

Лазерная генерация при комнатной температуре в микрокольцевых резонаторах с активной областью на основе квантовых точек

© Н.В. Крыжановская^{†‡•¶}, А.Е. Жуков^{†‡•}, А.М. Надточий^{†‡•}, М.В. Максимов^{•+}, Э.И. Моисеев^{‡+}, М.М. Кулагина[•], А.В. Савельев^{†‡}, Е.М. Аракчеева^{+•}, А.А. Липовский^{‡+}, Ф.И. Зубов^{†‡}, A. Kapsalis^{*}, C. Mesaritis^{*}, D. Syvridis^{*}, A. Mintairov[#], D. Livshits[‡]

[†] Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

[‡] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия

[•] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

^{*} University of Athens, Athens, Greece 15784

[#] University of Notre Dame, 275 Fitzpatrick Hall, Notre Dame, IN 46556, USA

[‡] Innolume GmbH, 44263 Dortmund, Deutschland

(Получена 14 февраля 2013 г. Принята к печати 25 февраля 2013 г.)

Созданы микрокольцевые резонаторы (диаметром $D = 2.7-7$ мкм) с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, и исследованы их характеристики с помощью микрофотолюминесценции и ближнепольной оптической микроскопии. Получено значение добротности 22 000 для микрокольцевого резонатора диаметром $D = 6$ мкм. В кольцевом микролазере диаметром $D = 2.7$ мкм при оптической накачке достигнута лазерная генерация вплоть до комнатной температуры.

1. Введение

За последние два десятилетия достигнуты значительные успехи в области нанофотоники и интегральной оптики. В настоящее время фотонные устройства уже заменили собой электронные устройства в области телекоммуникационной передачи данных на дальние расстояния. Весьма актуальной остается задача заменить электронные средства передачи данных и на короткие расстояния, в том числе для передачи данных на плате. Такие фотонные устройства должны занимать малую площадь, потреблять малую мощность, иметь высокую скорость переключения, излучать и преобразовывать сигналы в плоскости платы. Оптические резонаторы с дисковой/кольцевой геометрией перспективны в качестве элементов различных фотонных интегральных схем благодаря малой занимаемой площади, низкой потребляемой мощности и планарной направленности излучения [1,2]. Лазерное излучение может быть выведено в близко расположенный волновод с помощью затухающей электромагнитной волны [3].

В то же время технология изготовления таких лазеров весьма сложна, так как включает в себя электронную литографию. Кроме того, характеристики лазеров обычно ухудшаются по мере уменьшения их размеров. В частности, наименьший диаметр микрорезонатора на основе квантовых точек с кольцевой оптической модой, для которого ранее сообщалось о достижении лазер-

ной генерации при комнатной температуре, составляет 4.5 мкм [4–6]. Недавно в работе [7] нами была реализована лазерная генерация в кольцевом микролазере с внешним диаметром 6 мкм вплоть до 380 К на длине волны > 1.3 мкм при оптической накачке. В данной работе мы провели исследование спектров лазерной генерации микрокольцевых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне около 1.3 мкм, в зависимости от их геометрических параметров. Впервые в кольцевом микролазере с внешним диаметром 2.7 мкм получена лазерная генерация при комнатной температуре.

2. Эксперимент

Гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Ribier 49 с твердотельным источником As на полуизолирующей подложке GaAs (100). После осаждения буферного слоя GaAs выращивался слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ толщиной 400 нм. Активная область помещалась в волновод GaAs (220 нм) и представляла собой 5 слоев самоорганизующихся квантовых точек InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As, разделенных спейсерами GaAs толщиной 30 нм (рис. 1, a). Микрокольцевые резонаторы были сформированы методом фотолитографии и ионно-лучевого травления (Ar^+). Внешний диаметр (D) варьировался от 7 до 2.7 мкм, внутренний диаметр микрокольцевых резонаторов (d) варьировался в диапазоне $d = (0-0.8)D$. Далее методом селективного окисления слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ преобразовывался в слой

