

09.7

Энергопотребление при высокочастотной модуляции неохлаждаемого InGaAs/GaAs/AlGaAs-микродискового лазера

© А.Е. Жуков¹, Э.И. Моисеев¹, А.М. Надточий¹, А.С. Драгунова¹, Н.В. Крыжановская¹,
М.М. Кулагина², С.А. Минтаиров², Н.А. Калужный², Ф.И. Зубов³, М.В. Максимов³

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 12 января 2021 г.

В окончательной редакции 2 апреля 2021 г.

Принято к публикации 2 апреля 2021 г.

Исследовано потребление энергии микродисковым лазером с квантовыми ямами-точками InGaAs/GaAs при высокочастотной модуляции без принудительного охлаждения. Для микролазера диаметром $20\ \mu\text{m}$ оценено наименьшее энергопотребление $1.6\ \text{pJ}$ в расчете на один бит данных, переданных с помощью оптического сигнала.

Ключевые слова: высокочастотная модуляция, микролазер, квантовые точки, энергопотребление.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.13.51118.18707

Микродисковые / микрокольцевые лазеры [1,2] (МДЛ/МКЛ), в которых высокая добротность лазерной моды достигается за счет полного внутреннего отражения света от боковых стенок микрорезонатора, обладают рядом преимуществ: для их создания может использоваться лазерная гетероструктура без распределенных брэгговских отражателей, подобная применяемой в полосковых лазерах; вывод излучения реализуется в плоскости подложки, и, следовательно, для интеграции с другими оптоэлектронными элементами не требуется применения дополнительных сложных в изготовлении элементов, таких как 45° микрзеркала [3], интегральные дифракционные решетки [4], микропризмы [5]; процесс изготовления отличается простотой, поскольку включает одну операцию травления и не требует селективного окисления, пассивации или покрытия защитным диэлектриком. Были продемонстрированы МДЛ/МКЛ с квантовыми точками, монолитно [6,7] и гибридно [8] интегрированные с кремниевой подложкой. Высокочастотные характеристики таких микролазеров, хотя и уступают характеристикам вертикально-излучающих, позволяют осуществить безошибочную передачу данных со скоростью по крайней мере $10\ \text{Gbit/s}$ [9].

Мерой энергоэффективности лазера, используемого для оптической передачи данных, является электрическая энергия, расходуемая в расчете на один бит переданной информации (energy-to-data ratio, EDR) [10]. Для микроспиральных температурно-стабилизированных лазеров на основе AlGaInAs/InP с радиусом $30\text{--}40\ \mu\text{m}$ сообщалось о EDR в диапазоне $6.9\text{--}27.4\ \text{pJ/bit}$ [11]. На основании данных, приведенных для неохлаждаемого микрокольцевого лазера с квантовыми точками

InAs/GaAs диаметром $30\ \mu\text{m}$ [12], можно оценить его энергопотребление как $3.4\text{--}13.9\ \text{pJ/bit}$ в зависимости от тока. Недавно нами было продемонстрировано снижение потребления электроэнергии до $1.6\ \text{pJ/bit}$ для микролазера диаметром $23\ \mu\text{m}$ при стабилизированной температуре 18°C [13]. Однако использование массивного теплоотвода и термоэлектрического охладителя не только ведет к дополнительному расходу энергии, но и в значительной степени затрудняет интеграцию микролазера с другими функциональными элементами. Для микролазеров диаметром 10.5 , 19 и $23\ \mu\text{m}$, работающих без принудительного охлаждения, было оценено наименьшее энергопотребление 1.6 , 2.3 и $2.8\ \text{pJ/bit}$ соответственно при наибольшей частоте модуляции 3.8 , 5 и $5.2\ \text{GHz}$ [14].

Снижение EDR и увеличение скорости модуляции требует, в частности, как снижения порогового тока, так и подавления роста тока спонтанной рекомбинации в запороговом режиме, вызванного саморазогревом микролазера [15]. В настоящей работе нами демонстрируется снижение теплового сопротивления микродисковых лазеров, позволившее достичь EDR $1.6\ \text{pJ/bit}$ и наибольшей ширины полосы модуляции $5.9\ \text{GHz}$ в микродисковом лазере диаметром $20\ \mu\text{m}$, работающем без температурной стабилизации, т.е. без какого-либо принудительного охлаждения.

