетом 2D-распределения мод и оптимизацией параметров конструкции гребенчатого волновода.

Таким образом, основной целью работы является разработка мощных одномодовых лазерных диодов 950–980 нм диапазона длин волн для применения в качестве источников лазерного излучения в усилителях спонтанной эмиссии.

Результаты расчетов одномодового гребенчатого волновода

Одномодовым называется лазер, в котором пространственное распределение интенсивности электромагнитного излучения в обоих направлениях, перпендикулярных оси резонатора, имеет характер фундаментальной моды. Сужая ширину полоска, т.е. сужая область ограничения света в латеральном направлении до единиц микрон, можно получить пространственно-одномодовый лазер [23].

Для лазеров с узким мезаполосковым контактом был проведен расчет модовой структуры и перегрева активной области для 2D-волновода. Такое моделирование позволяет выбрать оптимальные значения ширины полоска, ширины мезы и глубины травления с точки зрения осуществления эффективной селекции мод и обеспечения одномодового режима генерации.

На рис. 1 схематически представлен вид латерального волновода мезаполосковой конструкции. Был проведен расчет распределения мод 0-го, 1-го и 2-го порядка в 2D-волноводе в зависимости от его параметров (ширина полоска, глубина травления).



Рис. 1. Латеральный 2D-волновод мезаполосковой конструкции

На рис. 2 представлен профиль распределения 0-й моды (см. рис. 2, *а*) и моды 1-го порядка (см. рис. 2, *б*) 2D-волновода с учетом перегрева активной области относительно температуры теплоотвода 25 °С (рис. 3).

Условия расчета были следующие: $L = 2,5$ мм, $P_{\text{thermal}} = 0,8$ Вт, ширина области тепловыделения – 6 мкм, в Comsol использовалась опция Boundary Heat Source под активной областью, было включено поддержание постоянной температуры 25 °С на границе медного теплоотвода шириной 6 мм (от *p*-эмиттера до границы 2,5 мм).

Расчет показал, что максимальной селективностью мод обладает конструкция с шириной мезаполоска 4 мкм и минимальной величиной

остаточной толщины р-эмиттера. На рис. 4 представлена зависимость отношения модального усиления 0-й моды к модальному усилению для моды 1-го порядка от остаточной толщины р-эмиттера.

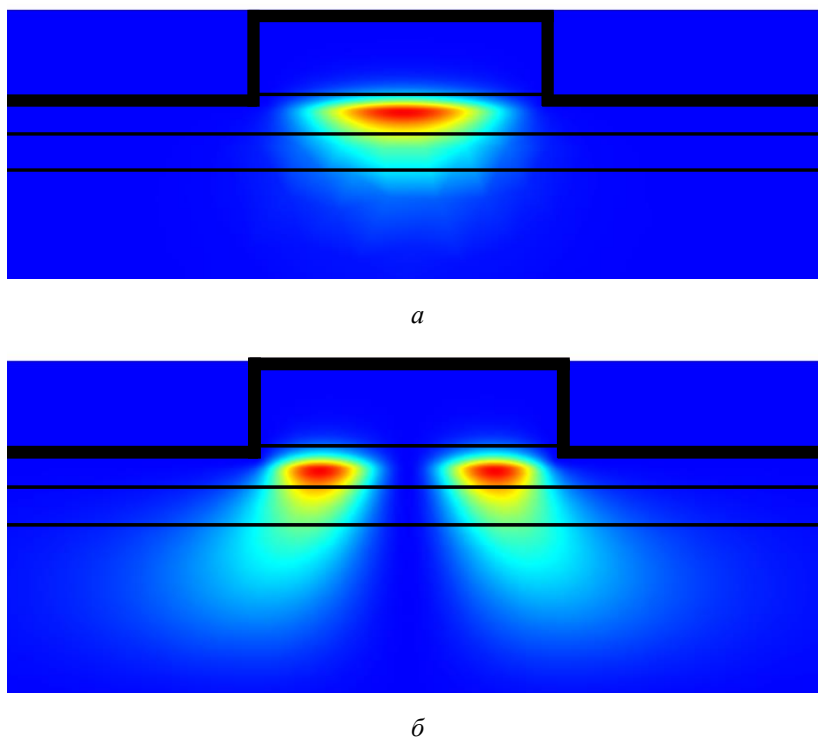


Рис. 2. Профиль распределения мод в 2D-волноводе: *a* – 0-я мода; *б* – мода 1-го порядка

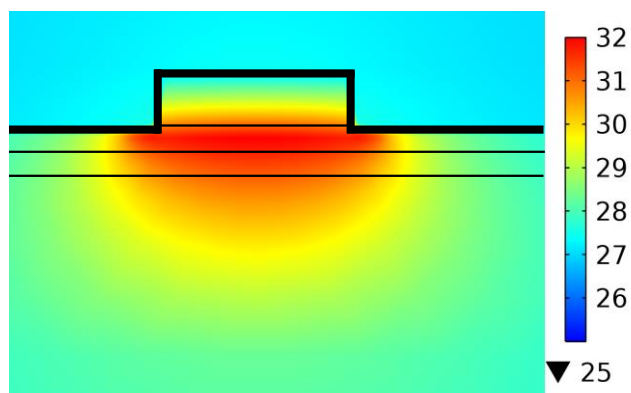


Рис. 3. Перегрев активной области в градусах Цельсия (на шкале)

