

Лазерные характеристики инжекционного микродиска с квантовыми точками и эффективность вывода излучения в свободное пространство

© Ф.И. Зубов^{+,*}, Н.В. Крыжановская^{+,*}, Э.И. Моисеев^{+,*}, Ю.С. Полубавкина^{+,*}, О.И. Симчук^{+,*},
М.М. Кулагина^Δ, Ю.М. Задиранов^Δ, С.И. Трошков^Δ, А.А. Липовский^{+,*}, М.В. Максимов^{+,*Δ}, А.Е. Жуков^{+,*}

⁺ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

^Δ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

(Получена 18 апреля 2016 г. Принята к печати 28 апреля 2016 г.)

Исследованы спектральные, пороговые и мощностные характеристики микродискового лазера диаметром 31 мкм с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, работающего в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре. Минимальное значение пороговой плотности тока составило 0.58 кА/см², допороговая ширина линий излучения мод шепчущей галереи составляет 50 пм при длине волны, лежащей в диапазоне 1.26–1.27 мкм. Полная излучаемая в свободное пространство мощность достигает в непрерывном режиме около 0.1 мВт, при этом мощность излучения мод шепчущей галереи составляет около 2.8%.

1. Введение

В микрорезонаторах, обладающих осевой симметрией, таких как микродиски и микрокольца, наибольшей добротностью обладают, как правило, моды шепчущей галереи (МШГ). Такие МШГ-микрорезонаторы, в которые помещены полупроводниковые квантовые точки (КТ), активно исследовались в последние годы в различных направлениях, включая реализации низкопороговых микролазеров [1], высокодобротных резонаторов для экспериментов по квантовой электродинамике [2], источников излучения, интегрированных на плате с другими квантово-оптическими устройствами [3]. Самоорганизующиеся квантовые точки InAs/InGaAs, формируемые на подложках GaAs [4], позволяют обеспечить глубокую локализацию носителей заряда, что способствует достижению низкой чувствительности характеристик прибора по отношению к различным термически-активируемым процессам, таким как выброс носителей из активной области и безызлучательная рекомбинация на боковых стенках и других несовершенствах микрорезонатора. Недавно нами была продемонстрирована лазерная генерация при 100°C в инжекционных микродисках с КТ [5], что является, насколько нам известно, наибольшей сообщенной на сегодня температурой работы подобных микролазеров. Возможность достижения высокотемпературной низкопороговой генерации делает микролазеры на основе КТ перспективными устройствами для замещения микроизлучателей на основе квантовых ям на подложках InP, используемых в настоящее время в гибридных (A^{III}B^V-Si) устройствах интегральной фотоники [6,7].

Для большинства перспективных применений чрезвычайно важным является также достижение высокой эффективности вывода излучения из МШГ-микрорезонато-

ра. Хотя идеальный цилиндрический микрорезонатор и характеризуется чрезвычайно высокой добротностью [8], поверхностная шероховатость, неизбежно возникающая при его формировании, приводит к возникновению дополнительных излучательных потерь [9]. Есть основания полагать, что абсолютный уровень мощности, выходящей в латеральном направлении в свободное пространство из МШГ-микрорезонатора с КТ, может быть достаточным для определенных применений. Так, в работе [3], в которой хотя и не приводились какие-либо количественные оценки, сообщалось об использовании такого микролазера в качестве оптического источника, обеспечивающего достаточный для проведения экспериментов по квантовой электродинамике уровень оптической накачки вертикальных микрорезонаторов, расположенных от него на расстоянии 20 мкм. Даже при малой эффективности латерального вывода излучения в свободное пространство из МШГ-микролазера этот подход существенно упрощает реализацию устройства по сравнению с различными методами вывода излучения в волновод, требующими применения сложных технологических операций [6,7] и (или) точного совмещения элементов [10]. В то же время в литературе приводится крайне скудная информация по экспериментальной оценке эффективности вывода излучения в свободное пространство из МШГ-микролазеров [11], а информация об абсолютном значении мощности не представлена.

В настоящей работе нами определено значение мощности и эффективность вывода в свободное пространство излучения микродискового лазера с КТ. Насколько нам известно, эти количественные параметры определены для подобных микролазеров, работающих при инжекционной накачке, впервые. Также нами достигнуто рекордно низкое (для микролазеров сравнимого

размера) значение пороговой плотности тока и продемонстрированы сверхузкие (не более 30 нм) линии излучения МШГ.