[¶] E-mail: kryj@mail.ioffe.ru

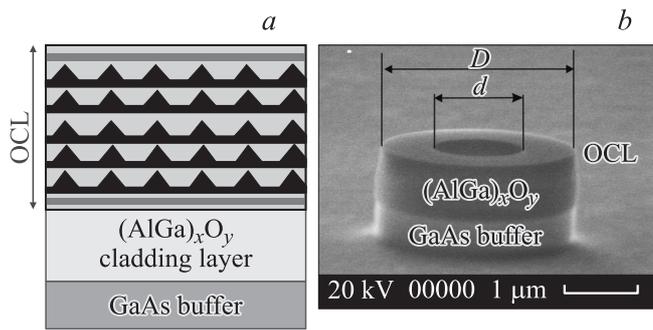


Рис. 1. Схематическое изображение слоев эпитаксиальной гетероструктуры (a) и СЭМ-изображение микрокольцевого лазера с $D = 2.7$ мкм, $d = 1.2$ мкм (b). OCL — optical confinement layer.

$(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ для формирования оптического ограничения со стороны подложки. Изображение микрокольцевого резонатора с внешним диаметром $D = 2.7$ мкм и внутренним диаметром $d = 1.2$ мкм, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), приведено на рис. 1, b.

Оптическая накачка осуществлялась с помощью YAG:Nd-лазера, работающего на второй гармонике в непрерывном режиме (длина волны $\lambda = 532$ нм, мощность 10–200 мВт). Лазерный луч фокусировался с помощью объектива Olympus LMPlan IR 100 NA 0.8 на поверхность микролазера. Этот же объектив использовался для сбора сигнала. Детектирование сигнала проводилось с помощью монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого InGaAs-фотодетектора Horiba Symphony (разрешение 0.05 нм). Картины ближнепольной оптической микроскопии снимались при возбуждении Ar⁺-лазером (длина волны 488 нм, мощность 10–100 мкВт). Детектирование и возбуждение сигнала проводились при помощи одного и того же оптического волокна с пространственным разрешением 300 нм.

3. Основная часть

Для исследования возможности уменьшения геометрических размеров микрокольцевых лазеров мы провели сравнение пороговых значений мощности оптической накачки (P_{th}) при комнатной температуре для резонаторов с различными внутренними и внешними диаметрами. На рис. 2, a представлена зависимость пороговой мощности оптической накачки от внешнего диаметра резонатора. Наименьшее значение $P_{\text{th}} = 0.37$ мВт получено для микрокольцевого резонатора с диаметром 6 мкм. В микрорезонаторах данного размера получено наибольшее значение добротности, $Q = \lambda/\Delta\lambda = 22\,000$, что близко к предельному значению, которое может быть измерено с учетом спектрального разрешения используемой оптической системы.

При уменьшении внешнего диаметра резонатора до размеров < 6 мкм происходит существенное возрастание значения пороговой мощности оптической накачки, связанное, вероятно, с усилением влияния дефектов границ. При увеличении диаметра микрокольца выше 6–7 мкм наблюдается незначительное возрастание пороговой мощности.

На рис. 2, b представлена зависимость пороговой мощности оптической накачки от соотношения внутреннего и внешнего диаметров для резонатора с внешним диаметром 7 мкм. Значение пороговой мощности оптической накачки уменьшается примерно на 30–40% при увеличении внутреннего диаметра микрокольца от 0 (случай микродискового резонатора) до $(0.3–0.6)D$.

Нами было исследовано пространственное распределение оптического поля внутри резонаторов методом ближнепольной оптической микроскопии. На рис. 3 представлена картина поля, полученная для микрокольцевого лазера с внешним диаметром $D = 6$ мкм и внутренним диаметром $d = 3.4$ мкм на резонансной линии $\lambda = 1279.8$ нм. Максимумы интенсивности расположены по окружности и прижаты к внешней границе резонатора.