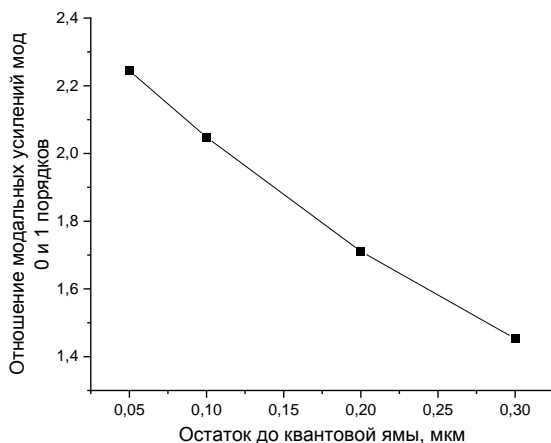


Рис. 4. Зависимость отношения модального усиления 0-й моды к модальному усилению моды 1-го порядка от остаточной толщины до квантовой ямы

Изготовление лазерных чипов

Для создания и исследования топологии лазеров была взята двойная гетероструктура с отдельным ограничением в системе материалов AlGaAs/GaAs с InGaAs квантовой ямой, выращенная на подложке GaAs. В качестве входного контроля полупроводниковых слоев гетероструктуры был использован метод спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ). Результаты исследования спектров ФЛ квантоворазмерного слоя и различных слоев гетероструктуры представлены на рис. 5.

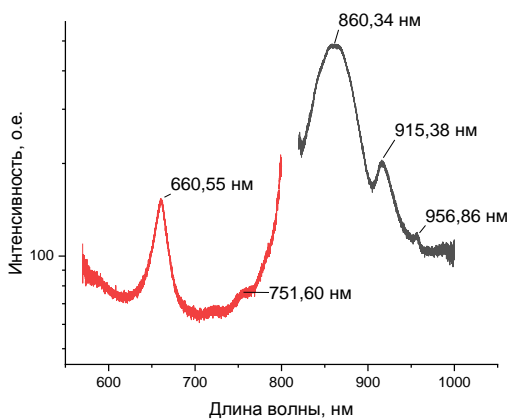


Рис. 5. Спектр ФЛ различных слоев гетероструктуры

Для квантоворазмерной активной области энергия излучаемых фотонов определяется расстоянием между уровнями размерного квантования электронов и дырок в потенциальной яме. ФЛ квантоворазмерного слоя приходится на длины волн 956 и 915 нм, которые соответствуют излучению с первого и второго уровня размерного квантования. На спектре ФЛ различных слоев гетероструктуры наблюдается множество ярко выраженных максимумов. По максимуму пика (в коротковолновой области до 870 нм) по формуле $E_g = 1,424 + 1,155x + 0,37x^2$ [25] можно определить долю алюминия. Пик в области длины волны 660 нм соответствует материалу $Al_{0,35}Ga_{0,65}As$, пик в области 750 нм – $Al_{0,18}Ga_{0,82}As$, пик в области 800 нм – $Al_{0,11}Ga_{0,89}As$, а пик в области длины волны 860 нм соответствует чистому GaAs.

Создание одномодового лазера обычно отличается от многомодового на этапе постростовой обработки лазерной гетероструктуры – изготовления активного элемента с полосковым контактом. Конструкция активного элемента выбирается для ограничения света в плоскости, параллельной $p-n$ переходу, и с целью обеспечения латерального волновода. Для торцевых лазеров наиболее простой и доступной с технологической точки зрения является мезаполосковая конструкция, когда сквозь слои гетероструктуры вытравливаются прямые или наклонные канавки (мезы) [26].

На первом этапе проводилось формирование мезаполоска. Сначала поступившая на постростовую обработку часть гетероструктуры прошла многостадийный процесс отмытки (обезжиривания) в органических растворителях. Далее на очищенную пластину наносился фоторезист и производилась его низкотемпературная сушка. На машине экспонирования с помощью необходимого фотошаблона производилась засветка фоторезиста. Затем в проявителе производилось удаление проэкспонированных участков фоторезиста, чтобы в итоге на пластине осталась только сформированная фоторезистивная маска. Для повышения устойчивости фотомаски к химическим воздействиям и улучшения адгезии проводилась дополнительная сушка. Для обеспечения необходимой ширины полоска травление мезаканавок проводилось методом плазмохимического травления. На рис. 6 представлено полученное на сканирующем электронном микроскопе изображение поперечного скола с вытравленной мезой. Видно, что была реализована конструкция

мезаполоска, соответствующая расчетной модели с оптимальными результатами. Меза вытравливается в верхнем эмиттере, что позволяет избежать дефектов в волноводном слое и активной области, а также поверхностной рекомбинации на боковых стенках. Этап завершался удалением фоторезиста и отмывкой пластины в органических растворителях.

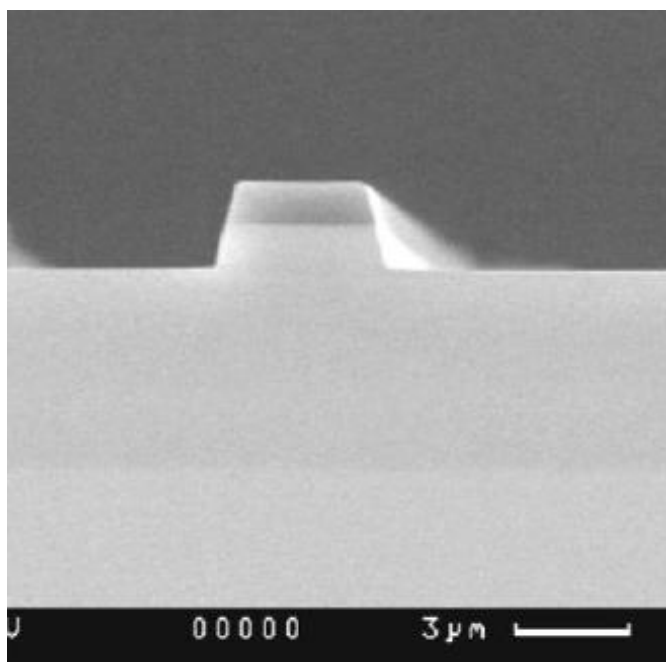


Рис. 6. Изображение, полученное на сканирующем электронном микроскопе, для поперечного скола гетероструктуры с вытравленными слоями

На втором этапе пассивные области закрывались защитным диэлектриком, а в области мезаполоска формировался омический контакт к p -стороне. В качестве диэлектрика использовался SiO_2 , а омического контакта – композиция Ti/Pt/Au .

