

Высокотемпературная лазерная генерация в микрокольцевом лазере с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs

© 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^{†*}

[†] 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

(Получена 26 января 2012 г. Принята к печати 1 февраля 2012 г.)

В кольцевом микролазере диаметром 6 мкм с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs при оптической накачке достигнута лазерная генерация вплоть до 380 К на длине волны > 1.3 мкм.

1. Введение

К настоящему времени на основе микрокольцевых резонаторов созданы различные пассивные компоненты для кремниевых интегральных оптических схем: модуляторы [1], переключатели [2], элементы памяти [3], фильтры [4] и т.д. Ведутся разработки и активных элементов на основе микрокольцевых резонаторов — лазеров на гетероструктурах $A^{III}B^V$. Преимуществом таких лазеров является их малая площадь, а высокая добротность и малый объем мод микрокольцевого резонатора должны обеспечить низкие значения порога лазерной генерации. В существующих технологиях создания микрокольцевых лазеров в качестве активной области используются в основном квантовые ямы на основе InGaAsP–InGaAs–InP [5]. В дальнейшем гетероструктура $A^{III}B^V$ может быть перенесена на подложку Si/SiO₂ с помощью технологии „wafer bonding“ [6]. Низкая скорость поверхностной рекомбинации этой материальной системы является ее несомненным преимуществом для использования в микрокольцевых лазерах, в которых ширина волновода может составлять < 2 мкм. Однако тот факт, что усиление в данной материальной системе сильно зависит от температуры, приводит к сильному возрастанию порогового тока лазера при увеличении температуры. Кроме того, размер внешнего диаметра кольцевого лазера достаточно велик (наименьшее общепринятое значение 15 мкм [7]), что усложняет компоновку элементов электронно-фотонной микросхемы, а также затрудняет достижение одночастотного режима генерации.

Использование квантовых точек (КТ) в качестве активной области полупроводниковых лазеров имеет следующие преимущества по сравнению с квантовыми ямами: низкая плотность порогового тока (10.4 А/см² в торцевых лазерах при комнатной температуре [8]), широкие спектры усиления и генерации (получена ширина

спектра генерации 75 нм [9]) и подавление поверхностной рекомбинации носителей на стенках травления [10]. Тем не менее с использованием КТ InAs/InGaAs/GaAs к настоящему времени были получены лишь большие (миллиметрового размера) кольцевые лазеры [11]. На основе КТ InAs–InP были созданы лазеры, работающие при температурах лишь до 283 К, минимальный диаметр 22 мкм [12].

В данной работе нами представлены кольцевые лазеры с внешним диаметром 6 мкм и активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs, излучающих в области 1.3 мкм. Проведено сравнение спектров излучения микрокольцевого лазера в зависимости от его геометрических параметров и от температуры наблюдения. При оптической накачке получена лазерная генерация на кольцевой моде резонатора вплоть до 107°С.

2. Эксперимент

Исследуемая гетероструктура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 49 с твердотельным источником As на полуизолирующей подложке GaAs (100). Ранее нами была разработана технология создания микродискового лазера на подложке GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs, основанная на использовании оксидного пьедестала $(AlGa)_xO_y$, который обеспечивал оптическое ограничение со стороны подложки, повышенную механическую прочность и высокий коэффициент теплопроводности [13]. В данной работе мы распространили эту технологию на создание микрокольцевых лазеров. Преимуществом микрокольцевого резонатора по сравнению с микродисковым является отсутствие в нем центральной области, что должно привести к увеличению концентрации носителей заряда при фиксированной накачке. Кроме того, проявляется пространство для размещения дополнительного управляющего электрода.

Слой Al_{0.98}Ga_{0.02}As толщиной 400 нм, предназначенный для формирования оксидного пьедестала, выращи-

[†] E-mail: kryj@mail.ioffe.ru

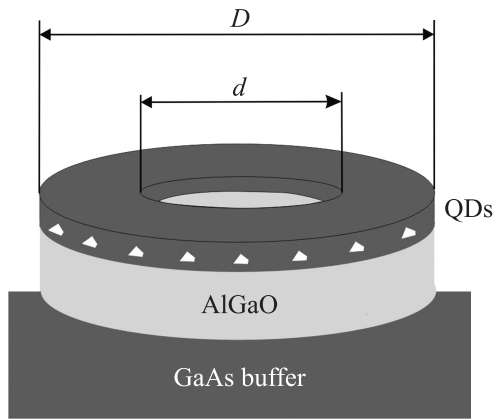


Рис. 1. Схематическое изображение микрокольцевого лазера на пьедестале $(AlGa)_xO_y$.

