

07.3

## Температурные характеристики кольцевых лазеров с активной областью на основе InAs/InGaAs/GaAs-квантовых точек оптического диапазона 1.3 $\mu\text{m}$

© Н.Ю. Гордеев<sup>1</sup>, Э.И. Моисеев<sup>2</sup>, Н.А. Фоминых<sup>2</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>2</sup>, А.А. Бекман<sup>1</sup>,  
Г.О. Корнышов<sup>3</sup>, Ф.И. Зубов<sup>3</sup>, Ю.М. Шерняков<sup>1</sup>, А.Е. Жуков<sup>2</sup>, М.В. Максимов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

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

E-mail: gordeev@switch.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 июля 2022 г.

В окончательной редакции 20 июля 2022 г.

Принято к публикации 5 августа 2022 г.

Исследованы температурные характеристики кольцевых лазеров диаметром 480  $\mu\text{m}$  оригинальной конструкции с активной областью на основе десяти слоев квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs. Лазеры продемонстрировали низкую пороговую плотность тока (200 А/см<sup>2</sup> при 20 °С в непрерывном режиме генерации), характеристическая температура порогового тока в диапазоне 20–100 °С составила 68 К, максимальная температура генерации 130 °С. Данные величины лишь незначительно уступают параметрам торцевых лазеров, изготовленных из той же эпитаксиальной структуры.

**Ключевые слова:** кольцевые полупроводниковые лазеры, квантовые точки InAs/GaAs, оптический волновод, температурные характеристики.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.18.53397.19316

Полупроводниковые лазеры наиболее широко представлены двумя типами резонаторов и волноводов: плосковые лазеры с выводом излучения с торца кристалла и вертикально-излучающие лазеры. Существуют и другие менее распространенные геометрии полупроводниковых лазеров, разрабатываемые для эффективного решения различных специфических задач. К таким приборам относятся, в частности, кольцевые лазеры, работающие в режиме синхронизации мод, являющиеся источниками стабильной последовательности коротких оптических импульсов длительностью в несколько пикосекунд с частотой повторения в десятки гигагерц, задаваемой длиной резонатора. Такие излучатели перспективны для применения в оптической связи, генерации тактовых импульсов, оптическом зондировании, биологических и медицинских исследованиях, микроволновой фотонике и т.д. Их ключевая особенность связана с технологической возможностью, определяемой фотолитографией, прецизионно (с точностью  $\sim 1 \mu\text{m}$ ) воспроизводить длину резонатора и реализовывать приборы с точно заданной частотой повторения импульсов. Это отличает кольцевые лазеры от стандартных плосковых, в которых резонатор формируется скалыванием полупроводникового кристалла с точностью в несколько десятков микрометров, что ведет к большой вариативности частот следования световых импульсов от лазера к лазеру.

Широкое распространение волоконно-оптической связи мотивировало исследования кольцевых лазеров на подложках InP спектрального диапазона вблизи 1.55  $\mu\text{m}$  [1–4]. Недостатками лазеров на основе квантовых ям в системе материалов InP являются необходимость использования сложной технологии зарачивания лазерных структур [5] и сильная температурная зависимость параметров, обусловленная малым разрывом зон в этой системе материалов. Альтернативой являются лазеры на подложках GaAs с квантовыми точками (КТ) In(Ga)As/GaAs, обладающие рядом важных преимуществ: малая пороговая плотность тока, высокая температурная стабильность характеристик, малое значение фактора уширения спектральной линии (альфа-фактора), слабое влияние поверхностной рекомбинации и ростовых дефектов на приборные характеристики. Высокая температурная стабильность позволяет использовать лазеры на основе квантовых точек без системы термостабилизации. В работе [6] сообщалось о передаче данных на скорости 10.3 Gb/s при фиксированном токе инжекции вплоть до 85 °С. Наибольшая температура, при которой был реализован непрерывный режим работы лазера на КТ спектрального диапазона 1.3  $\mu\text{m}$ , составила 220 °С [7]. Преимущества, продемонстрированные в торцевых лазерах на КТ, обусловлены фундаментальными свойствами активной области