На третьем этапе производилось формирование омического n -контакта. Сначала пластина утоньшалась со стороны подложки. Затем на эту поверхность напылялся и вжигался омический n -контакт.

Далее готовая пластина раскалывалась сначала на линейки различной длины, а затем на отдельные чипы. В результате был изготовлен набор одномодовых лазерных чипов с мезаполосковой конструкцией с длинами резонатора 500, 1000 и 2000 мкм и зеркалами, образованными естественными сколами ($R_1 = R_2 = 30\%$).

Характеризация полупроводниковых одномодовых лазеров

Предварительное тестирование является важным этапом перед пайкой чипов на теплоотвод. На этом этапе можно провести первичную оценку качества структуры. Критерием оценки служат электрооптические характеристики, получаемые на основании вольт-амперной (ВАХ) и ватт-амперной характеристик (ВтАХ).

Наиболее важными критериями оценки качества лазера являются пороговый ток и дифференциальная эффективность, т.е. наклон ВтАХ. Пороговый ток определяется в точке пересечения ВтАХ с осью тока накачки, а наклон измеряется на прямом участке ВтАХ вблизи порога генерации и определяется как отношение изменения мощности к изменению тока. Среди набора лазерных чипов одной длины для пайки выбираются чипы с минимальным пороговым током и максимальным наклоном ВтАХ.

В процессе тестирования было отобрано 12 чипов различной длины (500, 1000 и 2000 мкм) с наилучшими характеристиками. Далее чипы были припаяны на медные теплоотводы слоями гетероструктуры вниз. Рядом с чипом на этот же теплоотвод был припаян изоляционный кубик с проволокой, электрический контакт кубика с чипом осуществлялся с помощью золотых проволочек.

На рис. 7–9 представлены характерные зависимости ВАХ и ВтАХ для каждой длины резонатора (500, 1000 и 2000 мкм) кристалла лазера. Измерения проводились при непрерывной накачке лазера на теплоотводе с помощью источника питания (драйвера) марки «Эльфолум», который обеспечивает также поддержание постоянной температуры теплоотвода лазера на уровне $25 \pm 0,1$ °С. Оптическая мощность измерялась болометром марки ОРНІR с выходного естественно-сколотого зеркала лазера в одну сторону. Как видно на начальном участке ВтАХ, лазеры имеют близкие значения мощности; с ростом тока накачки ВтАХ лазеров с меньшей длиной резонатора быстрее насыщаются. Наибольшую оптическую мощность в одну сторону с выходной грани естественно-сколотого резонатора продемонстрировали лазерные диоды длиной 2000 мкм – 190 мВт при токе накачки 375 мА. Важно отметить, что при нанесении на переднюю и заднюю сколотые грани резонатора лазера стандартных просветляющего (отражение 5 %) и отражающего (отражение 99 %) покрытий оптическая мощность с выходной грани возрастет приблизительно в 2 раза.

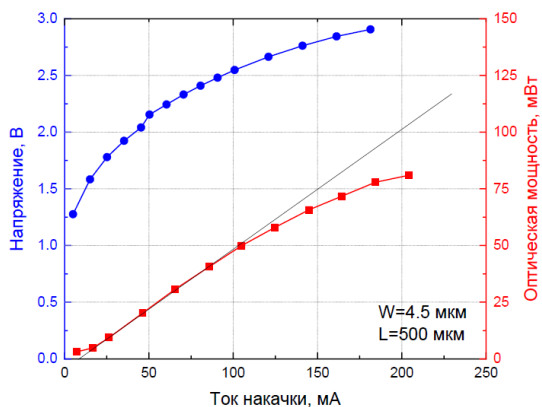


Рис. 7. ВАХ и ВтАХ лазера с естественно-сколотыми гранями и резонатором длиной 500 мкм при непрерывном режиме накачки при комнатной температуре

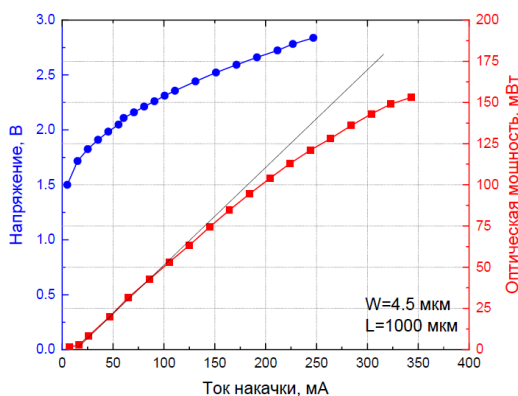


Рис. 8. ВАХ и ВтАХ лазера с естественно-сколотыми гранями и резонатором длиной 1000 мкм при непрерывном режиме накачки при комнатной температуре

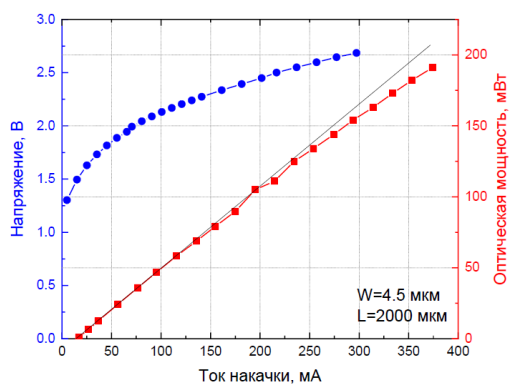


Рис. 9. ВАХ и ВтАХ лазера с естественно-сколотыми гранями и резонатором длиной 2000 мкм при непрерывном режиме накачки при комнатной температуре

Аппроксимация ВАХ проводилась на участке 50–150 мА. В таблице представлены основные электрооптические характеристики лазеров разной длины.

