

07;08

## Потребление энергии для высокочастотного переключения микродискового лазера с квантовыми точками

© А.Е. Жуков<sup>1,2</sup>, Э.И. Моисеев<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, Ф.И. Зубов<sup>1</sup>, А.М. Можаров<sup>1</sup>, Н.А. Калюжный<sup>3</sup>, С.А. Минтаиров<sup>3</sup>, М.М. Кулагина<sup>3</sup>, С.А. Блохин<sup>3</sup>, М.В. Максимов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 мая 2019 г.

В окончательной редакции 22 мая 2019 г.

Принято к публикации 23 мая 2019 г.

Исследованы характеристики микродискового лазера диаметром  $23\ \mu\text{m}$  в режиме прямой высокочастотной модуляции при стабилизированной температуре теплоотвода  $18^\circ\text{C}$ . Показано, что минимальное потребление электроэнергии составляет  $\sim 1.6\ \text{pJ/bit}$  и достигается при частоте модуляции  $4.2\ \text{GHz}$ . Максимальная частота модуляции составляет  $6.7\ \text{GHz}$ , при этом энергопотребление равно  $3.3\ \text{pJ/bit}$ .

**Ключевые слова:** высокочастотная модуляция, микролазер, полупроводниковый лазер, квантовые точки, энергопотребление.

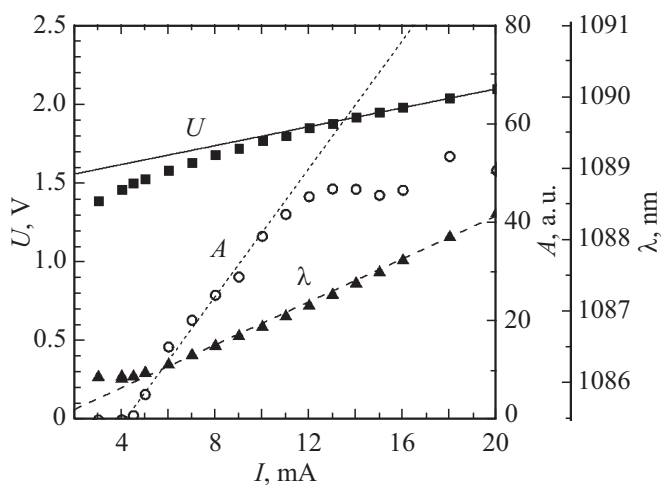
DOI: 10.21883/PJTF.2019.16.48158.17885

Полупроводниковые микродисковые/микрокольцевые лазеры [1,2] представляют интерес для различных приложений, требующих источников оптического излучения, обладающих компактными размерами. При диаметре  $10\text{--}30\ \mu\text{m}$  микродисковые лазеры с активной областью на основе квантовых точек способны работать в непрерывном режиме, в том числе без термостабилизации, вплоть до  $110^\circ\text{C}$  [3], пороговые токи при комнатной температуре составляют единицы мА. В отличие от поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным микрорезонатором микродисковые лазеры с квантовыми точками могут быть изготовлены на основе относительно простых, не содержащих многослойных отражателей эпитаксиальных гетероструктур, в том числе синтезированных на инородных подложках (кремнии [4,5]), а для изготовления резонатора может быть использована фотолитография с последующим травлением глубокой мезы без необходимости пассивации боковых граней.

