

07;09

## Особенности вольт-амперной характеристики микродисковых лазеров на основе квантовых ям-точек InGaAs/GaAs

© Ф.И. Зубов<sup>1</sup>, Э.И. Моисеев<sup>1</sup>, Г.О. Корнышов<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>2</sup>, А.С. Паюсов<sup>2</sup>, М.М. Кулагина<sup>2</sup>, Н.А. Калужный<sup>2</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, М.В. Максимов<sup>1</sup>, А.Е. Жуков<sup>1,¶</sup>

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

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 июня 2019 г.

В окончательной редакции 19 июня 2019 г.

Принято к публикации 20 июня 2019 г.

Исследованы сформированные глубоким травлением инжекционные микролазеры с активной областью на основе массивов квантовых ям-точек InGaAs/GaAs. Характер изменения вольт-амперной характеристики при уменьшении диаметра микролазеров указывает на формирование непроводящего электрический ток слоя толщиной около  $1.5 \mu\text{m}$  вблизи боковой поверхности, что приводит к уменьшению эффективной площади протекания тока.

**Ключевые слова:** полупроводниковый лазер, микролазер, квантовые точки, вольт-амперная характеристика.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.19.48316.17938

Микродисковые лазеры [1,2] активно исследуются в последние годы в связи с перспективами их использования в качестве компактных источников для систем оптической связи на кристалле. Оптический резонатор таких лазеров формируется с помощью глубокого травления эпитаксиальной гетероструктуры сквозь волновод и активную область. В связи с этим на характеристики микролазеров заметное влияние может оказывать безызлучательная (поверхностная) рекомбинация на боковых стенках микрорезонатора [3], в особенности при использовании упрощенной технологии изготовления без пассивации стенок. Однако в случае микродисковых лазеров с активной областью, представляющей собой массив самоорганизующихся квантовых точек (КТ), влияние безызлучательной рекомбинации оказывается не столь значительным. В пользу этого свидетельствуют низкие пороговые плотности тока ( $250 \text{ A/cm}^2$  [4]) и высокая предельная температура генерации ( $100^\circ\text{C}$  [5]). Считается, что нечувствительность микролазеров на основе КТ к поверхностной рекомбинации обусловлена подавлением латерального транспорта носителей заряда в плоскости КТ [6].

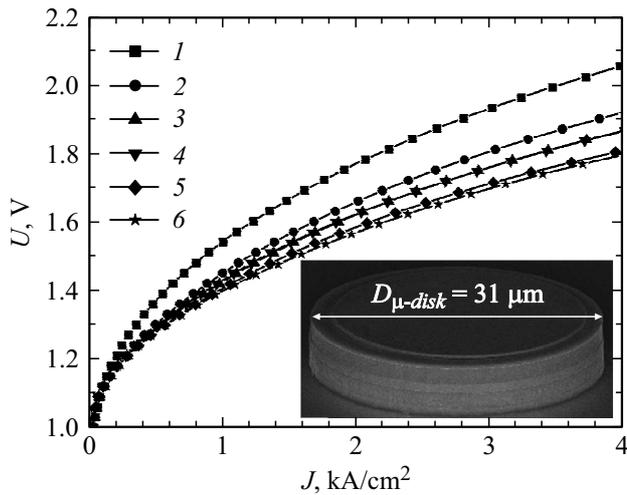
Недавно в качестве активной области микродисковых лазеров было предложено использовать так называемые квантовые ямы-точки (КЯТ), представляющие собой плотный массив In-обогащенных островков, формируемых методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) слоя InGaAs на слабоориентированную поверхность GaAs [7]. Высокие рабочая температура, коэффициент полезного действия, выходная мощность, а также частоты модуляции свыше  $6 \text{ GHz}$  [8], достигнутые в микродисковых лазерах на основе КЯТ, свидетельствуют о перспективности исполь-

зования этого типа наноструктур. В то же время многие их характеристики изучены не в полной мере.

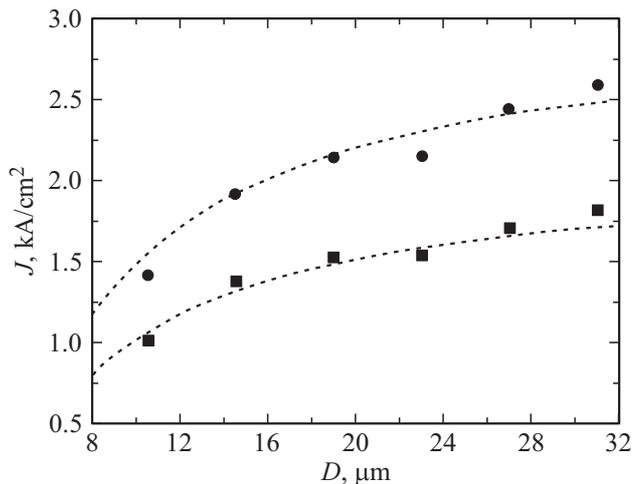
В настоящей работе нами исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) микролазеров с активной областью на основе КЯТ. Полученные результаты позволяют сделать вывод о подавлении протекания тока в области вблизи боковых стенок.