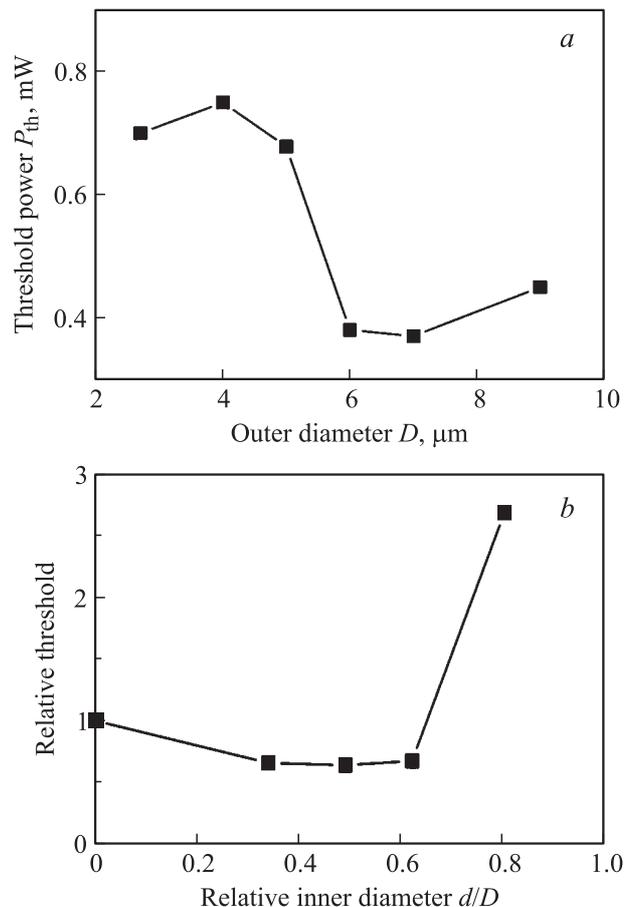


Рис. 2. Зависимость пороговой мощности от внешнего диаметра резонатора (a) и зависимость пороговой мощности от соотношения внутреннего и внешнего диаметров для резонатора с внешним диаметром 7 мкм (b).

натора. Таким образом, отсутствие материала внутри кольцевого резонатора слабо влияет на моду лазерной генерации резонатора. В то же время отсутствие материала в центре микрорезонатора приводит к подавлению мод более высокого порядка, максимумы интенсивности которых расположены ближе к центру резонатора, и, кроме того, в случае реализации токовой инжекции облегчает достижение инверсии.

При дальнейшем увеличении внутреннего диаметра до $0.8D$ (для случая микрорезонатора с $D = 7$ мкм, $d = 5.6$ мкм, ширина кольца 0.7 мкм) наблюдается резкое возрастание пороговой мощности оптической накачки, что мы связываем с увеличением безызлучательной рекомбинации на границах микрорезонатора.

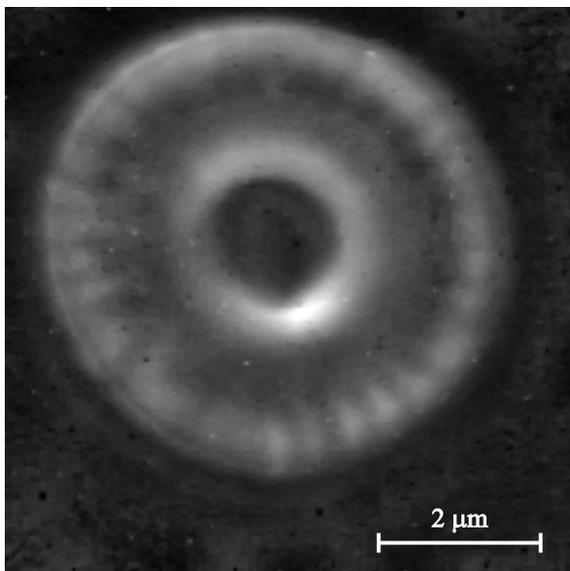


Рис. 3. Картина ближнепольной оптической микроскопии для микрокольцевого лазера с внешним диаметром $D = 6$ мкм на резонансной линии $\lambda = 1279.8$ нм.