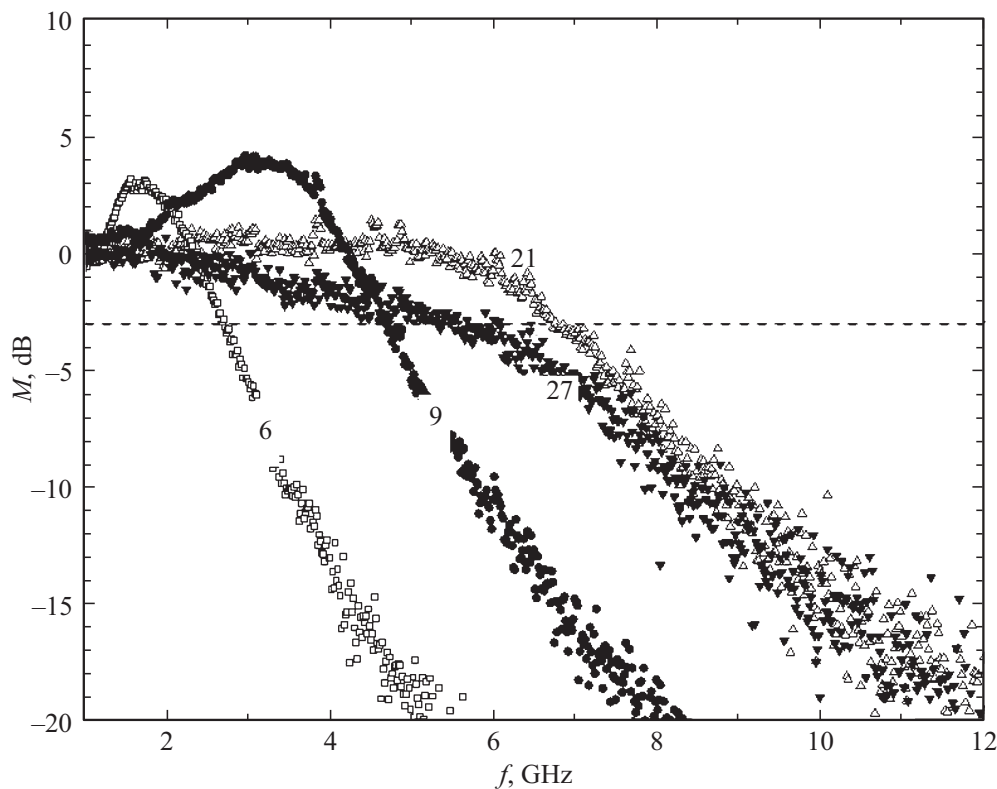
Наиболее перспективно применение таких микролазеров для реализации систем оптической связи на кристалле. Недавно нами была продемонстрирована возможность достижения прямой модуляции в гигагерцевом диапазоне частот [6] с помощью микродисков, содержащих плотные массивы квантовых островков InGaAs (так называемые квантовые ямы-точки) [7]. При работе без термостабилизации максимальная частота модуляции составила  $5.9\ \text{GHz}$ . В настоящей работе нами было предпринято исследование высокочастотных характеристик микродискового лазера, работающего в режиме стабилизации температуры теплоотвода. Также нами исследованы электрические потери, возникающие при переключении микролазера. Показано, что при размерах лазерного излучателя около  $20\ \mu\text{m}$  электрические

потери могут быть менее  $2\ \text{pJ/bit}$ , что существенно ниже ранее сообщенных значений для микролазеров на подложках InP сравнимых размеров, для которых наименьшее значение составило около  $7\ \text{pJ/bit}$  [8].

Эпитаксиальная структура была синтезирована на подложке GaAs *n*-типа проводимости методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений и представляла собой лазерную гетероструктуру AlGaAs/GaAs с отдельным ограничением носителей заряда и оптической моды. В активной области было сформировано пять рядов квантовых ям-точек InGaAs. Детальное описание послойной конструкции приведено в [3]. Микродисковые



**Рис. 1.** Зависимость от тока смещения  $I$  падения напряжения  $U$  (квадраты), интегральной интенсивности лазерной линии  $A$  (кружки) и ее спектрального положения  $\lambda$  (треугольники). Прямые — линейная аппроксимация.



**Рис. 2.** Амплитудно-частотные характеристики, записанные при различном токе смещения. Числа около кривых соответствуют величине тока (в mA), штриховая линия — уровню  $-3$  dB.

