

07;09

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

© Ф.И. Зубов¹, Э.И. Моисеев¹, Г.О. Корнышов¹, Н.В. Крыжановская¹, Ю.М. Шерняков², А.С. Паюсов², М.М. Кулагина², Н.А. Калужный², С.А. Минтаиров², М.В. Максимов¹, А.Е. Жуков^{1,¶}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет РАН, Санкт-Петербург, Россия

² 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 A/cm^2 [4]) и высокая предельная температура генерации (100°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 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° 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-

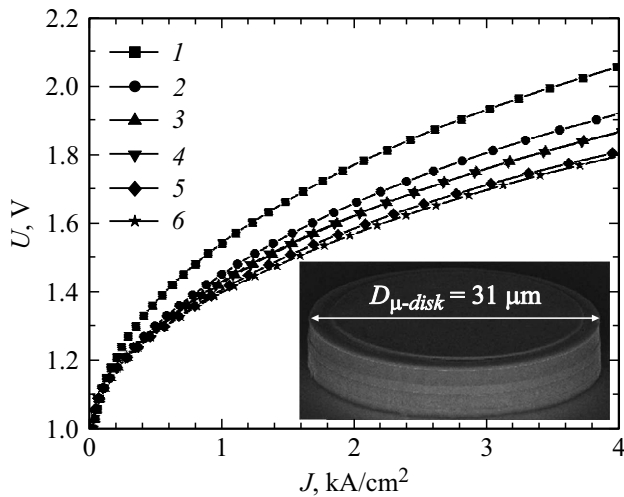


Рис. 1. Зависимость напряжения на диоде U от плотности тока J (ток инжекции, отнесенный к площади мезы травления) для микролазеров разного диаметра. $D, \mu\text{m}$: 1 — 10.5, 2 — 14.5, 3 — 19, 4 — 23, 5 — 27, 6 — 31. На вставке — изображение микродиска диаметром $31 \mu\text{m}$ со сформированным верхним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

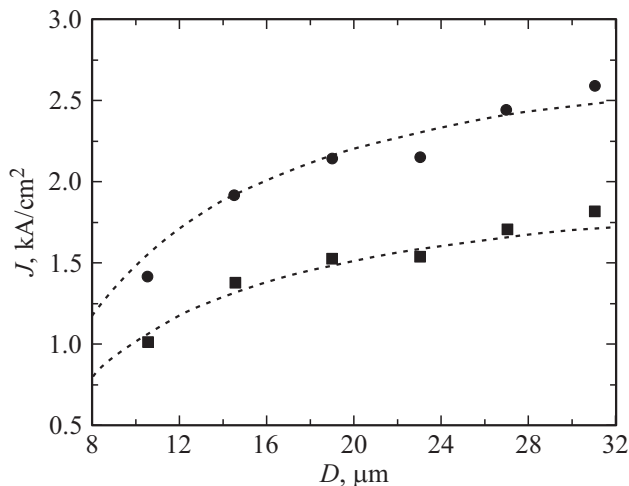


Рис. 2. Зависимость плотности тока J , соответствующей фиксированному напряжению $U = 1.55 \text{ V}$ (квадраты) или 1.65 V (кружки), от диаметра микродиска. Штриховые линии — аппроксимация выражением (1).

писана в терминах плотности тока инжекции $J = I/S_{act}$ как $U \approx U_0 + J\rho_S$, где ρ_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 δ 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 δ 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 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 kA/cm^2 для U , показанных на рис. 2), а также общее для всех U значение δ . 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.

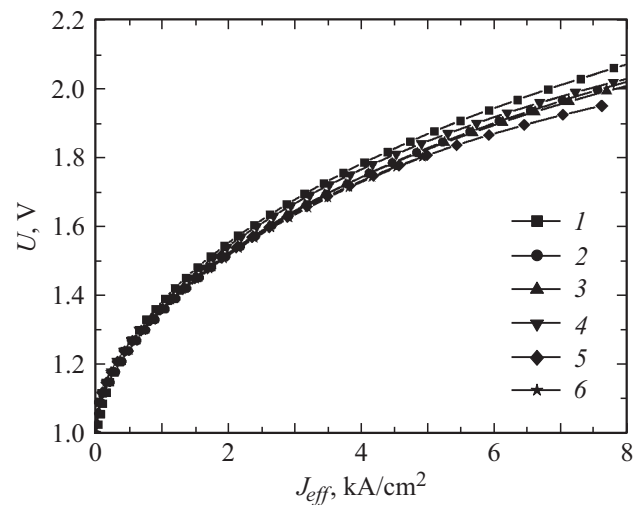


Рис. 3. Зависимость напряжения на диоде U от эффективной плотности тока J_{eff} , вычисленной в предположении, что диаметр области протекания тока меньше диаметра мезы на $3 \mu\text{m}$, для микролазеров разного диаметра D (обозначения те же, что на рис. 1).

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 μm 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 μm , 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.