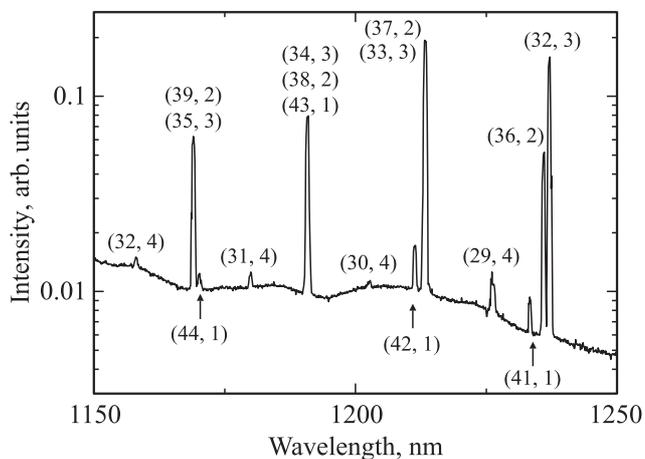


Рис. 4. Спектр излучения микрокольцевого резонатора ($D = 6$ мкм, $d = 2$ мкм) при температуре 78 К.

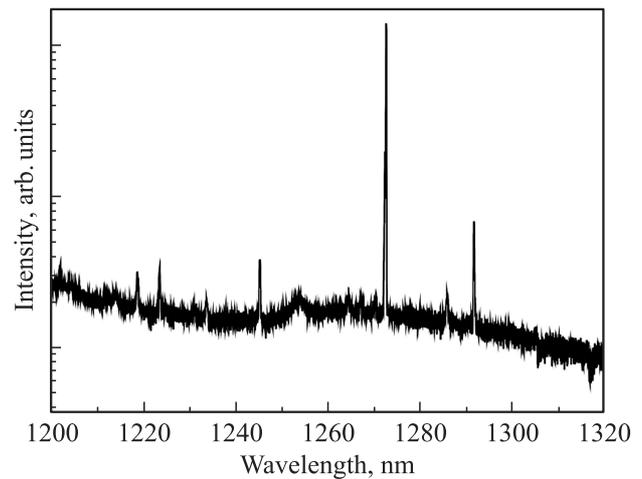


Рис. 5. Спектр микрофотолюминесценции микрокольцевого лазера ($D = 2.7$ мкм, $d = 1.2$ мкм) при комнатной температуре.

На рис. 4 представлен пример спектра излучения при температуре 78 К для микрокольцевого лазера с диаметрами $D = 6$ мкм, $d = 2$ мкм. Идентификация мод резонатора $TE_{m,n}$ была проведена с помощью двумерного моделирования с эффективным показателем преломления. На рисунке приведены полученные индексы $TE_{m,n}$, где m — азимутальное модовое число, определяющее количество узлов поля, укладывающегося на половине окружности в поперечном сечении резонатора, n — радиальное модовое число, показывающее число пучностей поля вдоль радиуса диска. В спектре наблюдаются четыре серии мод различного радиального порядка, многие из которых накладываются друг на друга. При этом доминирующими по интенсивности являются моды 2-го и 3-го порядков. Близкое спектральное расположение мод может привести к многомодовой генерации. Кроме того, наложение мод неприемлемо для использования в системах со спектральным уплотнением, в которых требуется малая эффективная ширина линии излучения.

Увеличения межмодового интервала можно достичь путем уменьшения диаметра резонатора. Нами был изготовлен микрокольцевой лазер с внешним диаметром $D = 2.7$ мкм и внутренним диаметром $d = 1.2$ мкм. Спектр микрофотолюминесценции, полученный вблизи порога лазерной генерации при комнатной температуре, представлен на рис. 5. Значение ширины на половине интенсивности линии 1272 нм вблизи порога генерации составляет 0.06 нм, добротность резонатора 19 000. Высокое значение межмодового интервала (50 нм) позволило реализовать квазиодномодовую генерацию в диапазоне температур от 80 до 300 К. Величина пороговой мощности оптической накачки P_{th} для доминирующей линии 1272 нм составляет 0.7 мВт. Коэффициент подавления боковых мод при мощности оптической накачки $P = 1.5P_{th}$ составляет 15 дБ.