Для изготовления микролазеров была использована гетероструктура, синтезированная методом МОГФЭ на подложке  $n^+$ -GaAs, разориентированной на  $6^\circ$  относительно плоскости (100). Активная область представляла собой пять слоев КЯТ  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ , помещенных в середину волновода GaAs толщиной  $0.79 \mu\text{m}$ , ограниченного эмиттерными слоями AlGaAs  $n$ - и  $p$ -типа проводимости. Микродисковые резонаторы диаметром  $D$  от  $10.5$  до  $31 \mu\text{m}$  формировались глубоким плазмохимическим травлением сквозь волновод. Микролазеры имели общий  $n$ -контакт AuGe/Ni/Au, размещенный на тыльной стороне подложки. Индивидуальные  $p$ -контакты AgMn/NiAu были расположены на вершинах микродисков и имели диаметр, примерно на  $3 \mu\text{m}$  меньший, чем диаметр самого диска (вставка на рис. 1). Микродиски были затем планаризованы с помощью резиста SU-8. Измерения проводились без температурной стабилизации.

При большом прямом смещении и высоких плотностях тока, характерных для рабочих режимов инжекционных лазеров, напряжение  $U$  упрощенно описывается линейной функцией тока  $I$  [9]:  $U \approx U_0 + IR_S$ , где  $U_0$  — напряжение открывания  $p$ - $n$ -перехода,  $R_S$  — последовательное сопротивление, связанное с протеканием тока через последовательность слоев, образующих лазерную структуру, а также с сопротивлением контактов. Если протекание тока ограничено в пределах активной области площади  $S_{act}$ , ВАХ может быть за-



**Рис. 1.** Зависимость напряжения на диоде  $U$  от плотности тока  $J$  (ток инжекции, отнесенный к площади мезы травления) для микролазеров разного диаметра.  $D, \mu\text{m}$ : 1 — 10.5, 2 — 14.5, 3 — 19, 4 — 23, 5 — 27, 6 — 31. На вставке — изображение микродиска диаметром  $31 \mu\text{m}$  со сформированным верхним контактом до планаризации.



**Рис. 2.** Зависимость плотности тока  $J$ , соответствующей фиксированному напряжению  $U = 1.55 \text{ V}$  (квадраты) или  $1.65 \text{ V}$  (кружки), от диаметра микродиска. Штриховые линии — аппроксимация выражением (1).

писана в терминах плотности тока инжекции  $J = I/S_{act}$  как  $U \approx U_0 + J\rho_S$ , где  $\rho_S$  представляет собой удельное последовательное сопротивление ( $R_S = \rho_S/S_{act}$ ). Таким образом, для лазерных диодов с различной площадью активной области ВАХ в такой записи должна оставаться неизменной.

В случае микродисковых лазеров под площадью активной области обычно понимается площадь сечения мезы  $\pi D^2/4$ . На рис. 1 показаны ВАХ нескольких микродисковых лазеров разного диаметра, для которых плотность тока вычислена указанным выше способом, т.е.  $J = I/[\pi D^2/4]$ . Как видно, ВАХ существенно разли-

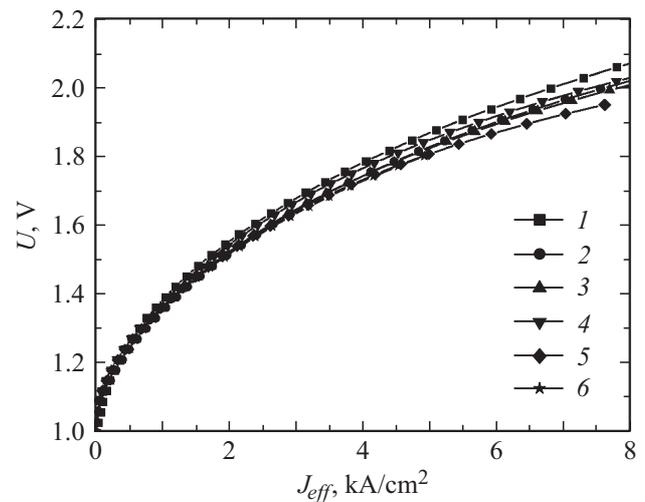
чаются, причем при фиксированном напряжении диоды меньшего размера характеризуются и меньшей плотностью тока  $J$ . Такое поведение может быть объяснено, если предположить, что реальный размер  $D_{eff}$  области протекания тока в микродисковых лазерах на некоторую величину  $\delta$  меньше геометрического размера их сечения:  $D_{eff} = D - \delta$ . Тогда истинная плотность тока будет равна  $J_{eff} = I/[\pi D_{eff}^2/4]$ , т.е. окажется в  $D^2/(D - \delta)^2$  раз больше, чем плотность тока  $J$ , вычисленная в предположении протекания тока по всей площади сечения мезы.