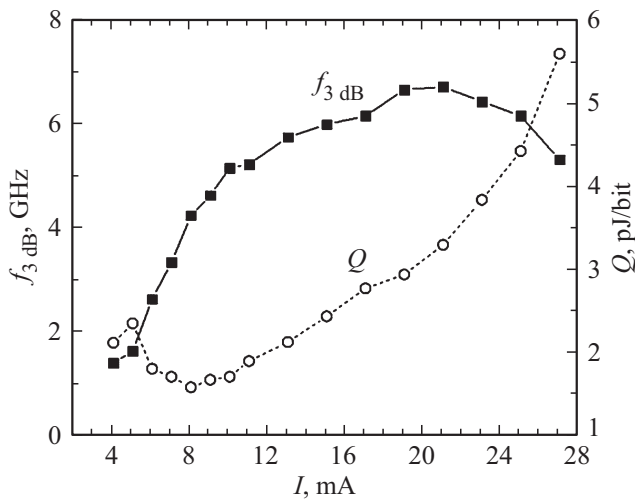
лазеры были изготовлены с помощью оптической фотолитографии и последующего глубокого плазмохимического травления и затем планаризованы резистом SU-8. Микролазеры были napаяны общим  $n$ -контактом на теплоотвод. Индивидуальное электрическое соединение к контакту  $p$ -типа осуществлялось с помощью золотой проволоки.

Для исследований был отобран микродисковый лазер диаметром  $23 \mu\text{m}$ . Измерения проводились при фиксированной температуре теплоотвода, которая была установлена равной  $18^\circ\text{C}$ . Вольт-амперная характеристика и порог генерации определялись в непрерывном режиме. Для высокочастотных измерений использовался зонд типа ground–signal–ground (GSG). Измерения проводились при прямом смещении постоянным током с одновременной гармонической модуляцией током малой амплитуды (малосигнальная прямая модуляция). Частота модуляции варьировалась в пределах  $0.1$ – $20$  GHz, ток смещения до  $30$  mA.

На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика микролазера, имеющая свойственный диодам вид. В области больших токов инжекции прибор характеризуется дифференциальным сопротивлением  $30 \Omega$  (сплошная линия). На рисунке также приведена зависимость интегральной интенсивности линии излучения от тока накачки, которая позволяет оценить порог генерации как  $4.2$  mA по началу быстрого увеличения интенсивности

линии (пунктирная линия). С увеличением тока положение линии генерации сдвигается в длинноволновую сторону со скоростью около  $0.15$  nm/mA (штриховая линия). Учитывая, что температурный сдвиг моды шепчущей галереи в таких микрорезонаторах составляет около  $0.08$  nm/K [9], можно оценить перегрев активной области относительно фиксированной температуры теплоотвода, составляющий около  $2^\circ\text{C}/\text{mA}$ .

На рис. 2 показана эффективность амплитудной модуляции  $M$  в зависимости от частоты  $f$  изменения модулирующего тока (амплитудно-частотная характеристика, АЧХ), измеренная при нескольких токах смещения  $I$ . Мерой полосы модуляции лазерного излучения при данном токе смещения полагают частоту  $f_{3\text{dB}}$ , которая соответствует уменьшению эффективности модуляции в 2 раза (до уровня  $-3$  dB) относительно ее низкочастотного значения, для которого  $M$  принимают равным единице. Как видно, при малых токах смещения АЧХ демонстрирует выраженный резонансный пик, обусловленный релаксационными колебаниями [10]. При увеличении тока выше порога генерации частота  $f_{3\text{dB}}$  быстро возрастает. При дальнейшем росте тока резонансный пик исчезает (говорят, что релаксационные колебания демпфированы), а величина  $f_{3\text{dB}}$  достигает своего предельного значения, после чего снижается. Для исследованного микролазера максимальная величина  $f_{3\text{dB}}$  составила  $6.7$  GHz, что, насколько нам известно,



**Рис. 3.** Зависимость определенной по уровню  $-3$  dB максимальной частоты модуляции  $f_{3\text{ dB}}$  (квадраты) и величины электрических потерь на переключение  $Q$  (кружки) от тока смещения.

является наибольшей полосой модуляции, измеренной для микролазеров сравнимого размера на основе квантовых точек.