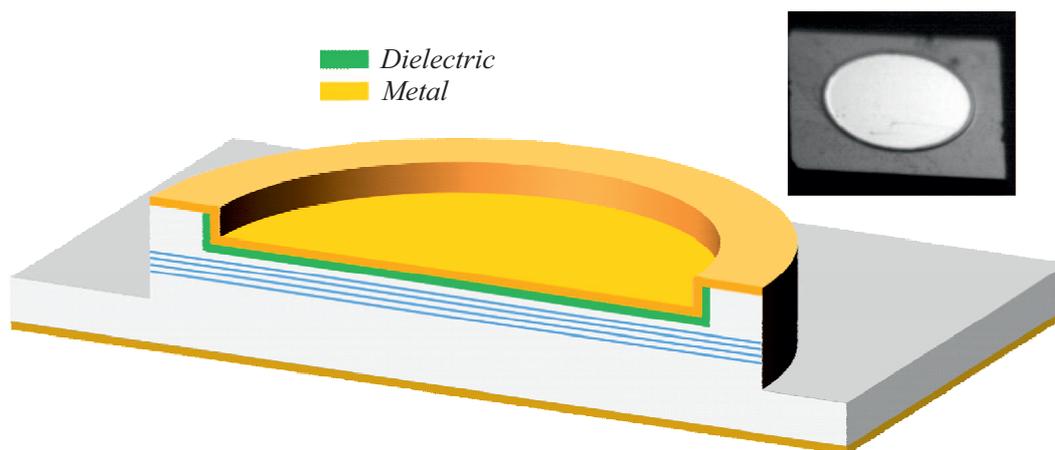


Рис. 1. Схематическое изображение (не в масштабе) поперечного сечения и фотография (на вставке) кольцевого лазера.

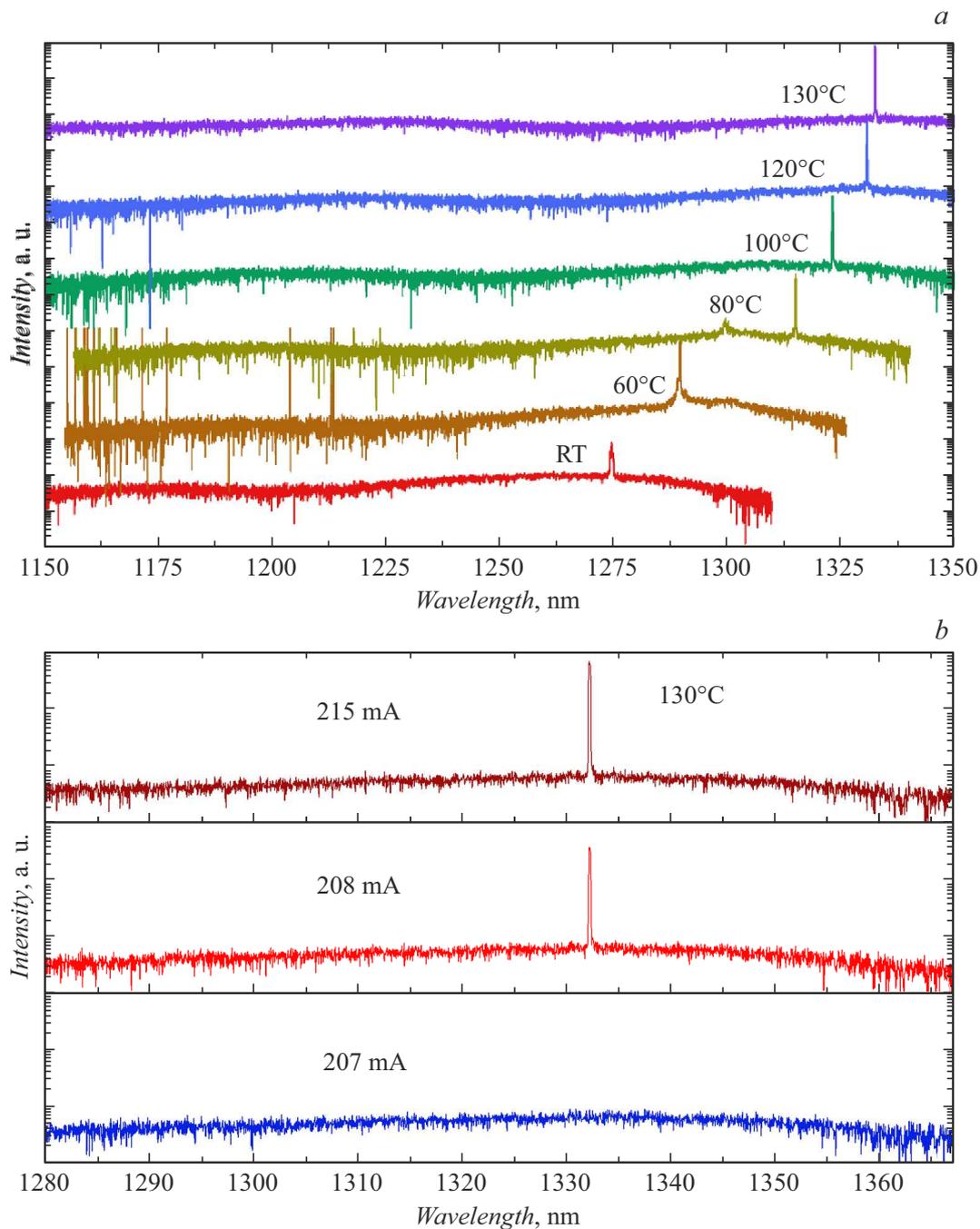
и должны сохраняться в лазерах кольцевой конструкции.