Лазерная гетероструктура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на слабоориентированной относительно (100) подложке n^+ -GaAs. Пять слоев квантовых ям-точек $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ [16] помещены в волновод GaAs толщиной около $0.7\ \mu\text{m}$, ограниченный эмиттерами $\text{Al}_{0.39}\text{Ga}_{0.61}\text{As}$. Микродисковые резонаторы были изгото-

товлены с помощью фотолитографии и плазмохимического травления. Индивидуальные контакты *p*-типа были сформированы на вершинах мез, после чего микродиски были планаризованы с помощью оксидного фоторе-

зиста SU-8, поверх которого были изготовлены вспомогательные контактные площадки ($\sim 120 \times 120 \mu\text{m}$). Чипы с микролазерами монтировались на СВЧ-платы *n*-контактом, сформированным на задней стороне утоненной подложки. С использованием установки микросварки TPT HB16 к вспомогательным контактным площадкам прикреплялись золотые проволоки диаметром $17 \mu\text{m}$ и длиной около $500 \mu\text{m}$ от сигнального контакта СВЧ-плат (рис. 1).

Исследовался микродисковый лазер диаметром $20 \mu\text{m}$, измерения проводились при комнатной температуре без термостабилизации и какого-либо принудительного охлаждения микролазера. Вольт- и ватт-амперные характеристики измерялись в непрерывном режиме. Выходная мощность, а также спектры излучения регистрировались с помощью анализатора оптических спектров Yokogawa AQ6370C. Малосигнальная прямая модуляция была реализована с использованием зонда типа ground–signal–ground. Частота варьировалась в пределах 0.5–10 GHz, ток смещения — от 4 до 15 mA. Измерения проводились с помощью фотодетектора New Focus 1434 с полосой пропускания 25 GHz и анализатора цепей Agilent E8364B.

Пороговый ток, равный 4 mA, был определен по излому ватт-амперной характеристики (рис. 2). При этом токе в спектре излучения начинает отчетливо проявляться лазерная линия с длиной волны около 1096 nm

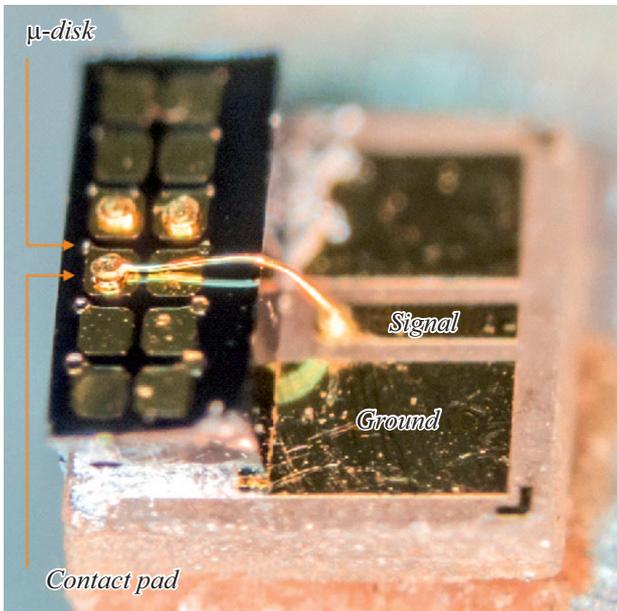


Рис. 1. Чип с массивом микролазеров, смонтированный на СВЧ-плату.

