

Лазерная генерация на длине волны 1.3 мкм при комнатной температуре в микродиске с квантовыми точками

© Н.В. Крыжановская[¶], С.А. Блохин, 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⁺

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

⁺ Institut für Festkörperphysik, Technische Universität, D-10623 Berlin, Germany

(Получена 29 декабря 2005 г. Принята к печати 16 января 2006 г.)

Исследованы температурные зависимости лазерных характеристик GaAs/(AlGa)_xO_y-микродиска диаметром 6 мкм, изготовленного при помощи оптической литографии, сухого травления пучком ионов Ar⁺ и селективного окисления Al_{0.97}Ga_{0.03}As-слоя, формирующего основание микродиска. В качестве активной области микродиска использовались InAs/InGaAs-квантовые точки. Продемонстрирована лазерная генерация в области 1.3 мкм при комнатной температуре с пороговой мощностью оптической накачки 180 мкВт. Добротность мод микродиска составляет около 10⁴.

PACS: 42.55.Sa, 73.63.Kv, 78.67.Hc

1. Введение

Интерес к исследованию оптических микродисковых резонаторов обусловлен возможностью создания на их основе маломощных и высокоскоростных оптоэлектронных устройств. В микродисковых резонаторах благодаря эффекту полного внутреннего отражения возникают моды „шепчущей галереи“, распространяющиеся вдоль периферии диска [1]. Высокая добротность и малый эффективный объем мод шепчущей галереи позволяют получить малые пороговые токи лазерной генерации, а также увеличение скорости излучательной рекомбинации на резонансных частотах (эффект Пурселя) [2,3]. С точки зрения приборных приложений микродиски с активной областью на основе квантовых точек открывают возможности для создания источников одиночных фотонов и других устройств, основанных на принципах квантовой электродинамики.

Традиционные микродисковые лазеры представляют собой диск диаметром 2–7 мкм, расположенный на пьедестале, диаметр которого существенно меньше, чем диаметр микродиска. Для их изготовления используется электронно-лучевая литография и двухступенчатое селективное травление. Микродиски такой конструкции продемонстрировали высокую добротность мод $Q \approx 17\,000$ [4] и рекордное 12-кратное увеличение скорости излучательной рекомбинации [5]. В то же время такие приборы обладают существенными недостатками: низкой механической стабильностью и малой эффективностью отвода тепла от активной области. Более перспективной представляется конструкция, в которой микродиск расположен на широком (AlGa)_xO_y пьедестале, полученном методом селективного окисления AlGaAs-слоя высокого состава по алюминию, что

обеспечивает высокую механическую стабильность и теплопроводность [6].

Нами исследованы температурные зависимости лазерных характеристик микродисков, в которых в качестве активной области использовались InAs/InGaAs-квантовые точки. Микродиски были получены с помощью метода оптической литографии, сухого травления пучком ионов Ar⁺ и селективного окисления. Показано, что качество микродисков, полученных при помощи данной технологии, позволяет получить лазерную генерацию в области 1.3 мкм при комнатной температуре от одиночного микродиска.

2. Эксперимент

Структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии в установке Riber 32 с твердотельным источником As на полуизолирующих подложках GaAs (100). После осаждения буферного слоя GaAs выращивался слой Al_{0.97}Ga_{0.03}As толщиной 500 нм для формирования основания микродиска. Активная область помещалась в волновод GaAs толщиной 190 нм и представляла собой массив самоорганизующихся InAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As-квантовых точек, излучающих при комнатной температуре на длине волны 1.3 мкм [7]. Для предотвращения утечки неравновесных носителей волновод ограничивался с обеих сторон барьерами Al_{0.3}Ga_{0.7}As, толщины которых составили 20 нм.

Для обеспечения вертикального ограничения оптического поля в микродисках проводилось латеральное селективное окисление слоя Al_{0.97}Ga_{0.03}As. Так как показатель преломления получающегося оксидного слоя (AlGa)_xO_y существенно меньше (~ 1.55), чем показатель преломления GaAs (~ 3.5), в направлении

[¶] E-mail: kryj@mail.ioffe.ru

роста структуры формировался эффективный волновод воздух/GaAs/(AlGa)_xO_y. Оптическое ограничение с остальных сторон диска обеспечивалось за счет скачка показателя преломления на границе полупроводник GaAs/воздух.