Ранее нами была предложена и реализована оригинальная конструкция кольцевых полупроводниковых лазеров на основе квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs [8]. Ее преимуществами являются простота постростовой технологии, не требующая заравнивания или планаризации, и возможность изготовления многосекционных лазеров, в том числе для генерации коротких импульсов в режиме синхронизации мод. Лазеры продемонстрировали низкую пороговую плотность тока  $150 \text{ A/cm}^2$  и выходную мощность  $45 \text{ mW}$  в непрерывном режиме. В настоящей работе исследуются температурные характеристики данных кольцевых лазеров.

Эпитаксиальная структура была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке  $n\text{-GaAs}(100)$ . Активная область представляла собой десять слоев квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs, излучающих в оптическом диапазоне  $1.3 \mu\text{m}$ , разделенных прослойками GaAs толщиной  $36 \text{ nm}$ . Для получения КТ использовался ростовой метод, в котором начальные точки, полученные осаждением InAs ( $0.8 \text{ nm}$ ) в режиме роста Странского–Крастанова, покрывались слоем  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$  средней толщины  $5 \text{ nm}$  [9]. Активная область располагалась в середине нелегированного GaAs-волновода толщиной  $0.4 \mu\text{m}$ , заключенного между  $n$ - и  $p$ -эмиттерами  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ . Конструкция кольцевого лазера (рис. 1) и его базовые характеристики подробно описаны нами в работе [8]. Ее особенностью является использование асимметричного латерального волновода: с внешней стороны кольца травление глубокое (на  $5 \mu\text{m}$ ), с внутренней стороны волновод вытравлен на глубину контактного слоя и частично верхнего эмиттера. Ширина кольцевого волновода составляет  $10 \mu\text{m}$ , диаметр кольца  $480 \mu\text{m}$  (периметр кольца  $1.5 \text{ mm}$ ). Внутренняя часть кольца покрыта слоем диэлектрика  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , что позволяет нанести сплошной

металлический  $p$ -контакт в форме круга на всю верхнюю поверхность лазера. В качестве  $n$ -контакта используется нижняя поверхность подложки. Конструкция позволяет на этапе постростовой обработки разделить кольцо на секции, имеющие свои металлические контакты. В зависимости от полярности приложенного смещения секции могут быть поглощающими или усиливающими, что необходимо для работы лазера в режиме синхронизации мод [1]. Такие многосекционные лазеры монтируются на теплоотвод эпитаксиальными слоями вверх, а накачка усиливающей секции осуществляется постоянным током, что обуславливает „жесткий“ тепловой режим их работы. Также в кольцевых лазерах температурную зависимость характеристик может ухудшать поверхностная рекомбинация на боковых стенках, сформированных плазмохимическим травлением. Для оценки степени влияния данного эффекта, а также других конструктивных особенностей кольцевого лазера на пороговую плотность тока и ее температурную чувствительность из той же эпитаксиальной структуры были изготовлены и исследованы стандартные торцевые лазеры шириной  $100 \mu\text{m}$ .