Сравнение характеристик лазеров при одинаковом токе накачки

Параметр	Резонатор длиной 500 мкм	Резонатор длиной 1000 мкм	Резонатор длиной 2000 мкм
$U_{отс}, В$	1,87	1,81	1,69
$R, Ом$	6,6	4,88	4,35
$P_{опт}(I = 200 мА), мВт$	80	101	105
$I_{th}, мА$	9,15	11,4	15,1

Гетероструктура показала высокую внутреннюю квантовую эффективность на пороге генерации, близкую к 100 %, и низкие внутренние оптические потери около $1 см^{-1}$, а характеристическая плотность порогового тока составила $127 А/см^2$.

Спектры генерации в непрерывном режиме работы были измерены на нескольких уровнях токовой накачки. Типичные результаты измерений спектров лазеров разной длины резонатора представлены на рис. 10–12. Длина волны излучения лазеров лежит в диапазоне 950–980 нм. С ростом тока накачки спектры сдвигаются в более длинноволновую область вследствие саморазогрева кристалла (чипа). Для всех лазеров ширина спектра на полувысоте на начальных токах накачки составила доли ангстрем. Это может быть связано с особенностями выхода лазера на режим генерации.

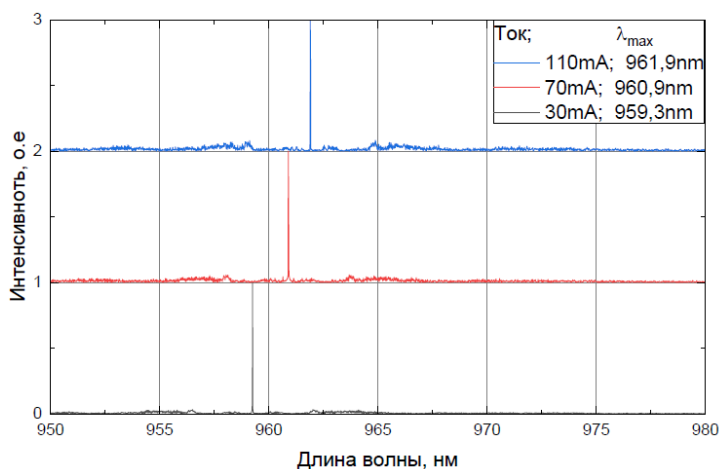


Рис. 10. Спектры генерации лазеров с длиной резонатора 500 мкм

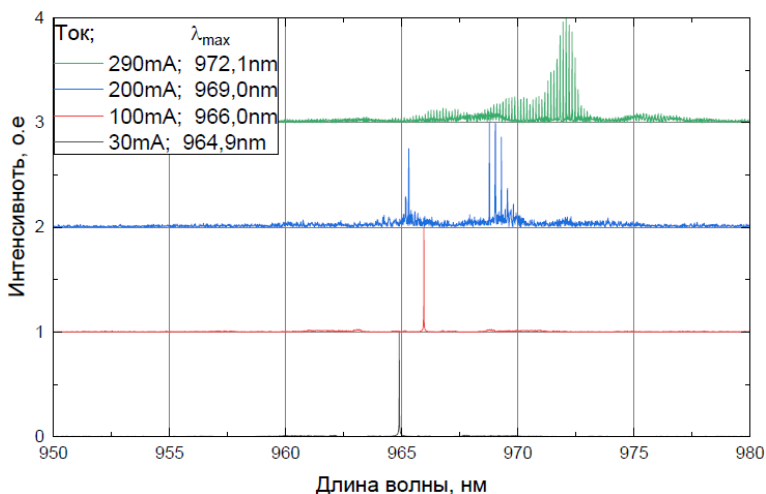


Рис. 11. Спектры генерации лазеров с длиной резонатора 1000 мкм

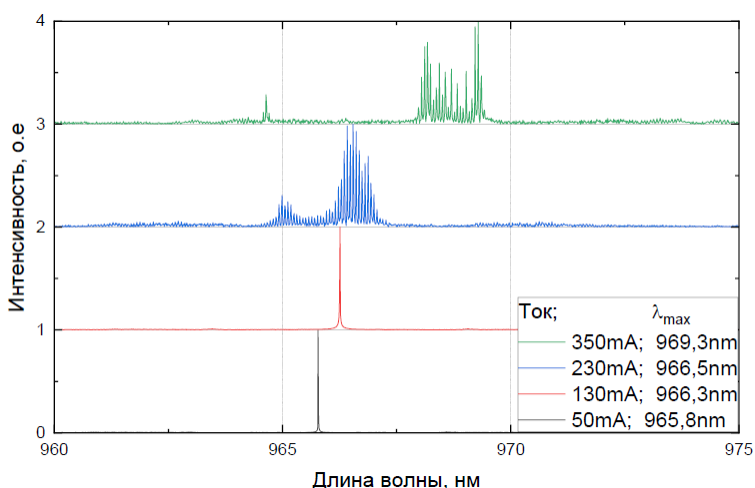


Рис. 12. Спектры генерации лазеров с длиной резонатора 2000 мкм

В качестве типичного распределения интенсивности дальнего поля по медленной и быстрой оси были взяты распределения для лазеров с длиной резонатора 2000 мкм (рис. 13–14). В поперечном направлении лазеры со всеми длинами резонаторов работают на фундаментальной моде при всех режимах накачки. С ростом тока накачки расходимость излучения по быстрой оси практически не меняется и составляет около 25° . В латеральном направлении излучение лазеров имеет характер фундаментальной моды. Расходимость излучения на полувысоте по медленной оси увеличивается с ростом тока накачки.