вался после осаждения буферного слоя GaAs. Активная область помещалась в волновод GaAs (220 нм) и представляла собой 5 слоев массивов самоорганизующихся КТ $InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As$, разделенных слоями GaAs толщиной 50 нм. Для предотвращения утечки неравновесных носителей из активной области при проведении оптических исследований она ограничивалась с обеих сторон барьерами $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ толщиной 20 нм.

Микрокольца (MR) и микродиски (MD) были сформированы методом фотолитографии и ионно-лучевого травления (Ag^+). Высота полученных мез составила 0.7 мкм, внешний диаметр $D = 6$ мкм, внутренний диаметр микрокольца $d = 2$ мкм, соответственно ширина гребешкового волновода составила 2 мкм. Схематическое изображение микрокольцевого лазера представлено на рис. 1. Для преобразования слоя $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ в слой $(AlGa)_xO_y$ был использован метод селективного окисления.

Оптическая накачка осуществлялась с помощью YAG:Nd-лазера, работающего на второй гармонике в непрерывном режиме (длина волны 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 от микрорезонатора. Для исследований в температурном диапазоне 78–300 К образцы помещались в криостат проточного типа Oxford Microstat. Для исследований выше комнатной температуры структуры монтировались с помощью теплопроводящей пасты на нагреваемый держатель, температура которого регулировалась с помощью контроллера TPM10. Детектирование сигнала производилось по стандартной схеме синхронного детектирования с помощью монохроматора Spectral Products DK480 и одноканального охлаждаемого Ge-pin-фотодетектора.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены полученные при комнатной температуре спектры излучения микродискового и микрокольцевого лазеров при величине мощности оптической накачки, превышающей пороговое значение в 5 раз ($5P_{th}$). Также приведены изображения микрокольца и микродиска, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии. В обоих спектрах наблюдается узкая линия, соответствующая лазерной генерации на одной из мод резонатора. В спектре также наблюдается периодическая модуляция интенсивности спонтанного излучения, наиболее выраженная в случае микродиска. Расстояние между максимумами этой модуляции, равное 30 нм в микрорезонаторах диаметром $D = 6$ мкм, соответствует межмодовому интервалу резонатора (free spectral range, FSR), который может быть оценен с помощью известного выражения:

$$FSR = \lambda^2 / \pi D n_{eff},$$

где λ — центральная длина волны (~ 1.3 мкм), n_{eff} — эффективный показатель преломления, $n_{eff} \approx 3$.

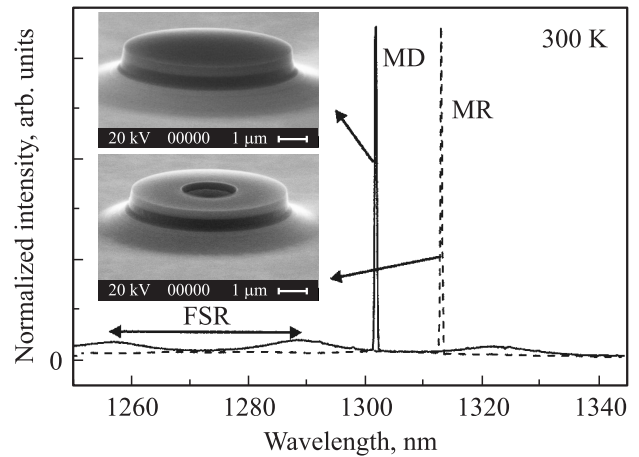


Рис. 2. Спектры излучения и изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, микродискового и микрокольцевого лазеров.

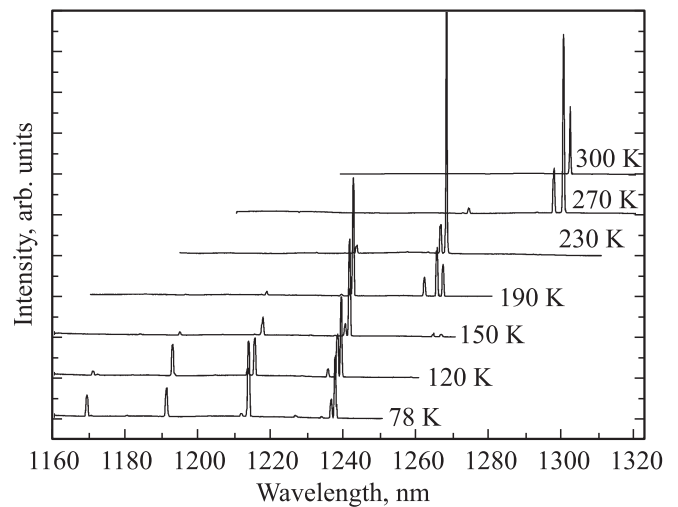


Рис. 3. Спектры излучения микрокольцевого лазера в диапазоне температур от 78 до 300 К. Спектры смещены в вертикальном направлении для наглядности.

