

07.2;07.3;08.3

Полудисковые микролазеры с полукольцевым контактом на основе InGaAs/GaAs квантовых яма-точек с высокой выходной мощностью

© Ф.И. Зубов¹, Ю.М. Шерняков², А.А. Бекман², Э.И. Моисеев¹, Ю.А. Салий (Гусева)^{1,2},
М.М. Кулагина², Н.А. Калужный², С.А. Минтаиров², М.В. Максимов¹

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: fedyazu@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 6 декабря 2023 г.

Принято к публикации 6 декабря 2023 г.

Исследованы ватт-амперные характеристики полудисковых микролазеров с активной областью на основе квантовых яма-точек InGaAs/GaAs, излучающих на длине волны 1090 нм. Приборы изготовлены путем скальвания дисковых резонаторов диаметром 200 мкм с шириной кольцевого контакта 10 мкм. В режиме непрерывной накачки максимальная выходная мощность при 20 °С составила 110 мВт, а лазерная генерация наблюдалась до 113 °С.

Ключевые слова: микролазер, полудисковый резонатор, моды шепчущей галереи, квантовые яма-точки.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.06.57302.19821

Компактные источники когерентного излучения, микролазеры, в настоящее время привлекают к себе большое внимание вследствие перспективности их использования для передачи информации на короткие расстояния, для диагностики, в том числе в составе „лаборатории на чипе“, в сенсорике, а также в других быстро развивающихся областях современной науки и техники. Для ряда приложений, в частности в фотонных интегральных схемах, выходящее излучение должно распространяться латерально, параллельно плоскости подложки. Такой вывод излучения реализуется в микродисковых лазерах [1], которые также обладают рядом других преимуществ, таких как простота эпитаксиального синтеза и последующего постростового изготовления, малые пороговые токи, высокие рабочие температуры. К недостаткам микродисковых лазеров можно отнести то, что выходная мощность излучается в азимутальный угол 360°. В работе [2] для направленного вывода света было предложено использовать полудисковые лазеры, полученные скальванием дисковых лазеров вдоль их диаметра. Было теоретически показано, что в таких лазерах распространяются моды шепчущей галереи, а обратная связь в таких резонаторах поддерживается за счет отражения от сколотой грани, через которую также осуществляется вывод излучения. Полудисковый лазер диаметром 285 мкм с активной областью на основе двух квантовых ям GaInSbAs/GaAlSb(As) продемонстрировал генерацию на длине волны 2.13 мкм, а выходная мощность составила около 15 мВт. В работе [3] использовался близкий подход: направленный вывод излучения был реализован за счет скальвания небольшого (шириной 2 мкм) сегмента AlGaInAs/InP микродискового лазера диаметром 16 мкм.

Однако прибор работал только при температурах не выше 10 °С, а выходная мощность была довольно мала (13 мВт).

В наших предыдущих работах были исследованы полудисковые и полукольцевые лазеры с активной областью на основе квантовых яма-точек (КЯТ) InGaAs/GaAs и показано, что они обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными дисковыми и кольцевыми лазерами того же диаметра: направленным выводом излучения, а также более высокой выходной мощностью и эффективностью [4–6]. В полудисковых лазерах диаметром 200 мкм была достигнута выходная мощность в непрерывном режиме около 70 мВт [5]. В полудисковых лазерах диаметром 100 мкм при монтаже методом термокомпрессии *p*-контактом вниз максимальная мощность в непрерывном режиме составила 30 мВт, а генерация наблюдалась до температуры 93 °С [6]. Продемонстрирована квазиодночастотная генерация с высоким коэффициентом подавления боковых спектральных мод (более 20 dB) [5]. Максимальная частота малосигнальной модуляции полудискового лазера диаметром 100 мкм на уровне –3 dB составила 4.6 GHz [6].

В настоящей работе исследуются полудисковые лазеры диаметром 200 мкм с активной областью на основе КЯТ InGaAs/GaAs. Увеличение числа слоев КЯТ в активной области с пяти до семи и уменьшение ширины металлического контакта с 15 до 10 мкм позволили существенно повысить выходную оптическую мощность и максимальную рабочую температуру приборов по сравнению с результатами, опубликованными ранее.