4. Заключение

За счет уменьшения внешнего диаметра микрокольцевого лазера с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs до $D = 2.7$ мкм получена квазиодно-модовая лазерная генерация на длине волны 1.27 мкм при оптической накачке. Отсутствие материала в центре микрокольцевого резонатора не приводит к ухудшению характеристик излучения по сравнению с микродисковым резонатором.

Работа проведена при поддержке Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, РФФИ, Программ фундаментальных исследований президиума РАН и ОНИТ РАН.

Список литературы

- [1] A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.L. McCall, T. Tanbuk-Ek, D.L. Coblentz, S.J. Perton. *Electron. Lett.*, **28**, 1010 (1992).
- [2] T. Baba, D. Sano. *IEEE J. Select. Top. Quant. Electron.*, **9**, 1340 (2003).
- [3] S. Koseki, B. Zhang, K.D. Greve, Y. Yamamoto. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 051110 (2009).
- [4] T. Ide, T. Baba, J. Tatebayashi, S. Iwamoto, T. Nakaoka, Y. Arakawa. *Opt. Express*, **13** (5), 1615 (2005).
- [5] K. Srinivasan, M. Borselli, Th.J. Johnson, P.E. Barclay, O. Painter, A. Stintz, S. Krishna. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 151106 (2005).
- [6] M.-H. Mao, H.-Ch. Chien, J.-Z. Hong, Ch.-Y. Cheng. *Opt. Express*, **19** (15), 14145 (2011).
- [7] Н.В. Крыжановская, А.Е. Жуков, А.М. Надточий, И.А. Словинский, М.В. Максимов, М.М. Кулагина, А.В. Савельев, Е.М. Аракчеева, Ю.М. Задиранов, С.И. Трошков, А.А. Липовский. *ФТП*, **46** (8), 1063 (2012).

Редактор Л.В. Шаронова

Room temperature lasing in microring laser with InAs/InGaAs quantum dots active region

N.V. Kryzhanovskaya^{+‡•}, *A.E. Zhukov*^{+‡•},
A.M. Nadtochy^{+‡•}, *M.V. Maximov*^{•++}, *E.I. Moiseev*^{‡++},
M.M. Kulagina[•], *A.V. Savelev*^{+‡}, *E.M. Arakcheeva*^{+•},
A.A. Lipovskii^{‡++}, *F.I. Zubov*^{+‡}, *A. Kapsalis*^{*},
C. Mesaritakis^{*}, *D. Syvridis*^{*}, *A. Mintairov*[#],
D. Livshits[‡]

⁺ St. Petersburg Academic University —
 Nanotechnology Center for Research and Education,
 Russian Academy of Sciences,
 194021 St. Petersburg, Russia

[‡] St. Petersburg State Polytechnical University,
 195221 St. Petersburg, Russia

[•] Ioffe Physicotechnical Institute,
 Russian Academy of Sciences,
 194021 St. Petersburg, Russia

^{*} University of Athens,
 Athens, Greece 15784

[#] University of Notre Dame,
 275 Fitzpatrick Hall, Notre Dame, IN 46556, USA

[‡] Innolume GmbH,

44263 Dortmund, Deutschland

Abstract Microring resonators with 2.7–7 μm diameter and with active region based on InAs/InGaAs quantum dots are fabricated and studied by microphotoluminescence spectroscopy and near-field photoluminescence spectroscopy. Quality factor 22 000 is obtained for microring laser with 6 μm diameter. Lasing in microring laser with diameter 2.7 μm under optical excitation at room temperatures is achieved.