Кольцевые и торцевые лазеры монтировались на медные теплоотводы с помощью индиевого припоя. Измерения кольцевых лазеров, смонтированных слоями вверх, проводились при накачке постоянным током от стабилизированного источника питания Keithley 2401 в диапазоне температур  $20\text{--}150^\circ\text{C}$ . Излучение кольцевых лазеров собиралось 50-кратным объективом Mitutoyo M Plan Apo NIR, передавалось по оптическому волокну и детектировалось оптическим анализатором спектра Yokogawa AQ6370C. Излучение торцевых лазеров, смонтированных слоями вниз, измерялось при накачке импульсным током, что предотвращало перегрев активной области и позволяло исследовать температурную чувствительность пороговой плотности тока, близкую к предельной. Излучение торцевых лазеров собиралось линзой и детек-



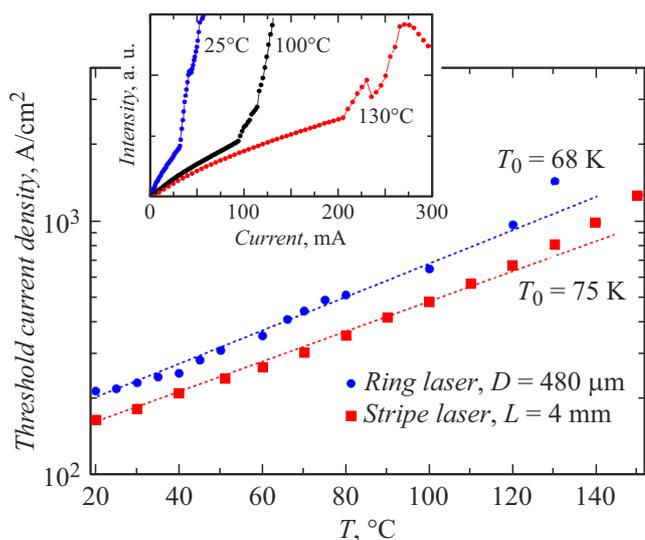
**Рис. 2.** Спектры лазерной генерации при различных температурах (а) и различных токах при 130°C (б).

тировалось при помощи монохроматора и InGaAs-фотодетектора.

На рис. 2, а показаны спектры излучения кольцевого лазера диаметром 480  $\mu\text{m}$  при различных температурах, записанные в широком диапазоне длин волн. На спектрах наблюдается широкая полоса спонтанного излучения, характерная для самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs/GaAs [10]: длинноволновый максимум при 1265 nm соответствует основному оптическому переходу КТ, а более коротковолновый пик излучения

при 1175 nm — первому возбужденному оптическому переходу КТ. Ширина пиков спонтанного излучения составляет несколько десятков нанометров. При увеличении тока накачки на широком пике излучения основного состояния возникает узкая лазерная линия, соответствующая одной из мод шепчущей галереи резонатора (рис. 2, б). Лазерная генерация наблюдается вплоть до 130°C.

Пороговый ток определялся по характерному излому на зависимости интегральной интенсивности мод



**Рис. 3.** Зависимость порогового тока от температуры для кольцевых и торцевых лазеров. На вставке представлены зависимости интегральной интенсивности доминантной лазерной линии от тока при трех температурах.

шепчущей галереи от тока накачки (вставка к рис. 3). При комнатной температуре плотность порогового тока кольцевых лазеров составляет  $210 \text{ A/cm}^2$ , что лишь немного превышает значение аналогичной величины в торцевых лазерах ( $160 \text{ A/cm}^2$ ). Небольшое различие может быть связано с более значительным растеканием тока в кольцевых лазерах, вкладом поверхностной рекомбинации на боковой стенке кольцевого лазера, полученной плазмохимическим травлением, а также с тем, что измерения торцевого лазера проводились при импульсной накачке.