Таким образом, лазеры излучают моду нулевого порядка в вертикальном направлении (по быстрой оси) вплоть до токов накачки 350 мА и в латеральном направлении (по медленной оси) до тока накачки 120 мА.

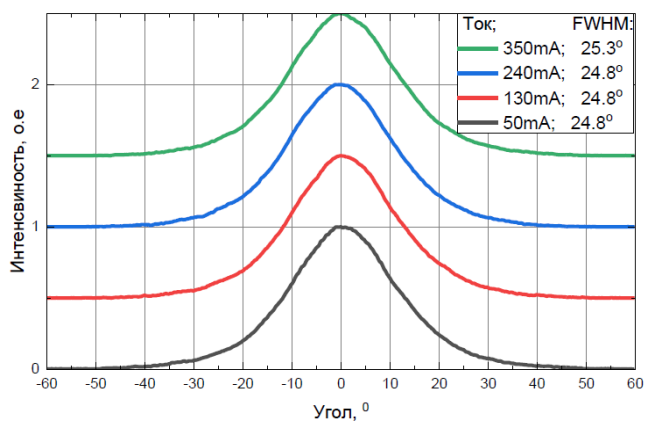


Рис. 13. Распределение интенсивности дальнего поля по быстрой оси для лазеров с длиной резонатора 2000 мкм

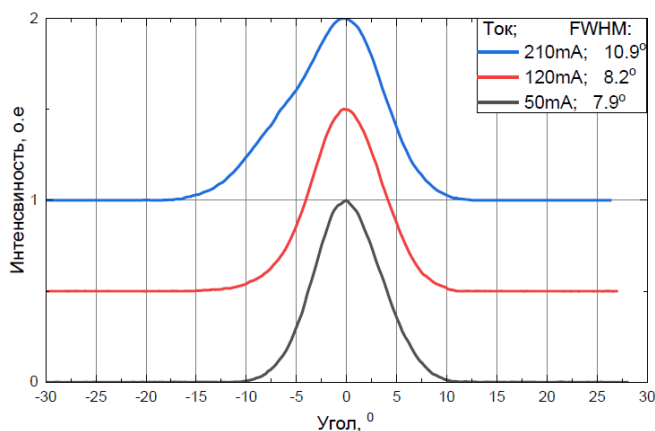


Рис. 14. Распределение интенсивности дальнего поля по медленной оси для лазеров с длиной резонатора 2000 мкм

Заключение

В результате работы было проведено исследование лазерной гетероструктуры, излучающей на длине волны 950–980 нм. Для данной гетероструктуры было выполнено оценочное моделирование гребенчатого волновода: выбраны оптимальная ширина волновода, расстояние

между волноводами и глубина травления (высота волновода), затем проведены постростовые операции для формирования полоскового контакта. Далее гетероструктура была разделена на отдельные чипы, которые монтировались на медный теплоотвод.

Для изготовленных одномодовых лазеров с различными длинами резонаторов (500, 1000, 2000 мкм) была проведена стандартная характеристика: были получены ватт- и вольт-амперные характеристики, исследованы спектры лазерной генерации и измерена расходимость излучения в непрерывном режиме работы при комнатной температуре. Все изготовленные лазеры излучают на длине волны около 970 нм и имеют расходимость излучения перпендикулярно слоям гетероструктуры (по быстрой оси) не более 25° . На основе проведенных измерений были получены значения основных параметров, описывающих эффективность и качество гетероструктуры: выходная оптическая мощность, напряжение отсечки, характеристическая плотность тока накачки, внутренние оптические потери, внутренний квантовый выход и др. Для изготовленных лазеров напряжение отсечки составило около 1,8 В, характеристическая плотность тока накачки – 127 А/см^2 , высокий внутренний квантовый выход на пороге генерации около 100 % и внутренние оптические потери около 1 см^{-1} . Наилучшие мощностные характеристики продемонстрировали лазеры с длиной резонатора 2000 мкм: при сравнении лазеров с различными длинами резонаторов на одинаковом рабочем токе 200 мА выходная оптическая мощность составила 105 мВт с апертуры 4 мкм. В абсолютных значениях при дальнейшем увеличении тока накачки наибольшую оптическую мощность также продемонстрировали лазерные образцы с длиной резонатора 2000 мкм – 190 мВт при токе накачки 375 мА.

Таким образом, были определены оптимальные геометрические параметры гребенчатого волновода для данной конструкции лазерной гетероструктуры для достижения максимальной мощности в одномодовом режиме лазерной генерации.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение срока службы прибора на достигнутых мощностях одномодовой лазерной генерации.

Список литературы

1. Light confinement and high current density in UVB laser diode structure using Al composition-graded p-AlGaIn cladding layer / K. Sato [и др.] // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics Inc. – 2019. – Т. 114, № 19. – Р. 191103.