2. Эксперимент

Лазерная структура была синтезирована методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке *n*-GaAs (100). Десять рядов КТ InAs/InGaAs, разделенных спейсерными слоями GaAs толщиной 35 нм (из которых 10 нм были *p*-легированы углеродом с концентрацией $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), были помещены в центре волноводного слоя GaAs толщиной 0,44 мкм, ограниченного эмиттерами $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$. Для предварительной характеристики материала были изготовлены торцевые лазеры с шириной полоска 50 мкм и различной длиной резонатора, формируемого скалыванием граней. Микродисковые резонаторы диаметром 31 мкм и высотой 7 мкм были изготовлены с помощью плазмо-химического травления с последующим нанесением омических контактов AgMn/Ni/Au и AuGe/Ni/Au к мезе и подложке соответственно. Более подробно эта технология описана в [12]. Затем структуры были расколоты на отдельные чипы, содержащие исследуемые микрولазеры. Чипы монтировались с помощью индиевого припоя на медный теплоотвод, к верхнему контакту на мезе припаивалась золотая проволока.

Если не указано иное, микрولазеры были исследованы при комнатной температуре при непрерывной накачке без принудительной температурной стабилизации. Для измерения оптической мощности излучение, выходящее из микродискового резонатора, собиралось германиевым фотодиодом Thorlabs FDG1010c площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$, расположенным на расстоянии 5 мм от края микродиска. Азимутальный угол сбора излучения при такой геометрии, по нашей оценке, составляет около 90°C . Абсолютное значение оптической мощности определялось с учетом спектральной чувствительности детектора и угловой диаграммы направленности излучения. Для измерения диаграммы направленности излучения мы использовали вертикальную щель шириной 0,5 мм. Для измерения спектров в широком диапазоне длин волн (900–1350 нм) с разрешением 0,2 нм использовался монохроматор DK480 Spectral Products и InGaAs фотодетектор Teledyne Judson Technologies J22TE2-66C-R03M. Для снятия спектров МШГ с разрешением 30 нм применялся монохроматор Horiba FHR 1000 и InGaAs ПЗС-линейка Horiba Symphony.

3. Результаты

Торцевые лазеры продемонстрировали пороговую плотность тока при комнатной температуре 260 А/см^2 (для 2-миллиметровой длины резонатора) (рис. 1). Наименьшая длина лазерного резонатора, в которой достигалась лазерная генерация на основном оптическом

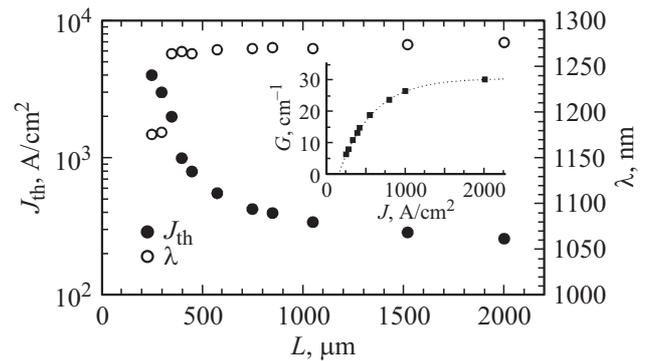


Рис. 1. Зависимость пороговой плотности тока (черные символы) и длины волны генерации (белые символы) от длины лазера полосковой конструкции. На вставке — оптическое усиление на основном состоянии КТ от тока накачки.

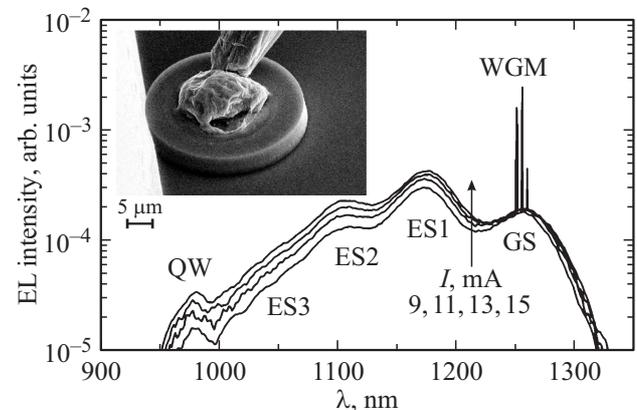


Рис. 2. Спектры излучения инжекционного микродиска при различных токах. Отмечены основной (GS), с 1-го по 3-ий возбужденные (ES1–ES3) переходы КТ, переход покрывающей квантовой ямы (QW), а также линии МШГ (WGM). На вставке — микрофотография дискового лазера с верхним контактом.