В диапазоне  $20\text{--}100^\circ\text{C}$  температурная зависимость порогового тока кольцевого и торцевого лазеров хорошо аппроксимируется выражением  $\exp(T/T_0)$ , где  $T_0$  — характеристическая температура. Значения  $T_0$  были определены равными  $68$  и  $75 \text{ K}$  для кольцевого и торцевого лазера соответственно. При увеличении температуры до  $130^\circ\text{C}$  в кольцевом лазере наблюдается быстрый рост порогового тока, вероятно обусловленный выбросом носителей из квантовых точек в матрицу и смачивающий слой и их последующей излучательной и безызлучательной рекомбинацией, в том числе на боковой поверхности прибора. Работа кольцевого лазера при непрерывной накачке и монтаж на теплоотвод слоями вверх вносят вклад в более быстрый рост температурной зависимости пороговой плотности тока за счет саморазогрева активной области.

Продемонстрировано, что разработанная нами оригинальная конструкция кольцевых инжекционных лазеров с активной областью на основе квантовых точек  $\text{InAs/InGaAs/GaAs}$  обеспечивает лазерную генерацию при накачке постоянным током вплоть до  $130^\circ\text{C}$ .

Характеристическая температура порогового тока для кольцевых лазеров лишь незначительно меньше, чем для полосковых лазеров из той же эпитаксиальной структуры. Таким образом, исследованные кольцевые лазеры представляются перспективными для использования в различных оптических системах, работающих без стабилизации температуры.

### Финансирование работы

М.В. Максимов, Г.О. Корнышов и Ф.И. Зубов благодарят за поддержку Министерство науки и высшего образования РФ (проект 0791-2020-0002). Оптические исследования выполнены при поддержке Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] K. Van Gasse, S. Uvin, V. Moskalenko, S. Latkowski, G. Roelkens, E. Bente, B. Kuyken, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **31** (23), 1870 (2019). DOI: 10.1109/LPT.2019.2945973
- [2] S. Latkowski, V. Moskalenko, S. Tahvili, L. Augustin, M. Smit, K. Williams, E. Bente, *Opt. Lett.*, **40** (1), 77 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.000077
- [3] V. Moskalenko, S. Latkowski, S. Tahvili, T. de Vries, M. Smit, E. Bente, *Opt. Express*, **22** (23), 28865 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.028865
- [4] V. Moskalenko, J. Koelemeij, K. Williams, E. Bente, *Opt. Lett.*, **42** (7), 1428 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.001428
- [5] J.S. Parker, P.R.A. Binetti, Y.-J. Hung, L.A. Coldren, *J. Light. Technol.*, **30** (9), 1278 (2012). DOI: 10.1109/JLT.2012.2184264
- [6] K. Takada, Y. Tanaka, T. Matsumoto, M. Yamaguchi, T. Kageyama, K. Nishi, Y. Nakata, T. Yamamoto, M. Sugawara, Y. Arakawa, in *CLEO2011 — Laser applications to photonic applications* (OSA, Washington, D.C., 2011), paper CFD5. DOI: 10.1364/CLEO\_SI.2011.CFD5
- [7] T. Kageyama, K. Nishi, M. Yamaguchi, R. Mochida, Y. Maeda, K. Takemasa, Y. Tanaka, T. Yamamoto, M. Sugawara, Y. Arakawa, in *2011 Conf. on Lasers and Electro-Optics Eur. and 12th Eur. Quantum Electronics Conf. (CLEO EUROPE/EQEC)* (IEEE, 2011), p. 1-1. DOI: 10.1109/CLEOE.2011.5943701
- [8] N.Y. Gordeev, M.M. Kulagina, Y.A. Guseva, A.A. Serin, A.S. Payusov, G.O. Kornyshev, F.I. Zubov, A.E. Zhukov, M.V. Maximov, *Laser Phys. Lett.*, **19** (6), 066201 (2022). DOI: 10.1088/1612-202X/ac6a62

- [9] M.V. Maximov, A.F. Tsatsul'nikov, B.V. Volovik, D.S. Sizov, Y.M. Shernyakov, I.N. Kaiander, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, Z.I. Alferov, R. Heitz, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, Y.G. Musikhin, W. Neumann, *Phys. Rev. B*, **62** (24), 16671 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevB.62.16671
- [10] M.V. Maximov, L.V. Asryan, Y.M. Shernyakov, A.F. Tsatsul'nikov, I.N. Kaiander, V.V. Nikolaev, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, V.M. Ustinov, A.E. Zhukov, Z.I. Alferov, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, *IEEE J. Quantum Electron.*, **37** (5), 676 (2001). DOI: 10.1109/3.918581