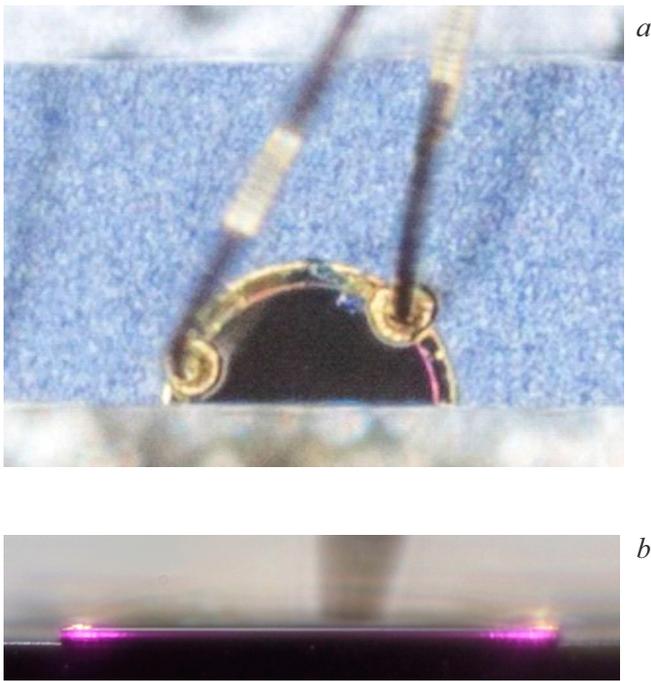


Рис. 1. Оптические микрофотографии. *a* — вид сверху на полудисковый микролазер ($\varnothing 200 \mu\text{m}$) с приваренными золотыми микропроводами; *b* — вид на сколотый торец прибора при накачке выше порога генерации.

Лазерная гетероструктура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке n^+ -GaAs, разориентированной на 6° относительно плоскости (100), и представляла собой следующую последовательность слоев (начиная от n^+ -подложки): слой $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной $1 \mu\text{m}$, легированный кремнием до $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-2}$; слой $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной $0.5 \mu\text{m}$, легированный кремнием до $7 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-2}$; волновод GaAs толщиной около $0.72 \mu\text{m}$, в середине которого находилась активная область; слой $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной $0.5 \mu\text{m}$, легированный цинком до $7 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-2}$; слой $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ толщиной $0.7 \mu\text{m}$, легированный цинком до $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-2}$; контактный слой GaAs толщиной $0.15 \mu\text{m}$, легированный цинком до $1 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-2}$. Состав эмиттеров $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ был выбран таким образом, чтобы одновременно обеспечить высокое оптическое ограничение активной области и требуемые уровни легирования. Активная область лазера представляла собой семь слоев КЯТ $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$, свойства которых подробно рассмотрены в обзоре [7]. Слои КЯТ разделялись прослойками GaAs толщиной 40nm . Каждый слой КЯТ формировался путем осаждения восьми монослоев $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, что приводило к образованию сверхплотного массива In-обогащенных островков в остаточной In-обедненной квантовой яме.

Сначала с помощью фотолитографии и плазмохимического травления были изготовлены микродисковые

резонаторы диаметром $200 \mu\text{m}$. Травление осуществлялось на глубину $6.5 \mu\text{m}$ сквозь активную область и нижний эмиттер. Боковые поверхности резонаторов не пассивировались. Металлические контакты $\text{AgMn}/\text{Ni}/\text{Au}$ кольцевой формы формировались на поверхности контактных слоев p^+ -GaAs микродисков. Ширина колец составляла $10 \mu\text{m}$. Внешний диаметр кольцевых контактов был на несколько микрометров меньше, чем диаметр микродискового резонатора, чтобы исключить инжекцию тока в области, расположенные в непосредственной близости от его боковой поверхности. Это позволяет снизить паразитную поверхностную рекомбинацию на боковых стенках. После этого подложка GaAs утоньшалась приблизительно до $160 \mu\text{m}$ и на ее задней стороне создавался сплошной металлический контакт. Затем посредством раскалывания чипов с несколькими микродисками создавались структуры, содержащие один или несколько полудисковых микролазеров (рис. 1, *a*). Прецизионное раскалывание осуществлялось на установке монтажа кристаллов Finetech Fineplacer Lambda 2 с высокой точностью позиционирования раскалывающего инструмента, в результате чего отклонение линий скола от оси полудисков составляло не более $2 \mu\text{m}$. Чипы с микролазерами монтировались на медные теплоотводы посредством пайки p -контактом вверх. Накачка полудисков осуществлялась либо при помощи золотых проволок ($\varnothing 18 \mu\text{m}$), приваренных к полукольцевым контактам методом термозвуковой сварки (рис. 1, *a*), либо при помощи вольфрамового зонда (рис. 1, *b*). Последовательное сопротивление прибора составило 4.0Ω .