переходе КТ (1264–1276 нм в зависимости от длины резонатора), составила 350 мкм. Внутренние потери в торцевых лазерах, согласно оценке на основе зависимости обратной внешней дифференциальной квантовой эффективности от длины лазера, составили около $1,5 \text{ см}^{-1}$. С учетом этого, максимальное оптическое усиление, достигаемое на основном оптическом переходе КТ, составляет приблизительно 30 см^{-1} (см. вставку к рис. 1).

На вставке к рис. 2 приведена микрофотография инжекционного микродискового лазера с верхним проволочным контактом. На рис. 2 показаны спектры излучения микродисков, записанные при различных токах накачки в широком диапазоне длин волн. Узкие линии, обусловленные излучением МШГ, возникают вблизи максимума интенсивности основного оптического перехода КТ.

Спектральная ширина линий МШГ, извлеченная из спектров высокого разрешения, снятых при слабой накачке (до порога генерации), составляет около 50 нм (см. вставку к рис. 3). Это соответствует Q -фактору

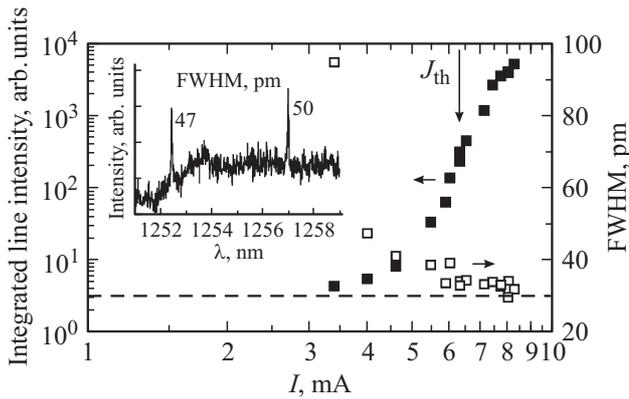


Рис. 3. Интегральная интенсивность (черные символы) и спектральная ширина (белые символы) доминантной линии МШГ (1257 нм). Штриховая линия — спектральное разрешение детектирования. На вставке — спектр излучения высокого разрешения при токе накачки 4 мА.

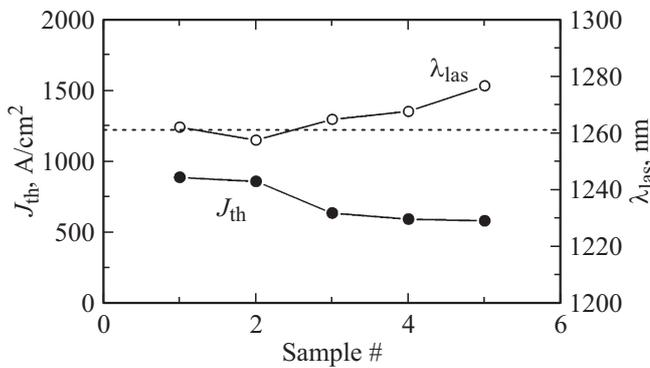


Рис. 4. Пороговая плотность тока (черные символы) и длина волны генерации (белые символы) микродисковых лазеров. Штриховая линия — положение основного оптического перехода КТ в спектрах электролюминесценции.

$(\lambda/\Delta\lambda) \cong 2.5 \cdot 10^4$, что, в свою очередь, позволяет оценить оптические потери микрорезонатора $\alpha = 2\pi n/(\lambda Q)$ около 7 см^{-1} (полагая показатель преломления $n \cong 3.5$). На рис. 3 показана зависимость интегральной интенсивности доминантной МШГ и ее спектральной полуширины на половине высоты от тока накачки для этого же микродиска. Соответствующее пороговому току резкое возрастание интенсивности сопровождается сужением линии до уровня спектрального разрешения системы детектирования.

На рис. 4 приведены данные по пороговой плотности тока и длине волны генерации (для доминантной МШГ) для нескольких номинально одинаковых микродисковых лазеров, изготовленных из одной и той же эпитаксиальной пластины. Значения пороговой плотности тока лежат в диапазоне от 583 до 888 А/см^2 . Это сравнимо с наименьшим из сообщенных ранее значением пороговой плотности (480 А/см^2 , 24 мА), достигнутом в инжекционном КТ-микродиске, заметно большего диаметра 80 мкм [13]. Разброс длины волны генерации составляет

около 20 нм. Он связан, вероятно, как с неоднородностью свойств массива КТ по поверхности эпитаксиальной пластины, так и некоторым различием в геометрии изготовленных микродисков и растекания тока.