Применявшаяся методика изготовления микродисков с помощью оптической литографии, сухого травления в пучке ионов Ar⁺ и селективного окисления детально описана в работе [8]. В данной работе исследовались микродиски диаметром 6 мкм с глубиной травления порядка 0.7 мкм. Оптическая накачка микродисков осуществлялась с помощью YAG:Nd-лазера, работающего на второй гармонике в непрерывном режиме ($\lambda = 532$ нм, $P = 3.3\text{--}470$ мВт). Лазерный луч фокусировался на одиночный микродиск с помощью объектива Olympus Plan View IR 100 с численной апертурой 0.85. Этот же объектив использовался и для сбора излучения от микродиска. С учетом того, что часть лазерного излучения отражается на верхнем (воздух–полупроводник) и нижнем (полупроводник–оксид) интерфейсах микродиска, мощность, поглощенная в микродиске (P_{eff}), составляет около 65% от полной мощности лазерного луча [8]. Для исследований в температурном диапазоне 5–300 К образцы помещались в гелиевый криостат проточного типа Oxford Microstat. Детектирование сигнала производилось с помощью охлаждаемой Si-CCD камеры (100 × 1340 пикселей) со спектральным разрешением 1 Å и охлаждаемого InGaAs-детектора Roper Scientific (1024 пикселей), спектральное разрешение 0.3 Å.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции (ФЛ) микродиска диаметром 6 мкм, а также исходной структуры с InAs/InGaAs-квантовыми точками при температуре 5 К. На вставке к рис. 1 приведено изображение одиночного микродиска, полученное с помощью растровой электронной микроскопии. Спектр ФЛ InAs/InGaAs-квантовых точек неоднородно уширен вследствие разброса квантовых точек по размеру, его полуширина составляет 30 мэВ. На спектре ФЛ, полученном от микродиска, наблюдаются узкие линии, соответствующие модам резонатора (моды „шепчущей галереи“).

На рис. 2, а представлены спектры, полученные при различных плотностях накачки и температуре 5 К от одиночного микродиска диаметром 6 мкм. С увеличением плотности накачки происходит уменьшение ширины линии и переход к сверхлинейному росту интенсивности, что соответствует режиму лазерной генерации (рис. 2, б). Величина пороговой мощности накачки P_{eff} для резонансной моды А составляет около 40 мВт. Добротность этой резонансной моды, определенная как $Q = \lambda/\Delta\lambda$, равна 9900. Мы полагаем, что основным фактором, ограничивающим добротность, в данном слу-

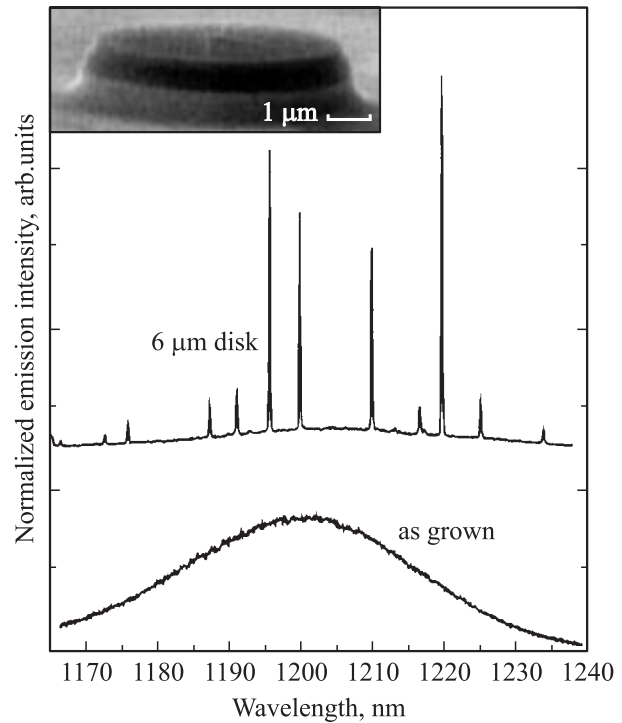


Рис. 1. Спектры излучения микродиска диаметром 6 мкм и исходной структуры с квантовыми точками, полученные при температуре измерения 5 К. На вставке приведено изображение данного микродиска, полученное с помощью растровой электронной микроскопии.

чае является рассеяние на шероховатостях поверхности микродиска.

На рис. 3 представлены спектры микродиска и исходной эпитаксиальной структуры с квантовыми точками, полученные при температурах 5, 100, 200 и 300 К. Температурный сдвиг спектрального положения резонансной линии микродиска обусловлен температурным изменением его эффективного показателя преломления и для линии А составляет ~ 0.05 нм/К. В то же время температурный сдвиг положения линии излучения основного состояния квантовых точек обусловлен изменением ширины запрещенной зоны InAs и составляет ~ 0.3 нм/К. Таким образом, с увеличением температуры происходит рассогласование положения максимума спектра усиления основного состояния квантовых точек и положения линии А.