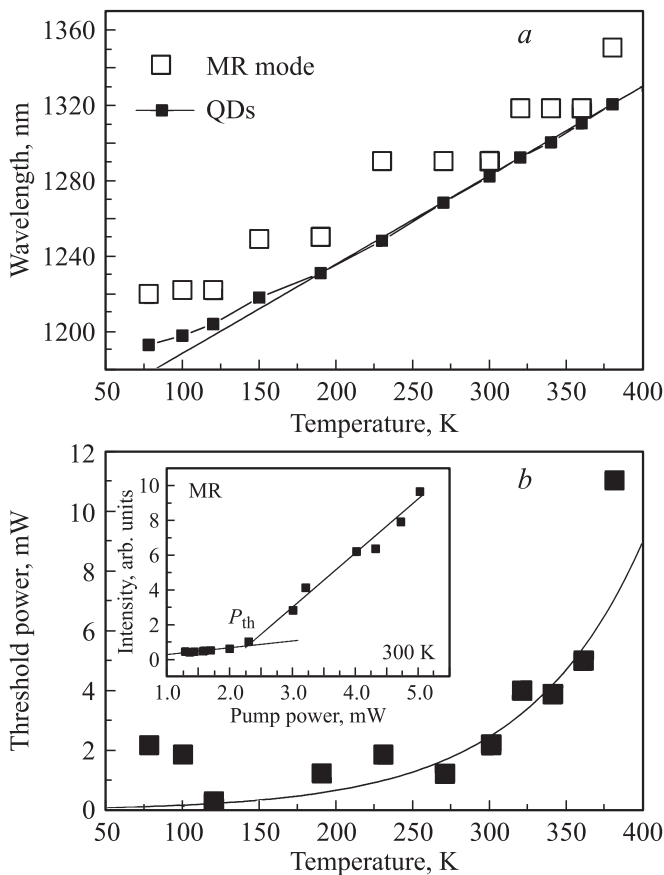


Рис. 4. Температурные зависимости длины волны лазерных мод микрокольцевого лазера и максимума спектра фотолюминесценции квантовых точек (QDs) (а), пороговой мощности генерации (б). На вставке (б) — зависимость интенсивности моды микрокольцевого резонатора от мощности оптической накачки при 300 К.

Лазерная генерация микрокольцевого лазера была исследована в широком диапазоне температур от 78 до 380 К. На рис. 3 представлены его спектры излучения при оптической накачке на уровне $5P_{th}$ в области температур до 300 К. В спектрах наблюдаются узкие линии, соответствующие модам резонатора различных радиальных и азимутальных порядков.

На рис. 4,а показана температурная зависимость длины волны лазерных мод. Также на рисунке приведено спектральное положение максимума фотолюминесценции КТ, измеренное с поверхности структуры, на которой не были сформированы микрорезонаторы. По мере увеличения температуры наблюдается незначительный сдвиг (~ 0.05 нм/К) спектрального положения мод, связанный с температурной зависимостью показателя преломления, в то время как максимум спектра фотолюминесценции массива КТ сдвигается с температурой существенно сильнее (~ 0.47 нм/К). Это вызывает значительное смещение положения максимума спектра усиления КТ относительно спектрального положения мод и приводит к многочисленным перескокам длины

волны генерации на более длинноволновые моды резонатора по мере роста температуры.

Наибольший практический интерес представляют исследования характеристик микрокольцевых лазеров при температурах выше комнатной, так как температура работы современных кремниевых чипов достигает 85°C (365 К). Отметим, что во всем диапазоне температур выше комнатной длина волны генерации исследуемого микрокольцевого лазера (1.29–1.35 мкм) попадает в так называемый Q -диапазон волоконно-оптической связи (1.26–1.36 мкм), который характеризуется малым затуханием излучения (~ 0.35 дБ/км), а также близкой к нулю хроматической дисперсией в стандартном одномодовом волокне.

Для наиболее интенсивных мод резонатора были получены пороговые характеристики при различных температурах. На вставке к рис. 4,б показан пример (при 300 К) зависимости интенсивности выходного излучения моды от мощности оптической накачки. Зависимость имеет пороговый характер, означающий переход в режим лазерной генерации. Зависимость пороговой мощности генерации от температуры представлена на рис. 4,б. Пороговая мощность составила 2.2 и 5 мВт при 27 и 87°C соответственно. В температурном диапазоне от 120 до 360 К пороговая мощность возрастает с температурой приблизительно экспоненциально. Некоторый разброс полученных значений определяется, вероятно, обсуждавшимся изменением с температурой величины спектрального перекрытия максимума спектра усиления КТ и положения моды резонатора. Полученные значения пороговой мощности кольцевого лазера не превышают значений пороговой мощности микродискового лазера.