Микродисковые лазеры, геометрия которых не модифицирована специальным образом для снятия осевой симметрии [14], обладают высокой однородностью азимутального распределения интенсивности излучения, что существенно упрощает определение абсолютного значения полной мощности (P) излучения, зависимость которой от тока (I) приведена на рис. 5. При малых накачках зависимость свет-ток является линейной, что свидетельствует о преобладании излучательной рекомбинации в активной области прибора. При больших токах наклон зависимости $P(I)$, построенной в двойных логарифмических шкалах, составляет $2/3$, что позволяет заключить о преобладании в этих условиях оже-рекомбинации. Такой же наклон зависимости $P(I)$ сохраняется и при импульсной накачке, что позволяет заключить, что изменение характера рекомбинации не вызвано перегревом микролазера в режиме непрерывной генерации.

Согласно представленным данным, излучательная рекомбинация преобладает (отклонение от линейной зависимости пренебрежимо) вплоть до тока, приблизительно равного 1 мА. С учетом поверхностной плотности КТ InAs/InGaAs, составляющей около $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, для использованного в настоящей работе десятислойного массива КТ этот ток соответствует протеканию через каждую КТ $1.6 \cdot 10^9$ элементарных зарядов в секунду. Это в свою очередь отвечает заполнению КТ в среднем 1.6 электронно-дырочными парами (полагая время излучательной рекомбинации 1 нс [4]).

Доля излучаемой в свободное пространство оптической мощности, приходящейся на МШГ (см. вставку к рис. 5), была вычислена из спектров, измеренных в широком диапазоне длин волн. Она растет с током и при наибольшем использованном в работе уровне непрерывной накачки 15 мА достигает значения 2.8%. С учетом

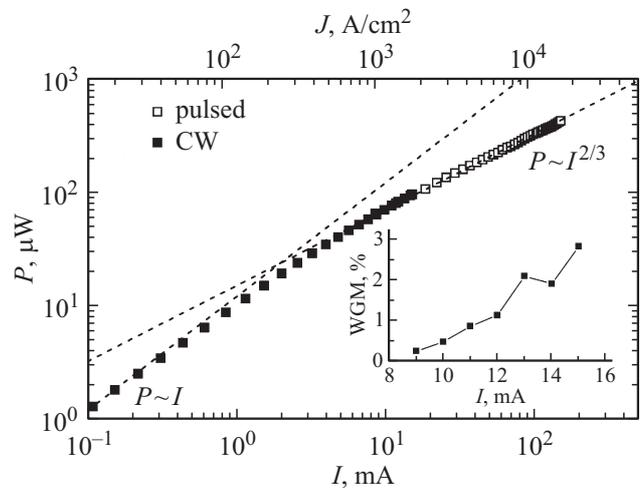


Рис. 5. Полная мощность излучения в зависимости от тока: черные символы — непрерывный режим, белые символы — импульсный режим. На вставке — доля мощности линий МШГ.

значения полной мощности излучения (95 мкВт) при таком токе, полная мощность МШГ, излучаемая в свободное пространство, достигает таким образом 2.65 мкВт. Дифференциальная эффективность вывода излучения МШГ из микродискового лазера, определенная по наклону зависимости мощность МШГ—ток (0.5 мкВт/мА), составляет 0.05%.

4. Заключение

Значения выходной мощности и эффективности вывода в свободное пространство излучения мод шепчущей галереи, насколько нам известно, впервые определены для микродисковых инжекционных лазеров с КТ. Полученное в настоящей работе значение дифференциальной эффективности 0.05% можно сравнить со значением 0.02–0.1%, сообщавшимся для подвешенного КТ микродиска диаметром 2 мкм, работающего при оптической накачке [11]. Поскольку внешняя дифференциальная эффективность мала, потери на вывод излучения пренебрежимы по сравнению с внутренними оптическими потерями. Последние, следовательно, можно оценить равными около 7 см^{-1} , исходя из допороговой спектральной ширины линий МШГ. Для существенного увеличения эффективности вывода из микрорезонатора потребуется увеличение потерь на вывод излучения до уровня внутренних потерь (режим критической связи). Полные потери должны составить, таким образом, около 14 см^{-1} , что все еще будет заметно ниже максимального значения оптического усиления (около 30 см^{-1}), определенного для основного оптического перехода КТ из данных, полученных для торцевых лазерных диодов. С другой стороны, даже продемонстрированный в настоящей работе при непрерывной накачке уровень оптической мощности излучения МШГ, составляющий в свободном пространстве несколько мкВт, достаточен для реализации функциональных устройств с использованием таких КТ микродисковых лазеров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 15-32-20238 и 16-29-03111-офи-м).