Вольт- и ватт-амперные характеристики (ВАХ и ВтАХ) измерялись в непрерывном режиме. Для определения абсолютного значения выходной мощности использовался калиброванный Ge-фотодиод размером $1 \times 1 \text{cm}$, располагаемый в непосредственной близости от микролазера (угол сбора излучения составлял 136°). Спектры излучения регистрировались с помощью анализатора оптических спектров Yokogawa AQ6370C. Пороговый ток определялся по пересечению оси абсцисс и линейной экстраполяции участка ВтАХ при накачках чуть выше порогового излома (рис. 2). Измерения проводились в диапазоне температур от 20 до 115°C . При этом температура микролазеров стабилизировалась с использованием термоэлемента Пельтье.

Как было показано в наших предыдущих работах [4,6] и работе других авторов [2], в полудисковых резонаторах пучности наиболее интенсивных высокодобротных оптических мод, которые участвуют в лазерной генерации, в основном расположены довольно близко к периферии резонатора. Именно из этих участков полудискового лазера наблюдается интенсивное излучение (рис. 1, *b*) вследствие неполного отражения от сколотой грани (коэффициент отражения около 0.3). Использование полукольцевого контакта дает возможность осуществлять инжекцию только в области, рас-

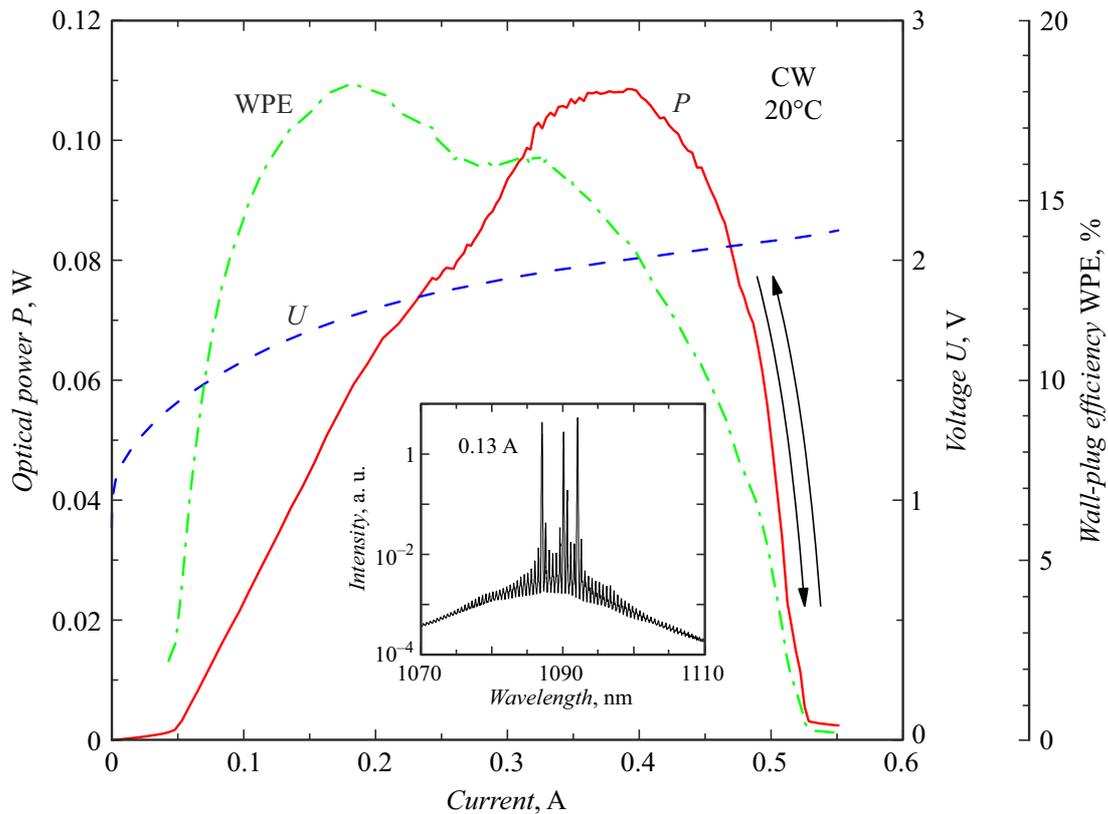


Рис. 2. Ватт-амперная (сплошная линия), вольт-амперная (штриховая линия) характеристики и КПД (WPE) (штрихпунктир) полудискового лазера, измеренные при непрерывной накачке и температуре теплоотвода 20°C . На вставке представлен спектр генерации при 0.13 A .