Характеристическая температура T_0 , которая может быть оценена из экспериментальных данных этого температурного диапазона с помощью зависимости вида $P_{th}(T) \propto \exp(T/T_0)$, составила 77 К. Наибольшая температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила 380 К (107°C), что, насколько нам известно, является рекордно высоким значением для микрокольцевых лазеров на основе КТ спектрального диапазона 1.3 мкм. Пороговая мощность накачки при этом равна 11 мВт. Наименьшее значение пороговой мощности накачки составило 0.3 мВт при 120 К. Следует отметить, что в диапазоне температур от 78 до 120 К наблюдается уменьшение пороговой мощности накачки. Подобное поведение (отрицательная характеристическая температура) впервые наблюдалось в температурной зависимости порогового тока лазеров на основе КТ полосковой конструкции и было приписано переходу от неравновесного к равновесному распределению носителей заряда по неоднородно-уширенной плотности состояний массива КТ [14].

4. Заключение

Получена лазерная генерация на длине волны свыше 1.3 мкм в микрокольцевом микролазере диаметром

бмкм с активной областью на основе квантовых точек InAs/InGaAs при оптической накачке. Наибольшая температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила 380 К.

Работа проведена при поддержке Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы (контракты № 16.740.11.0458, 14.740.11.1008), гранта РФФИ 11-02-12056-офи-м-2011, программ фундаментальных исследований президиума РАН и ОНИТ РАН.

Список литературы

- [1] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, M. Lipson. *Nature*, **435**, 325 (2007).
- [2] A.W. Poon, X.S. Luo, F. Xu, H. Chen. *Proc. IEEE*, **97**, 1216 (2009).
- [3] M.T. Hill, H.J.S. Dorren, T. de Vries, X.J.M. Leijtens, J.H. den Besten, B. Smalbrugge, Y.-S. Oei, H. Binsma, G.-D. Khoe, M.K. Smit. *Nature*, **432**, 206 (2004).
- [4] D. Hah, J. Bordelon, D. Zhang. *Appl. Optics*, **50**, 4320 (2011).
- [5] D. Liang, M. Fiorentino, S. Srinivasan, J.E. Bowers, R.G. Beausoleil. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **17**, 1528 (2011).
- [6] D. Liang, J.E. Bowers. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **26**, 1560 (2008).
- [7] Di Liang, M. Fiorentino, R.G. Beusoleil, J.E. Bowers. *IEEE/LEOS Winter Topical Meeting* (2010) p. 131.
- [8] D.G. Deppe, K. Shavritranuruk, G. Ozgur, H. Chen, S. Freisem. *Electron. Lett.*, **45**, 54 (2009).
- [9] A. Kovsh, I. Krestnikov, D. Livshits, S. Mikhlin, J. Weimert, A. Zhukov. *Optics Lett.*, **32**, 793 (2007).
- [10] D. Ouyang, N.N. Ledentsov, D. Bimberg, A.R. Kovsh, A.E. Zhukov, S.S. Mikhlin, V.M. Ustinov. *Semicond. Sci. Technol.*, **18**, L53 (2003).
- [11] H. Cao, H. Deng, H. Ling, C. Liu, V.A. Smagley, R.B. Caldwell, G.A. Smolyakov. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 203 117 (2005).
- [12] M.T. Hill, S. Anantathanasarn, Y. Zhu, Y.S. Oei, P.J. van Veldhoven, M.K. Smit, R. Notzel. *IEEE Phot. Technol. Lett.*, **20**, 446 (2008).
- [13] С.А. Блохин, Н.В. Крыжановская, А.Г. Гладышев, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Е.М. Аракчеева, Е.М. Танклевская, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, Е.С. Семенова, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Э. Шток, Д. Бимберг. *ФТП*, **40**, 482 (2006).
- [14] A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, A.R. Kovsh, A.F. Tsatsul'nikov, N.N. Ledentsov, S.V. Zaitsev, N.Yu. Gordeev, P.S. Kor'ev, Zh.I. Alferov. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (6B), 4216 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

High-temperature lasing in microring laser with active region based on InAs/InGaAs quantum dots

N.V. Kryzhanovskaya^{+*≠}, *A.E. Zhukov*^{+*≠},
A.M. Nadtochy^{+≠}, *I.A. Slovinsky*^{+≠}, *M.V. Maximov*^{+≠},
M.M. Kulagina[≠], *A.V. Savelev*^{+*}, *E.M. Arakcheeva*⁺,
Yu.M. Zadiranov[≠], *S.I. Troshkov*[≠], *A.A. Lipovskii*^{+*}

⁺ 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

Abstract In microring laser with 6 μm diameter and active region based on InAs/InGaAs quantum dots lasing under optical excitation at temperatures up to 380 K with wavelengths above 1.3 μm was achieved.