Лазерная генерация на резонансной линии А сохраняется вплоть до 280 К (рис. 4), причем при температурах выше 180–200 К генерация осуществляется через возбужденное состояние квантовых точек. Значение пороговой мощности слабо изменяется с увеличением температуры до 180 К, а затем увеличивается с наклоном, описываемым характеристической температурой $T_0 = 65$ К ($P_{\text{th}} \propto \exp(T/T_0)$). Увеличение пороговой мощности с ростом температуры объясняется двумя причинами. Первой причиной является температурный

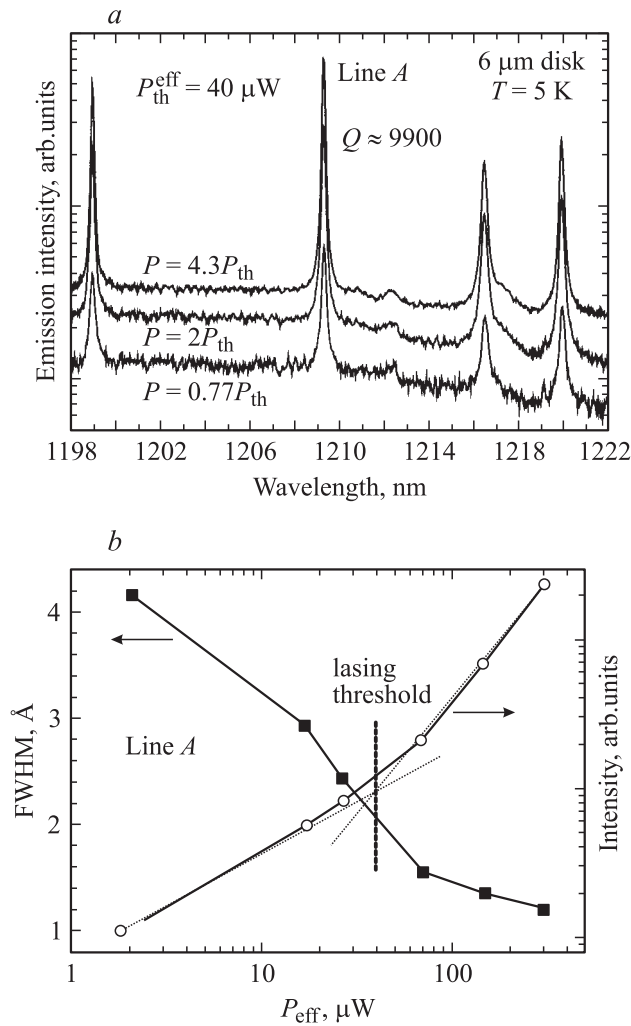


Рис. 2. *a* — спектры излучения, полученные от микродиска диаметром 6 мкм при различных уровнях накачки и температуре 5 К. *b* — зависимость интенсивности и ширины линии *A* от мощности накачки.

выброс носителей из квантовых точек и последующая излучательная или безызлучательная рекомбинация в матрице GaAs, а также на границах микродиска. Второй причиной увеличения пороговой мощности с ростом температуры является большое различие температурных сдвигов спектрального положения резонансной линии микродиска и положения линии излучения основного состояния квантовых точек. При низких температурах ($T < 160$ К) линия *A* находится в пределах спектра усиления основного состояния квантовых точек и температурный выброс носителей из точек мал, что обуславливает высокое значение характеристической температуры пороговой мощности накачки $T_0 = 400$ К.

При комнатной температуре лазерная генерация наблюдается на резонансной линии *B* с длиной волны 1293 нм (рис. 5, *a*). На рис. 5, *b* приведены зависимости интенсивности и ширины резонансной линии *B* от мощности оптической накачки, из которых можно оценить ее

пороговое значение. Так как положение резонансной линии *B* близко к максимуму спектра фотолюминесценции квантовых точек при комнатной температуре, полученное значение пороговой мощности накачки (~ 180 мкВт)