положенные недалеко от края полудискового лазера, и тем самым исключить прокачку центральной части, в которой интенсивность оптических мод мала. Это позволяет уменьшить пороговый ток и повысить эффективность полудискового лазера с полукольцевым контактом по сравнению с аналогичными характеристиками полудискового лазера со сплошным контактом [6].

На рис. 2 показаны ВАХ и ВтАХ полудискового лазера, измеренные в непрерывном режиме накачки при температуре теплоотвода 20°C . Выходная мощность достигает максимального значения 110 mW при токе 0.4 A и затем начинает уменьшаться вследствие перегрева активной области. Излом (кинок) на ВтАХ при токе инжекции 0.2 A , по-видимому, связан с резким изменением модового состава излучения прибора. При токах выше 0.53 A происходит полное гашение лазерной генерации. Небольшая оптическая мощность, наблюдаемая выше тока гашения лазерной генерации, связана со спонтанным излучением. Представленные ВтАХ воспроизводились многократно при увеличении и последующем уменьшении тока, что свидетельствует о том, что перегрев лазера не приводил к его деградации. Максимальный

КПД полудискового лазера составил чуть более 18% (рис. 2).

Длина волны генерации составила около 1090 nm (см. вставку на рис. 2). Спектр излучения является многомодовым, а моды отстоят друг от друга на 0.5 nm , что примерно соответствует расстоянию между резонансными длинами волн мод шепчущей галереи одного и того же радиального порядка (free spectral range) в микродисковом резонаторе диаметром $200\text{ }\mu\text{m}$. С увеличением тока инжекции число мод в спектре излучения растет, а спектральное расстояние между крайними модами достигает 5 nm . Расходимость выходного излучения в вертикальном и латеральном направлении, измеренная на уровне половины мощности, составила примерно 65° и 15° соответственно. Необходимо отметить, что ранее в некоторых полудисковых лазерах в определенном диапазоне токов нами наблюдалась одночастотная генерация [5]. Данный эффект мы связываем с небольшим отклонением положения сколотой грани от центра полудиска.

ВтАХ полудисковых лазеров были измерены в диапазоне температур $20\text{--}115^{\circ}\text{C}$ при непрерывной накачке. При увеличении температуры пороговый ток полудискового лазера растет, дифференциальная эффективность падает, максимальная выходная мощность уменьшается

