

07:08

Лазерная генерация в перенесенных на подложку кремния микродисковых резонаторах с квантовыми точками InAs/GaAs

© А.М. Надточий, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов,
А.Е. Жуков, Э.И. Моисеев, М.М. Кулагина,
К.А. Вашанова, Ю.М. Задиранов, И.С. Мухин,
Е.М. Аракчеева, D. Livshits, А.А. Липовский

Санкт-Петербургский Академический университет —
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
Россия
Innolume GmbH, 44263 Dortmund, Deutschland
E-mail: al.nadtochy@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 апреля 2013 г.

Методом спектроскопии фотолюминесценции исследованы микродисковые резонаторы на основе квантовых точек InAs/GaAs, отделенные от подложки GaAs селективным травлением и смонтированные на подложку кремния с помощью эпоксидного клея. Дисковый резонатор диаметром $6\ \mu\text{m}$ продемонстрировал квазиодночастотную лазерную генерацию при температуре 78 К с пороговой мощностью $320\ \mu\text{W}$ и $\lambda/\Delta\lambda \sim 27\,000$.

В последнее десятилетие полупроводниковые лазеры на кольцевых и дисковых микрорезонаторах привлекают все большее внимание как перспективные источники излучения для межчиповой передачи данных в суперкомпьютерах. Преимуществами таких микрорезонаторов являются высокая добротность мод шепчущей галереи (ШГ), малый размер и соответственно малые пороговые токи и потребляемая мощность лазеров на их основе [1]. Непрямозонная энергетическая структура доминирующего в электронике кремния существенно затрудняет создание кремниевых микролазеров. По этой причине созданные на сегодняшний момент кремниевые микродисковые излучатели [2] значительно усту-

пают по характеристикам микролазерам на основе материалов группы III–V. В свою очередь, предложенные к настоящему моменту методы интеграции микролазеров на основе AlB5 и кремниевых подложек отличаются технологической сложностью и соответственно высокой стоимостью [3,4]. Таким образом, задача интеграции микрорезонаторных источников излучения на основе соединений III–V с кремниевыми чипами сохраняет свою актуальность.

Особый интерес представляют микрорезонаторы с активной областью на основе квантовых точек (КТ) InAs/InGaAs/GaAs. Такие квантовые точки позволяют в полосковых лазерах достичь длины волны генерации около $1.3\ \mu\text{m}$ (второе окно прозрачности стандартного оптоволокна) и полной температурной нечувствительности пороговых характеристик [5]. Недавно на подложках GaAs нами была продемонстрирована рекордно высокая для микрорезонаторов на основе КТ температура лазерной генерации (107°C) [6], а при комнатной температуре достигнута генерация в КТ микрорезонаторах рекордно малого диаметра ($2.7\ \mu\text{m}$) [7].

В данной работе представлены результаты исследований микрофотолюминесценции микродисковых лазеров на основе GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs, закрепленных на подложке Si эпоксидным клеем.

Структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber 49 с твердотельным источником As на полуизолирующей подложке GaAs (100). Для селективного травления после осаждения буферного слоя GaAs выращивался стоп-слой $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ (рис. 1, *a*). Волновод микродиска представляет собой слой GaAs толщиной 220 nm. Для уменьшения утечки неравновесных носителей заряда волновод был с двух сторон ограничен барьерными слоями $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ толщиной 20 nm. Активная область была помещена в середину волноводного слоя и состояла из пяти рядов КТ InAs, прикрытых квантовой ямой $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ и разделенных слоями GaAs толщиной 30 nm. Длина волны излучения КТ составляла $1.3\ \mu\text{m}$ при комнатной температуре и $1.24\ \mu\text{m}$ при температуре жидкого азота.

Микродисковые резонаторы диаметром $6\ \mu\text{m}$ были сформированы с помощью оптической фотолитографии и травления пучком ионов Ar^+ (рис. 1, *a*, шаг 1). Далее, с помощью эпоксидного клея структура эпитаксиальной стороной была закреплена на подложке Si (рис. 1, *a*, шаг 2). Затем подложка GaAs и буферные слои вплоть до стоп-слоя $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$