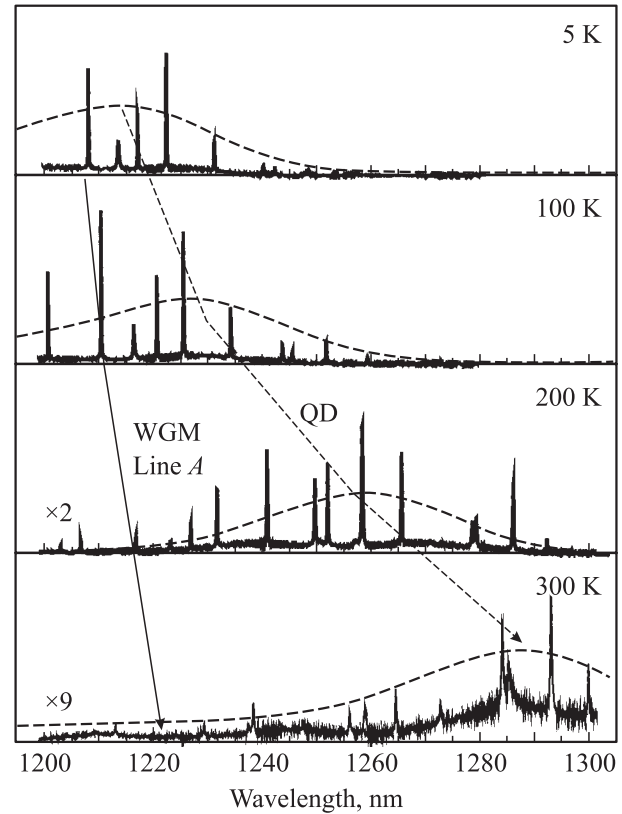


Рис. 3. Спектры излучения микродиска диаметром 6 мкм (сплошные линии) и исходной эпитаксиальной структуры с квантовыми точками (пунктир), полученные в широком спектральном диапазоне при различных температурах при мощности накачки $P = 470$ мкВт.

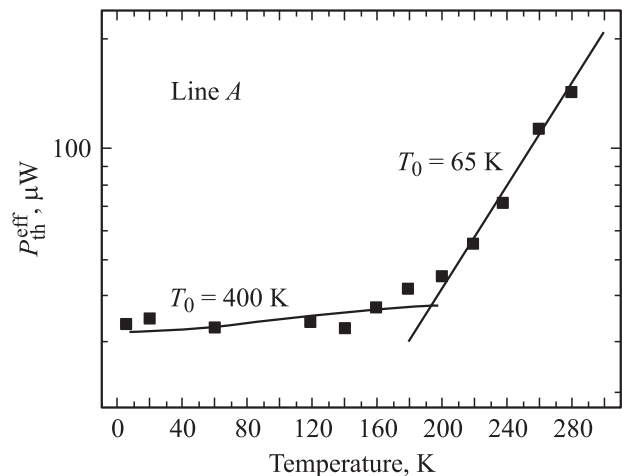


Рис. 4. Зависимости пороговой мощности генерации от температуры для резонансной моды микродиска диаметром 6 мкм с InAs/InGaAs-квантовыми точками.