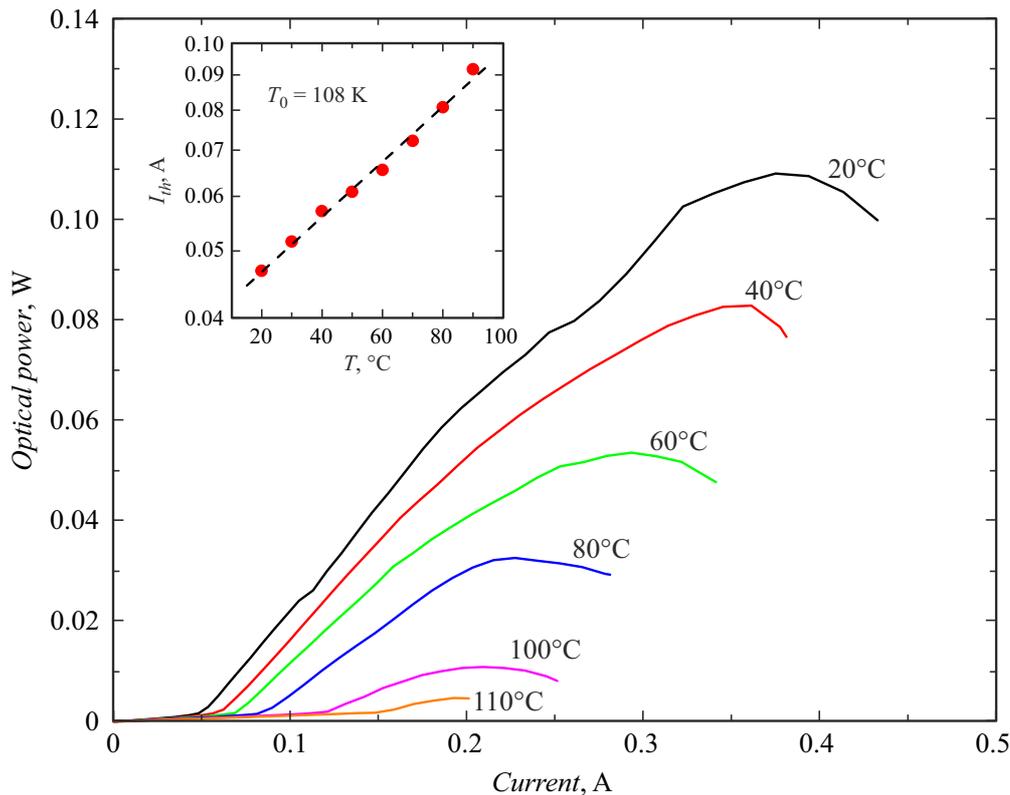


Рис. 3. Ватт-амперные характеристики полудискового лазера, измеренные при непрерывной накачке в диапазоне температур 20–110°C. На вставке представлена зависимость порогового тока от температуры.

(рис. 3). Лазерная генерация наблюдалась при температурах вплоть до 113°C. Характеристическая температура T_0 в диапазоне от 20 до 90°C составила 108 K (см. вставку на рис. 3). Ширина спектра излучения при увеличении температуры увеличивалась незначительно.

В широком диапазоне температур исследованы ватт-амперные характеристики InGaAs/GaAs полудисковых лазеров с полукольцевым контактом. За счет увеличения числа слоев КЯТ в активной области и уменьшения ширины полукольцевого металлического контакта были существенно улучшены характеристики приборов по сравнению с результатами, полученными нами ранее. При 20°C продемонстрирована выходная оптическая мощность 110 mW и КПД 18%, а максимальная температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила 113°C. Дальнейшие направления оптимизации микролазеров могут включать в себя еще большее увеличение числа слоев КЯТ в активной области, уменьшение размера приборов, варьирование положения скола относительно оси лазеров для управления латеральной расходимостью и модовым составом, а также изменение геометрии металлизации с целью повышения эффективности токовой инжекции и селекции нужных мод.

Финансирование работы

Авторы благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2023-0010).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov, E. Moiseev, M. Maximov, *J. Appl. Phys.*, **54** (45), 453001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6463/ac1887
- [2] A.M. Monakhov, V.V. Sherstnev, A.P. Astakhova, Y.P. Yakovlev, G. Boissier, R. Teissier, A.N. Baranov, *Appl. Phys. Lett.*, **94** (5), 051102 (2009). DOI: 10.1063/1.3075852
- [3] J.-D. Lin, L.-X. Zou, Y.-Z. Huang, Y.-D. Yang, Q.-F. Yao, X.-M. Lv, J.-L. Xiao, Y. Du, *Appl. Opt.*, **51** (17), 3930 (2012). DOI: 10.1364/AO.51.003930
- [4] F. Zubov, E. Moiseev, M. Maximov, A. Vorobyev, A. Mozharov, Yu. Shernyakov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, V. Dubrovskii, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov, *Photonics*, **10** (3), 290 (2023). DOI: 10.3390/photonics10030290
- [5] F.I. Zubov, E.I. Moiseev, M.V. Maximov, A.A. Vorobyev, A.M. Mozharov, Yu.M. Shernyakov, N.A. Kaluzhnyy, S.A. Mintairov, M.M. Kulagina, V.G. Dubrovskii, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, *Laser Phys.*, **32** (12), 125802 (2022). DOI: 10.1088/1555-6611/ac996f

- [6] F.I. Zubov, E.I. Moiseev, M.V. Maximov, A.A. Vorobyev, A.M. Mozharov, N.A. Kaluzhnyy, S.A. Mintairov, M.M. Kulagina, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov, IEEE Photon. Technol. Lett., **34** (24), 1349 (2022). DOI: 10.1109/LPT.2022.3216738
- [7] M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, F.I. Zubov, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov, Appl. Sci., **10** (3), 1038 (2020). DOI: 10.3390/app10031038