Для определения величины  $\delta$  мы проанализировали экспериментальную зависимость плотности тока  $J$  при фиксированном напряжении  $U$  от диаметра микродиска. На рис. 2 приведен пример для случаев  $U = 1.55$  и  $1.65 \text{ V}$ . Выражение

$$J = D^2/(D - \delta)^2 J_{eff} \quad (1)$$

удовлетворительно описывает экспериментальные данные и позволяет определить истинную плотность тока  $J_{eff}$ , соответствующую выбранному напряжению (2.1 и  $3.1 \text{ kA/cm}^2$  для  $U$ , показанных на рис. 2), а также общее для всех  $U$  значение  $\delta$ . Последнее оказалось равным  $3 \mu\text{m}$ .

На рис. 3 приведены ВАХ для микролазеров различного диаметра, для построения которых плотность тока инжекции вычислялась в предположении, что размер области протекания тока для всех микродисков меньше геометрического размера сечения на  $3 \mu\text{m}$ . Как видно, ВАХ для всех диодов в таком представлении хорошо согласуются друг с другом. Это означает, что вблизи боковых стенок исследуемых микролазеров имеется область шириной  $\delta/2 = 1.5 \mu\text{m}$ , ток инжекции через которую не протекает.



**Рис. 3.** Зависимость напряжения на диоде  $U$  от эффективной плотности тока  $J_{eff}$ , вычисленной в предположении, что диаметр области протекания тока меньше диаметра мезы на  $3 \mu\text{m}$ , для микролазеров разного диаметра  $D$  (обозначения те же, что на рис. 1).

Подобное явление имеет место, например, в лазерах с оксидной апертурой, где площадь активной области задается не размером мезы, а размером области, оставшейся неокисленной. Однако в исследуемых в настоящей работе микролазерах отсутствуют слои с высоким содержанием алюминия (молярная доля Al в эмиттерных слоях составляет менее 40%), которые могли бы подвергнуться непреднамеренному окислению. Скорее всего, причина кроется в формировании у боковых стенок поврежденного непроводящего слоя. Однако то обстоятельство, что диаметр области протекания тока фактически совпадает с диаметром верхнего электрического контакта, позволяет для объяснения особенностей ВАХ предположить отсутствие латерального растекания носителей заряда.

Таким образом, нами исследованы микродисковые лазеры диаметром от 10.5 до 31  $\mu\text{m}$  с активной областью, представляющей собой массив квантовых ямочек InGaAs. Показано, что для корректного сравнения ВАХ микролазеров различного диаметра значение плотности тока следует вычислять, полагая площадь протекания тока меньше на 3  $\mu\text{m}$ , чем диаметр сечения глубокой мезы.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (16-29-03127-ОФИ-М) и Минобрнауки РФ (3.9787.2017/8.9).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Munsch M., Claudon J., Malik N.S., Gilbert K., Grosse P., Gerard J.-M., Albert F., Langer F., Schlereth T., Pieczarka M.M., Hofling S., Kamp M., Forchel A., Reitzenstein S. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. N 3. P. 031111.
- [2] Zou L.-X., Huang Y.-Zh., Liu B.-W., Lv X.-M., Ma X.-W., Yang Y.-D., Xiao J.-L., Du Y. // Opt. Express. 2015. V. 23. N 3. P. 2879–2888.
- [3] Coldren L.A., Corzine S.W., Masanovic M.L. Diode lasers and photonic integrated circuit. 2nd ed. Hoboken, N.J., USA: Wiley, 2012. Section 4.5.2.
- [4] Moiseev E.I., Kryzhanovskaya N.V., Zubov F.I., Mikhailovskii M.S., Abramov A.N., Maximov M.V., Kulagina M.M., Guseva Yu.A., Livshits D.A., Zhukov A.E. // Semiconductors. 2019. In press.
- [5] 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.
- [6] Ouyang D., Ledentsov N.N., Bimberg D., Kovsh A.R., Zhukov A.E., Mikhrin S.S., Ustinov V.M. // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. N 12. P. L53–L54.
- [7] Moiseev E., Kryzhanovskaya N., Maximov M., Zubov F., Nadochiy A., Kulagina M., Zadiranov Yu., Kalyuzhnyy N., Mintairov S., Zhukov A. // Opt. Lett. 2018. V. 43. N 19. P. 4554–4557.
- [8] 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. N 6. P. 664–668.
- [9] Bour D.P., Rosen A. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 7. P. 2813–2818.