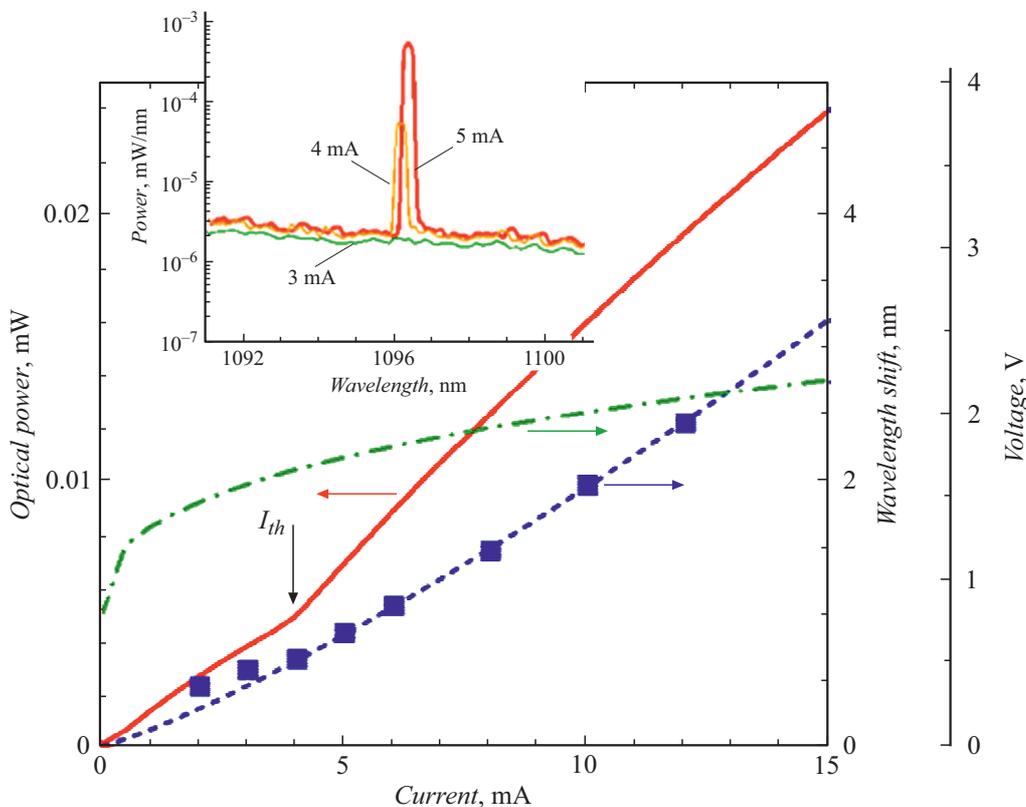


Рис. 2. Оптическая мощность (сплошная линия), напряжение (штрихпунктирная линия) и сдвиг линии генерации (символы — эксперимент, штриховая линия — аппроксимация) в зависимости от тока. На вставке — спектры излучения при различных токах вблизи порога генерации.

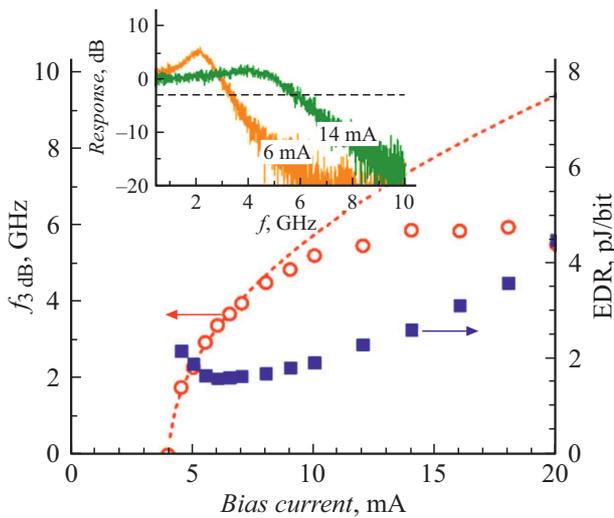


Рис. 3. Зависимость полосы модуляции по уровню — 3 дБ (кружки — эксперимент, линия — аппроксимация вблизи порогового тока зависимостью $m\sqrt{I - I_{th}}$) и величины электрических потерь при переключении (квадраты) от тока смещения. На вставке — амплитудно-частотная характеристика при различных токах смещения.