2. Stephan S., Frederic D., Markus-Christian A. Novel InP- and GaSb-based light sources for the near to far infrared // *Semiconductor Science and Technology*. IOP Publishing. – 2016. – Т. 31, № 11. – P. 113005.

3. 16 W continuous-wave output power from 100 μm -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure / N.A. Pikhtin [et al.] // *Electron. Lett.* – 2004. – Т. 40, № 22. – P. 1413–1414.

4. Optical gain and high-power operation of edge-emitting lasers based on quantum well-dots / M.V. Maximov [et al.] // *Proc. – Int. Conf. Laser Opt. 2020, ICLO 2020*; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020.

5. Lee J.H., Lee W.J., Park N. Comparative study on temperature-dependent multichannel gain and noise figure distortion for 1.48- and 0.98- μm pumped EDFA's // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 1998. – Т. 10, № 12. – P. 1721–1723.

6. Temperature-dependent study on L-band EDFA characteristics pumped at 980 nm and 1480 nm in phosphorus and aluminum-rich erbium-doped silica fibers / Z. Zhai [et al.] // *J. Light. Technol.* – 2022. – Т. 40, № 14. – P. 4819–4824.

7. Dejneka M., Samson B. Rare-earth-doped fibers for telecommunications applications // *MRS Bull.* Cambridge University Press. – 1999. – Т. 24, № 9. – P. 39–45.

8. Lefèvre H.C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope // *Optical Review*. Optical Society of Japan. – 1997. – Т. 4, № 1, PART A. – P. 20–27.

9. FBG interrogator based on spectral edge optical source / C. Florida [et al.] // *Opt. InfoBase Conf. Pap.* – 2018.

10. Лазерные диоды ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$) с узкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости и низкими внутренними оптическими потерями / С.О. Слипченко [и др.] // *Письма в Журнал технической физики*. – 2003. – Т. 29, № 23. – С. 26–34.

11. Соколова З.Н., Тарасов И.С., Асрян Л.В. Влияние числа квантовых ям в активной области на линейность ватт-амперной характеристики полупроводникового лазера // *Физика и техника полупроводников*. – 2012. – Т. 46, № 8. – С. 1067–1073.

12. Влияние толщины активной области на характеристики полупроводниковых лазеров на основе асимметричных гетероструктур AlGaAs/GaAs/InGaAs с расширенным волноводом / Д.А. Винокуров [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 2010. – Т. 44, № 2. – С. 246.

13. Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур / Д.А. Лившиц [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 3. – С. 380.

14. Температурная зависимость внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах ($\lambda = 900\text{--}920$ нм) / Н.А. Пихтин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 10. – С. 1411–1416.

15. Влияние «объема» активной среды на излучательные свойства лазерных гетероструктур с выходом излучения через подложку / С.М. Некоркин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 1. – С. 75.

16. Scifres D.R., Streifer W., Burnham R.D. GaAs/GaAlAs diode lasers with angled pumping stripes // IEEE J. Quantum Electron. – 1978. – Т. 14, № 4. – P. 223–227.

17. Scifres D.R., Streifer W., Burnham R.D. Curved stripe GaAs:GaAlAs diode lasers and waveguides // Appl. Phys. Lett. – 1978. – Т. 32, № 4. – P. 231–234.

18. Мощные полупроводниковые лазеры ($\lambda = 0,89\text{...}1,06$ мкм) на основе квантоворазмерных напряженных структур в системе InGaAs/(Al)GaAs с малой расходимостью излучения / П.В. Булаев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Д.Б. Никитин, А.В. Петровский, И.Д. Залевский, В.П. Коняев, В.В. Оськин, М.В. Зверков, В.А. Симаков Г.М.З. // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32, № 3. – С. 213–215.

19. Андреев А.Ю. И.С.Т. Мощные лазеры ($\lambda = 808\text{--}850$ нм) на основе асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т. 40, № 5. – С. 628–632.

20. Мощные диодные лазеры с длиной волны 1,06 мкм на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs с уменьшенной расходимостью в плоскости, перпендикулярной *p-n*-переходу / В.В. Безотосный, Е.И. Давыдова, И.Д. Залевский, В.П. Коняев, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица В.А.Ш. // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27, № 1. – С. 1–2.

21. Матричный фотоприемный модуль на основе гетероструктуры InGaAs / InP для формирователей 3D-изображений в коротковолновом ИК-диапазоне / И.Д. Бурлаков [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 383–392.

22. Stability of ZnSe-passivated laser facets cleaved in air and in ultra-high vacuum / J.E. Boschker [и др.] // IEEE Photonics J. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2022. – Т. 14, № 3.

23. Излучательные характеристики мощных полупроводниковых лазеров (1060 нм) с узким мезаполосковым контактом на основе

асимметричных гетероструктур AlGaAs/GaAs с широким волноводом / И.С. Шашкин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2020. – Т. 54, № 4. – С. 408.

24. Инжекционный лазер: пат. 2 259 620 (13) с1 USA / Пихтин Н.А. – 2004.

25. NSM Archive – Aluminium Gallium Arsenide (AlGaAs) – Band structure and carrier concentration [Электронный ресурс]. – URL: http://matprop.ru/AlGaAs_bandstr (дата обращения: 12.05.2023).

26. Срыв генерации в мощных полупроводниковых лазерах / С.О. Слипченко [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 10. – С. 1409–1412.

References

1. K. Sato et al. Light confinement and high current density in UVB laser diode structure using Al composition-graded p-AlGaN cladding layer *Appl. Phys. Lett.* American Institute of Physics Inc., 2019, vol. 114, no. 19, 191103 p.