Список литературы

- [1] M.V. Maximov, N.V. Kryzhanovskaya, A.M. Nadtochiy, E.I. Moiseev, I.I. Shostak, A.A. Bogdanov, Z.F. Sadrieva, A.E. Zhukov, A.A. Lipovskii, D.V. Karpov, J. Laukkanen, J. Tömmila. *Nanoscale Res. Lett.*, **9**, 657 (2014).
- [2] E. Peter, P. Senellart, D. Martrou, A. Lemaitre, J. Hours, J.M. Gérard, J. Bloch. *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 067401 (2005).
- [3] E. Stock, F. Albert, C. Hopfmann, M. Lermer, C. Schneider, S. Höfling, A. Forchel, M. Kamp, S. Reitzenstein. *Advanced Mater.*, **25**, 707 (2013).
- [4] A.E. Жуков, М.В. Максимов, А.Р. Ковш. *ФТП*, **46**(10), 1249 (2012).
- [5] 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**, 1354 (2015).
- [6] J. Van Campenhout, P. Rojo-Romeo, P. Regreny, C. Scassal, D. Van Thourhout, S. Verstuyft, L. Di Cioccio, J.-M. Fedeli, C. Lagahe, R. Baets. *Opt. Express*, **15**, 6744 (2007).
- [7] D. Liang, M. Fiorentino, S. Srinivasan, J.E. Bowers, R.G. Beausoleil. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **17**, 1528 (2011).
- [8] S.L. McCall, A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 289 (1992).
- [9] M. Borselli, T.J. Johnson, O. Painter. *Opt. Express*, **13**, 1515 (2005).
- [10] M.T. Hill, S. Ananthanasarn, Y. Zhu, Y.-S. Oei, P.J. van Veldhoven, M.K. Smit, R. Nötzel. *IEEE Phot. Techn. Lett.* **20**, 446 (2008).
- [11] K. Srinivasan, M. Borselli, O. Painter, A. Stintz, S. Krishna. *Opt. Express*, **14**, 1094 (2006).
- [12] 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).
- [13] M. Munsch, J. Claudon, N.S. Malik, K. Gilbert, P. Grosse, J.-M. Gérard, F. Albert, F. Langer, T. Schlereth, M.M. Pieczarka, S. Höfling, M. Kamp, A. Forchel, S. Reitzenstein. *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 031111 (2012).
- [14] Yu.S. Polubavkina, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, M.M. Kulagina, I.S. Mukhin, F.E. Komissarenko, Yu.M. Zadiranov, M.V. Maximov, A.E. Krasnok, A.A. Bogdanov, A.E. Zhukov. *3rd Int. School and Conf. on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (SPb OPEN 2016)* (Saint Petersburg, Russia, March 28–30, 2016, Book of abstracts, p. 422.)

Редактор Г.А. Оганесян

Laser characteristics of injection microdisk with quantum dots and its free-space outcoupling efficiency

F.I. Zubov⁺, N.V. Kryzhanovskaya⁺, E.I. Moiseev⁺, Yu.S. Polubavkina⁺, O.I. Simchuk⁺, M.M. Kulagina^Δ, Yu.M. Zadiranov^Δ, S.I. Troshkov^Δ, A.A. Lipovskii⁺, M.V. Maximov^{++Δ}, A.E. Zhukov⁺⁺

⁺ St. Petersburg National Research Academic University, Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

^{*} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251 St. Petersburg, Russia

^Δ Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract We studied spectral, threshold and power characteristics of a $31\text{ }\mu\text{m}$ in diameter microdisk laser with an InAs/InGaAs quantum dot active region operating in continuous-wave regime at room temperature. The minimal value of threshold current density is 0.58 kA/cm^2 , sub-threshold linewidth of a whispering gallery mode is 50 pm with the wavelength being in the $1.26\text{--}1.27\text{ }\mu\text{m}$ spectral interval. Total optical power emitted in free space reaches approximately 0.1 mW in continuous-wave regime, while the whispering gallery mode emission amounts to about 2.8% of the total power.