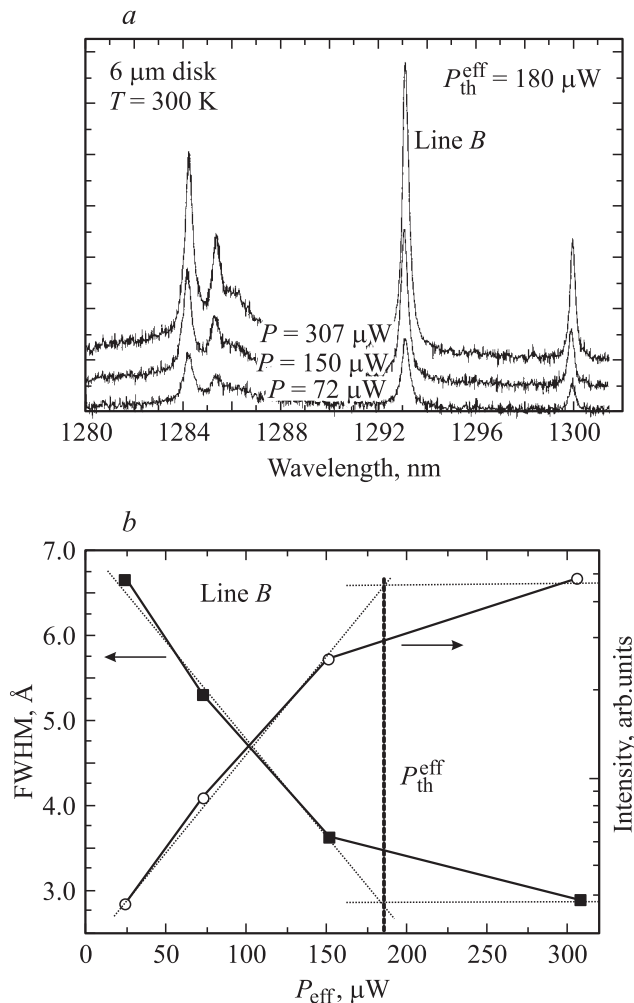


Рис. 5. *a* — спектры излучения микродиска диаметром 6 мкм при комнатной температуре и различных мощностях накачки. *b* — зависимости интенсивности и ширины резонансной линии *B* от мощности оптической накачки.

меньше значения, которое можно получить с помощью экстраполяции до 300 К зависимости, приведенной на рис. 4 для моды *A* (~ 230 мкВт).

4. Заключение

В диапазоне температур 5–300 К исследованы лазерные характеристики GaAs/(AlGa)_xO_y-микродиска с InAs/InGaAs-квантовыми точками. Получена лазерная генерация при комнатной температуре в области 1.3 мкм. Увеличение пороговой мощности с ростом температуры объясняется температурным выбросом носителей из квантовых точек, а также различием в температурных сдвигах максимума их плотности состояний и спектрального положения моды резонатора. Продемонстрирована высокая добротность мод микродиска (9900) и низкая пороговая плотность оптической накачки при комнатной температуре (180 мкВт), что открывает возможности использования

микродисков, полученных при помощи оптической литографии, в будущем поколении нанопотонных приборов.

Работа выполнена при поддержке проекта SANDiE NMP4-CT-2004-500101, CRDF, SFB 296, программы Отделения физических наук РАН „Новые материалы и структуры“, программы фундаментальных исследований президиума РАН „Квантовые наноструктуры“, РФФИ № 05-02-19967.

Авторы благодарны В.М. Бусову и С.И. Трошкову за исследования структур методом растровой электронной микроскопии.

Список литературы

- [1] S.L. McCall, A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 289 (1992).
- [2] R.E. Slusher, A.F.J. Levi, U. Mohideen, S.L. McCall, S.J. Pearton, R.A. Logan. *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 1310 (1993).
- [3] C. Scassal, P. Rojo-Romeo, X. Letartre, P. Viktorovitch, G. Hollinger, E. Jalaguier, S. Pocas, B. Aspar. *Electron. Lett.*, **37**, 222 (2001).
- [4] P. Micher, A. Kiraz, L. Zhang, C. Becher, E. Hu, A. Imamoglu. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 184 (2000).
- [5] B. Gayral, J.-M. Gerard, B. Sermage, A. Lemaitre, C. Dupuis. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2828 (2001).
- [6] S.M.K. Thiyagarajan, D.A. Cohen, A.F.J. Levi, S. Ryu, R. Li, P.D. Dapkus. *Electron. Lett.*, **35**, 1252 (1999).
- [7] Б.В. Воловик, А.Ф. Цапульников, Д.А. Бедарев, А.Ю. Егоров, А.Е. Жуков, А.Р. Ковш, Н.Н. Леденцов, М.В. Максимов, Н.А. Малеев, Ю.Г. Мусихин, А.А. Суворова, В.М. Устинов. *ФТП*, **33**, 990 (1999).
- [8] 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).

Редактор Л.В. Беляков

Room temperature lasing at $1.3\ \mu\text{m}$ in microdisk with quantum dots

N.V. Kryzhanovskaya, S.A. Blokhin, A.G. Gladyshev, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, E.M. Arakcheeva, E.M. Tanklevskaya, A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, M.V. Maximov, N.N. Ledentsov^{+}, V.M. Ustinov, E. Stock⁺, D. Bimberg⁺*

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

^{*} NL Nanosemiconductor GmbH,
44263 Dortmund, Germany

⁺ Institut für Festkörperphysik,
Technische Universität,
D-10623 Berlin, Germany

Abstract We study temperature dependencies of lasing parameters of $6\ \mu\text{m}$ diameter $\text{GaAs}/(\text{AlGa})_x\text{O}_y$ microdisk fabricated by using optical lithography, dry etching in Ar^+ beam and selective oxidation of AlGaAs layer on top which the microdisk is situated. Self-organised InAs/InGaAs are used as microdisk active area. Room temperature lasing is demonstrated at $1.3\ \mu\text{m}$ with effective threshold excitation power of $160\ \mu\text{W}$. Microdisk quality factor is about 10 000.