2. Stephan S., Frederic D., Markus-Christian A. Novel InP- and GaSb-based light sources for the near to far infrared. *Semiconductor Science and Technology*. IOP Publishing, 2016, vol. 31, no. 11, 113005 p.

3. Pikhtin N.A. et al. 16 W continuous-wave output power from 100 μm -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure. *Electron. Lett.*, 2004, vol. 40, no. 22, pp. 1413-1414.

4. Maximov M.V. et al. Optical gain and high-power operation of edge-emitting lasers based on quantum well-dots. *Proc. Int. Conf. Laser Opt. 2020, ICLO 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020.

5. Lee J.H., Lee W.J., Park N. Comparative study on temperature-dependent multichannel gain and noise figure distortion for 1.48- and 0.98- μm pumped EDFA's. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1998, vol. 10, no. 12, pp. 1721-1723.

6. Zhai Z. et al. Temperature-dependent study on L-band EDFA characteristics pumped at 980 nm and 1480 nm in phosphorus and aluminum-rich erbium-doped silica fibers. *J. Light. Technol.*, 2022, vol. 40, no. 14, pp. 4819-4824.

7. Dejneka M., Samson B. Rare-earth-doped fibers for telecommunications applications. *MRS Bull. Cambridge University Press.*, 1999, vol. 24, no. 9, pp. 39-45.

8. Lefèvre H.C. Fundamentals of the interferometric fiber-optic gyroscope. *Optical Review. Optical Society of Japan*, 1997, vol. 4, no. 1, PART A, pp. 20-27.

9. Florida C. et al. FBG interrogator based on spectral edge optical source. *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, 2018.

10. Slipchenko S.O. et al. Lazernye diody ($\lambda = 0,98 \mu\text{m}$) s uzkoj diagrammoi napravlenosti v vertikal'noi ploskosti i nizkimi vnutrennimi opticheskimi poteriami [Laser diodes ($\lambda = 0.98 \mu\text{m}$) with a narrow directional pattern in the vertical plane and low internal optical losses]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2003, vol. 29, no. 23, pp. 26-34.

11. Sokolova Z.N., Tarasov I.S., Asrian L.V. Vliianie chisla kvantovykh iam v aktivnoi oblasti na lineinost' vatt-ampvernoi kharakteristiki poluprovodnikovogo lazera [Influence of the number of quantum wells in the active region on the linearity of the watt-ampere characteristic of a semiconductor laser]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2012, vol. 46, no. 8, pp. 1067-1073.

12. Vinokurov D.A. et al. Vliianie tolshchiny aktivnoi oblasti na kharakteristiki poluprovodnikovyx lazerov na osnove asimmetrichnykh geterostruktur AlGaAs/GaAs/InGaAs s rasshirenym volnovodom [Influence of the active region thickness on the characteristics of semiconductor lasers based on asymmetric AlGaAs/GaAs/InGaAs heterostructures with an expanded waveguide]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2010, vol. 44, no. 2, 246 p.

13. Livshits D.A. et al. Rekordnye moshchnostnye kharakteristiki lazerov na osnove InGaAs/AlGaAs/GaAs-geterostruktur]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Record power characteristics of lasers based on InGaAs/AlGaAs/GaAs heterostructures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2001, vol. 35, no. 3, 380 p.

14. Pikhtin N.A. et al. Temperaturaia zavisimost' vnutrennikh opticheskikh poter' v poluprovodnikovyx lazerakh ($\lambda = 900 - 920 \text{ nm}$) [Temperature dependence of internal optical losses in semiconductor lasers ($\lambda = 900 - 920 \text{ nm}$)]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2010, vol. 44, no. 10, pp. 1411-1416.

15. Nekorkin S.M. et al. Vliianie «ob"ema» aktivnoi sredy na izluchatel'nye svoistva lazernyx geterostruktur s vykhodom izlucheniia cherez podlozhku [Influence of the "volume" of the active medium on the radiative properties of laser heterostructures with radiation output through the substrate]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2017, vol. 51, no. 1, 75 p.

16. Scifres D.R., Streifer W., Burnham R.D. GaAs/GaAlAs diode lasers with angled pumping stripes. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, vol. 14, no. 4, pp. 223-227.

17. Scifres D.R., Streifer W., Burnham R.D. Curved stripe GaAs:GaAlAs diode lasers and waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, vol. 32, no. 4, pp. 231-234.

18. Bulaev P.V., Marmaliuk A.A., Padalitsa A.A., Nikitin D.B., Petrovskii A.V., Zalevskii I.D., Koniaev V.P., Os'kin V.V., Zverkov M.V., Simakov V.A. Moshchnye poluprovodnikovye lazery ($\lambda = 0,89 \dots 1,06$ mkm) na osnove kvantovorazmernykh napriazhennykh struktur v sisteme InGaAs/(Al)GaAs s maloi raskhodimost'iu izlucheniia [Powerful semiconductor lasers ($\lambda = 0.89 \dots 1.06 \mu\text{m}$) based on quantum-well strained structures in the InGaAs/(Al)GaAs system with low radiation divergence]. *Kvantovaia elektronika*, 2002, vol. 32, no. 3, pp. 213-215.

19. Andreev A.Iu. Moshchnye lazery ($\lambda = 808 - 850$ nm) na osnove asimmetrichnoi geterostruktury razdel'nogo ogranicheniia]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2006, vol. 40, no. 5, pp. 628-632.