Энергия  $Q$ , потребляемая лазером для передачи одного бита информации (energy-to-data ratio, EDR), может быть оценена как отношение электрической мощности к удвоенной полосе модуляции [11]:

$$Q = \frac{UI}{2f_{3\text{ dB}}} \quad (1)$$

Рис. 3 обобщает зависимость  $f_{3\text{ dB}}$  и  $Q$  от тока смещения микролазера. Вблизи порога генерации  $I_{th}$  величина электрических потерь снижается с ростом тока, что обусловлено быстрым увеличением  $f_{3\text{ dB}} \propto \sqrt{I - I_{th}}$ . Наименьшее значение  $Q$  достигается при токе смещения  $8\text{ mA}$ , приблизительно в 2 раза превосходящем  $I_{th}$ , и составляет  $1.58\text{ pJ/bit}$ . Соответствующая частота  $f_{3\text{ dB}}$  превышает  $4\text{ GHz}$ . Дальнейшее увеличение смещения ведет к возрастанию  $Q$ , вызванному как замедлением роста  $f_{3\text{ dB}}$ , так и увеличением электрической мощности, в которой начинает заметную роль играть тепловая мощность, рассеиваемая на последовательном сопротивлении лазера. Току смещения, отвечающему наибольшему быстрдействию микролазера, соответствует величина  $Q = 3.3\text{ pJ/bit}$ .

Таким образом, нами были исследованы электрические потери и быстрдействие микродискового лазера с квантовыми ямами-точками в активной области в режиме прямой модуляции с температурно-стабилизированным теплоотводом. Достигнуто существенное (примерно в 2 раза) уменьшение потребления энергии в расчете на 1 bit по сравнению с ранее исследованными нами неохлаждаемыми микролазерами аналогичной конструкции [12].

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 19-72-30010).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] McCall S.L., Levi A.F.J., Slusher R.E., Pearton S.J., Logan R.A. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. N 3. P. 289–291.
- [2] Mao M.-H., Chien H.-C., Hong J.-Z., Cheng C.-Y. // Opt. Express. 2011. V. 19. N 15. P. 14145–14151.
- [3] Moiseev E., Kryzhanovskaya N., Maximov M., Zubov F., Nadtochiy A., Kulagina M., Zadiranov Yu., Kalyuzhnyy N., Mintairov S., Zhukov A. // Opt. Lett. 2018. V. 43. N 19. P. 4554–4557.
- [4] Kryzhanovskaya N., Moiseev E., Polubavkina Yu., Maximov M., Kulagina M., Troshkov S., Zadiranov Yu., Guseva Yu., Lipovskii A., Tang M., Liao M., Wu J., Chen S., Liu H., Zhukov A. // Opt. Lett. 2017. V. 42. N 17. P. 3319–3322.
- [5] Wan Y., Norman J., Li Q., Kennedy M.J., Liang D., Zhang C., Huang D., Zhang Z., Liu A.Y., Torres A., Jung D., Gossard A.C., Hu E.L., Lau K.M., Bowers J.E. // Optica. 2018. V. 4. N 8. P. 940–944.
- [6] Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Zubov F.I., Mozharov A.M., Maximov M.V., Kalyuzhnyy N.A., Mintairov S.A., Kulagina M.M., Blokhin S.A., Kudryavtsev K.E., Yablonskiy A.N., Morozov S.V., Berdnikov Yu., Rouvimov S., Zhukov A.E. // Photon. Res. 2019. V. 7. In press.
- [7] Nadtochiy A.M., Maximov M.V., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Rouvimov S., Zhukov A.E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 917. P. 032001 (1–4).
- [8] Yang Y.-D., Zhang Y., Huang Y.-Z., Poon A.W. // Opt. Express. 2014. V. 22. N 1. P. 824–838.
- [9] Kryzhanovskaya N.V., Moiseev E.I., Kudashova Yu.V., Zubov F.I., Lipovskii A.A., Kulagina M.M., Troshkov S.I., Zadiranov Yu.M., Livshits D.A., Maximov M.V., Zhukov A.E. // Electron. Lett. 2015. V. 51. N 17. P. 1354–1355.
- [10] Semiconductor lasers I. Fundamentals / Ed. E. Kapon. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1999. P. 303–305.
- [11] Moser P., Hofmann W., Wolf P., Lott J.A., Larisch G., Payusov A., Ledentsov N.N., Bimberg D. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. N 23. P. 231106 (1–3).
- [12] Zhukov A.E., Kryzhanovskaya N.V., Maximov M.V. Microdisk lasers: a new opportunity for self-organized quantum dots // Int. Conf. „Frontiers of 21st Century Physics and Ioffe Institute“. Abstract book. St. Petersburg, 2018. P. 33–34.