(полная ширина на половине высоты 0.25 nm ограничена спектральным разрешением) (вставка к рис. 2). При увеличении тока инжекции I максимум линии генерации сдвигается в длинноволновую сторону. Сдвиг линии пропорционален потребляемой электрической мощности UI (здесь U — напряжение, определяемое вольт-амперной характеристикой микролазера), коэффициент пропорциональности определен равным 0.097 nm/mW. С учетом величины температурного коэффициента моды шепчущей галереи около 0.08 nm/K [17] было вычислено тепловое сопротивление отводу тепла от активной области 1.21°C/mW. Это соответствует величине удельного теплового сопротивления $3.8 \cdot 10^{-3} \text{°C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$, тогда как для ранее исследованных микролазеров с квантовыми точками эта величина составила $5 \cdot 10^{-3} \text{°C} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ [18]. Улучшение теплового сопротивления мы связываем с дополнительным отводом тепла посредством верхних контактных площадок.

При некотором токе смещения полоса модуляции $f_{3\text{dB}}$ микролазера определялась по спаду модуляционного отклика в 2 раза (до уровня -3 дБ) относительно его низкочастотного значения (вставка к рис. 3). Вблизи порога генерации выполняется соотношение $f_{3\text{dB}} \approx m\sqrt{I - I_{th}}$, где описывающий эффективность токовой модуляции коэффициент m был определен равным 2.4 GHz/mA^{0.5}. Наибольшая ширина полосы модуляции составила 5.9 GHz (рис. 3).

Энергия $\text{EDR} = UI/B$, потребляемая лазером для передачи одного бита информации, по определению есть отношение электрической мощности к скорости передачи битов B [19], которая была оценена по удвоенной полосе модуляции $B = 2f_{3\text{dB}}$ [20]. Наименьшее значение

EDR, достигаемое при токе смещения 6 mA, равно 1.6 pJ/bit. При этом токе величина перегрева микролазера относительно окружающей среды, оцененная с учетом теплового сопротивления, составляет около 13°C. При уменьшении тока смещения относительно его оптимального значения величина EDR растет вследствие быстрого спада полосы модуляции при приближении к пороговому току. При увеличении тока EDR возрастает по причине более быстрого увеличения UI по сравнению с $f_{3\text{dB}}$, в том числе вследствие увеличивающегося перегрева микролазера, ведущего к насыщению полосы модуляции.

Таким образом, нами были исследованы электрические потери микродискового лазера AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами-точками InGaAs, работающего без принудительного охлаждения. Снижение удельного теплового сопротивления позволило увеличить максимальную частоту модуляции при одновременном снижении энергопотребления по сравнению с ранее продемонстрированными неохлаждаемыми микролазерами. Достигнуто потребление энергии в расчете на один бит, сравнимое со значениями, ранее продемонстрированными для температурно-стабилизированных микродисковых лазеров.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 19-72-30010). Оптические исследования проведены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.L. McCall, A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan, *Appl. Phys. Lett.*, **60** (3), 289 (1992). DOI: 10.1063/1.106688
- [2] M.-H. Mao, H.-C. Chien, J.-Z. Hong, C.-Y. Cheng, *Opt. Express*, **19** (15), 14145 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.014145
- [3] P.-K. Shen, C.-T. Chen, C.-H. Chang, C.-Y. Chiu, C.-C. Chang, H.-C. Lan, Y.-C. Lee, M.-L. Wu, in *Optical Fiber Communication Conference 2014 (OFC 2014)* (San Francisco, 2014), Paper M2K.6. DOI: 10.1364/OFC.2014.M2K.6
- [4] D.A. Louderback, G.W. Pickrell, H.C. Lin, M.A. Fish, J.J. Hindi, P.S. Guilfoyle, *Electron. Lett.*, **40** (17), 1064 (2004). DOI: 10.1049/el:20045585
- [5] K.S. Kaur, A.Z. Subramanian, P. Cardile, R. Verplancke, J. van Kerrebrouck, S. Spiga, R. Meyer, J. Bauwelinck, R. Baets, G. van Steenberge, *Opt. Express*, **23** (22), 28264 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.028264
- [6] N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, Yu. Polubavkina, M. Maximov, M. Kulagina, S. Troshkov, Yu. Zadiranov, Yu. Guseva, A. Lipovskii, M. Tang, M. Liao, J. Wu, S. Chen, H. Liu, A. Zhukov, *Opt. Lett.*, **42** (17), 3319 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.003319