20. Bezotosnyi V.V., Davydova E.I., Zalevskii I.D., Koniaev V.P., Marmaliuk A.A., Padalitsa A.A. Moshchnye diodnye lazery s dlinoi volny 1,06 mkm na osnove AlGaAs/InGaAs/GaAs s umen'shennoi raskhodimost'iu v ploskosti, perpendikuliarnoi p-n-perekhodu [Powerful diode lasers with a wavelength of 1.06 μm based on AlGaAs/InGaAs/GaAs with reduced divergence in the plane perpendicular to the p-n junction]. *Kvantovaia elektronika*, 1999, vol. 27, no. 1, pp. 1-2.

21. Burlakov I.D. et al. Matrichnyi fotopriemnyi modul' na osnove geterostruktury InGaAs / InP dlia formirovatelei 3D-izobrazhenii v korotkovolnovom IK-diapazone [Matrix photodetector module based on InGaAs / InP heterostructure for 3D imagers in the short-wavelength IR range]. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 383-392.

22. Boschker J.E. et al. Stability of ZnSe-Passivated Laser Facets Cleaved in Air and in Ultra-High Vacuum. *IEEE Photonics J. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 2022, vol. 14, no. 3.

23. Shashkin I.S. et al. Izluchatel'nye kharakteristiki moshchnykh poluprovodnikovykh lazerov (1060 nm) s uzkim mezapoloskovym kontaktom na osnove asimmetrichnykh geterostruktur AlGaAs/GaAs s shirokim volnovodom [Radiative characteristics of high-power semiconductor lasers (1060 nm) with a narrow mesa-stripe contact based on asymmetric AlGaAs/GaAs heterostructures with a wide waveguide]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2020, vol. 54, no. 4, 408 p.

24. Pikhtin N.A. Inzheksionnyi lazer [Injection laser]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2259620 (2005).

25. NSM Archive - Aluminium Gallium Arsenide (AlGaAs) - Band structure and carrier concentration, available at: http://matprop.ru/-AlGaAs_bandstr (accessed 12 May 2023).

26. Slipchenko S.O. et al. Sryv generatsii v moshchnykh poluprovodnikovykh lazerakh [Generation disruption in high-power semiconductor lasers]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2009, vol. 43, no. 10, pp. 1409-1412.

Сведения об авторах

НАБИУЛЛИН Ильдар Салихович

e-mail: ildar.s.n@yandex.ru

Аспирант кафедры 67 «Физика конденсированных сред» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, ведущий инженер-исследователь ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь, Россия

СЛИПЧЕНКО Сергей Олегович

e-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Полупроводниковые лазерные диоды» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

ШАШКИН Илья Сергеевич

e-mail: Shashkin@mail.ioffe.ru

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории «Полупроводниковая люминесценция и инжекционные излучатели» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

РУДОВА Наталия Александровна

Младший научный сотрудник лаборатории «Полупроводниковая люминесценция и инжекционные излучатели» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

About the author

NABIULLIN Idar Salikhovich

e-mail: ildar.s.n@yandex.ru

Ph.D. student, NRNU MEPhI, lead research engineer, Moscow, Perm scientific-industrial instrument-making company, Perm, Russian Federation

SLIPCHENKO Sergey Olegovich

e-mail: SergHPL@mail.ioffe.ru

Ph.D. of physico-mathematical sciences, leading research officer, head of the “Semiconductor laser diodes” laboratory, Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

SHASHKIN Ilya Sergeevich

e-mail: Shashkin@mail.ioffe.ru

Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Research Officer, “Semiconductor luminescence and injection emitters” laboratory, Ioffe Institute, Saint-Petersburg

RUDOVA Natalia Alexandrovna

Research assistant, “Semiconductor luminescence and injection emitters” laboratory, Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

РИЗАЕВ Артём Эдуардович

e-mail: *rizartem@mail.ru*

Лаборант лаборатории «Полупроводниковая люминесценция и инжекционные излучатели» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

RIZAEV Artyom Eduardovich

e-mail: *rizartem@mail.ru*

laboratory assistant, “Semiconductor luminescence and injection emitters” laboratory, Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

ВАСИЛЬЕВСКИЙ Иван Сергеевич

e-mail: *ivasilevskii@mail.ru*

Доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Россия

VASIL'EVSKII Ivan Sergeevich

e-mail: *ivasilevskii@mail.ru*

Holder of an advanced doctorate (doctor of science) in physico-mathematical sciences, full professor, leading research officer, NRNU MEPhI, Moscow, Russian Federation

ПИХТИН Никита Александрович

e-mail: *nike@hpld.ioffe.ru*

Кандидат физико-математических наук, руководитель Центра физики наногетероструктур, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Полупроводниковая люминесценция и инжекционные излучатели» Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

PIKHTIN Nikita Alexandrovich

e-mail: *nike@hpld.ioffe.ru*

Ph.D. of physico-mathematical sciences, Head of Physics of nanoheterostructure Center, leading research officer, head of the “Semiconductor luminescence and injection emitters” laboratory, Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

Финансирование: работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН № 075-01110-23-01.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 02.03.2023

Одобрена: 06.03.2023

Принята к публикации: 08.03.2023

Conflict of Interest: the authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: all authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 02/03/2023

Approved: 06/03/2023

Accepted for publication: 08/03/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Исследование электрооптических характеристик мощных одномодовых лазерных диодов 950-980 нм диапазона длин волн / И.С. Набиуллин, С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, Н.А. Рудова, А.Э. Ризаев, И.С. Васильевский, Н.А. Пихтин // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 52–73.

Please cite this article in English as: I.S. Nabiullin, S.O. Slipchenko, I.S. Shashkin, Rudova A.E. Rizaev, I.S. Vasilevsky, N.A. Pikhtin

An electro-optical characteristics study of high-power single-mode 950-980 nm range laser diodes // Applied photonics, 2023, no. 3, pp. 52-73.