- [7] Y. Wan, J. Norman, Q. Li, M.J. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, D. Huang, Z. Zhang, A.Y. Liu, A. Torres, D. Jung, A.C. Gossard, E.L. Hu, K.M. Lau, J.E. Bowers, *Optica*, **4** (8), 940 (2018). <https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.000940>
- [8] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, A.S. Dragunova, M. Tang, S. Chen, H. Liu, M.M. Kulagina, S.A. Kadinskaya, F.I. Zubov, A.M. Mozharov, M.V. Maximov, *Materials*, **13** (10), 2315 (2020). <https://doi.org/10.3390/ma13102315>
- [9] F. Zubov, M. Maximov, N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, M. Muretova, A. Mozharov, N. Kaluzhnyy, S. Mintairov, M. Kulagina, N. Ledentsov, Jr., L. Chorchos, N. Ledentstov, A. Zhukov, *Opt. Lett.*, **44** (22), 5442 (2019). <https://doi.org/10.1364/OL.44.005442>
- [10] D.A.B. Miller, *Proc. of the IEEE*, **97** (7), 1166 (2009). DOI: 10.1109/JPROC.2009.2014298
- [11] Y.-D. Yang, Y. Zhang, Y.-Z. Huang, A.W. Poon, *Opt. Express*, **22** (1), 824 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.000824>
- [12] Y. Wan, D. Inoue, D. Jung, J.C. Norman, C. Shang, A.C. Gossard, J.E. Bowers, *Photon. Res.*, **6** (8), 776 (2018). <https://doi.org/10.1364/PRJ.6.000776>
- [13] А.Е. Жуков, Э.И. Моисеев, Н.В. Крыжановская, Ф.И. Зубов, А.М. Можаров, Н.А. Калужный, С.А. Мингаиров, М.М. Кулагина, С.А. Блохин, М.В. Максимов, *Письма в ЖТФ*, **45** (16), 49 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.16.48158.17885 [Пер. версия: 10.1134/S1063785019080315].
- [14] N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, F.I. Zubov, A.M. Mozharov, M.V. Maximov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, Yu.A. Guseva, M.M. Kulagina, S.A. Blokhin, Yu. Berdnikov, A.E. Zhukov, *J. Appl. Phys.*, **126** (6), 063107 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5108556>
- [15] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, A.M. Nadtochiy, A.S. Dragunova, M.V. Maximov, F.I. Zubov, S.A. Kadinskaya, Yu. Berdnikov, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, *IEEE J. Quantum Electron.*, **56** (5), 2000908 (2020). DOI: 10.1109/JQE.2020.3009954
- [16] 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
- [17] N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, Yu.V. Kudashova, F.I. Zubov, A.A. Lipovskii, M.M. Kulagina, S.I. Troshkov, Yu.M. Zadiranov, D.A. Livshits, M.V. Maximov, A.E. Zhukov, *Electron. Lett.*, **51** (17), 1354 (2015). DOI: 10.1049/el.2015.2325
- [18] Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов, С.А. Блохин, М.А. Бобров, М.М. Кулагина, С.И. Трошков, Ю.М. Задиранов, А.А. Липовский, Э.И. Моисеев, Ю.В. Кудашова, Д.А. Лившиц, В.М. Устинов, А.Е. Жуков, *ФТП*, **50** (3), 393 (2016). [Пер. версия: 10.1134/S1063782616030131].
- [19] P. Moser, W. Hofmann, P. Wolf, J.A. Lott, G. Larisch, A. Payusov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.*, **98** (23), 231106 (2011). <https://doi.org/10.1063/1.3597799>
- [20] E. Kapon, in *Semiconductor lasers I. Fundamentals* (Academic Press, 1999), ch. 3.4.