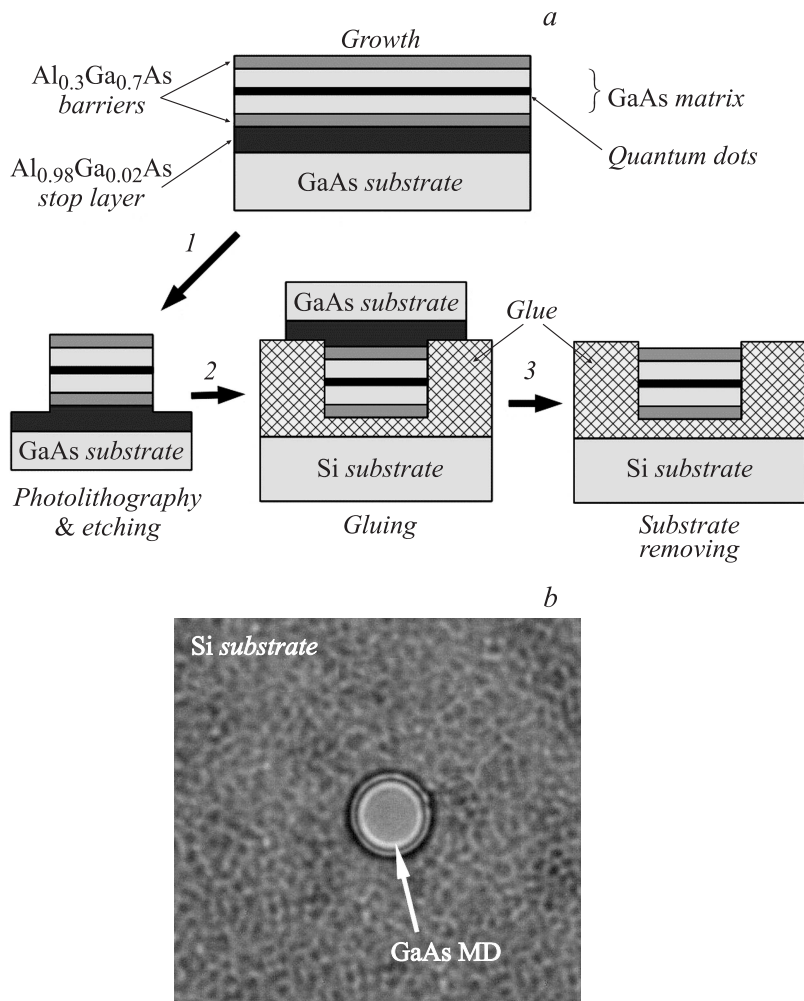


Рис. 1. *a* — схематическая последовательность операций изготовления микродисков: 1 — травление пучком ионов Ar^+ , 2 — приклеивание дисков к подложке Si, 3 — удаление подложки GaAs. *b* — микрофотография дискового микрорезонатора на кремнии.

были удалены с помощью травителя на основе $C_6H_8O_7$ (лимонная кислота) : H_2O_2 (перекись водорода) = 4 : 1. После этого слой $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ был селективно удален травителем $HF : H_2O = 1 : 5$ (рис. 1, *a*, шаг 3). Подробное описание аналогичного процесса селективного травления дано в [8]. В результате были получены микродисковые резонаторы с активной областью на основе квантовых точек $InAs/InGaAs$ в матрице $GaAs$, закрепленные на подложке Si . Поскольку толщина слоя клея составляла несколько сотен нанометров, резонаторы были погружены в клей. На рис. 1, *b* приведена фотография микродиска диаметром $6 \mu m$ на подложке кремния, полученная с помощью оптического микроскопа со 100-кратным увеличением.

Для исследований микрофотолюминесценции подложка с микро-резонаторами была помещена в криостат Janis проточного типа. Фотовозбуждение производилось через микрообъектив Olympus 100x с помощью второй гармоники лазера $YAG:Nd$ с длиной волны 532 nm . Люминесцентное излучение микрорезонатора, собранное тем же микрообъективом и пропущенное через высокоразрешающий монохроматор Horiba FHR 1000, детектировалось с помощью охлаждаемой ПЗС-линейки $InGaAs$ (Horiba Symphony). Спектры фотолюминесценции микрорезонаторов исследовались при температуре 78 K и различных плотностях оптического возбуждения.

Спектр фотолюминесценции (ФЛ) микродиска (рис. 2) представляет собой набор высокооборотных мод ШГ, длина волны которых находится в диапазоне излучения неоднородно уширенного массива КТ ($1220\text{--}1250 \text{ nm}$). Наиболее интенсивные моды находились в диапазоне $1230\text{--}1240 \text{ nm}$. Наблюдаемые в спектре пики соответствуют модам ШГ, отличающимся радиальным и азимутальными числами, что было подтверждено ранее исследованиями аналогичных резонаторов, в частности исследованиями распределения поля с помощью спектроскопии ближнего поля (NSOM) [9].

При увеличении плотности возбуждения наблюдался длинноволновый сдвиг мод ШГ, обусловленный изменением показателя преломления материалов диска вследствие его разогрева под действием оптической накачки. Кроме того, наблюдалось перераспределение интенсивности между модами ШГ, связанное с более резкой температурной зависимостью длины волны излучения КТ по сравнению с температурным сдвигом мод ШГ [10]. Разогрев микродиска под действием возбуждающего излучения был оценен как $0.03 \text{ K}/(\text{W}/\text{cm}^2)$, что в пять раз выше

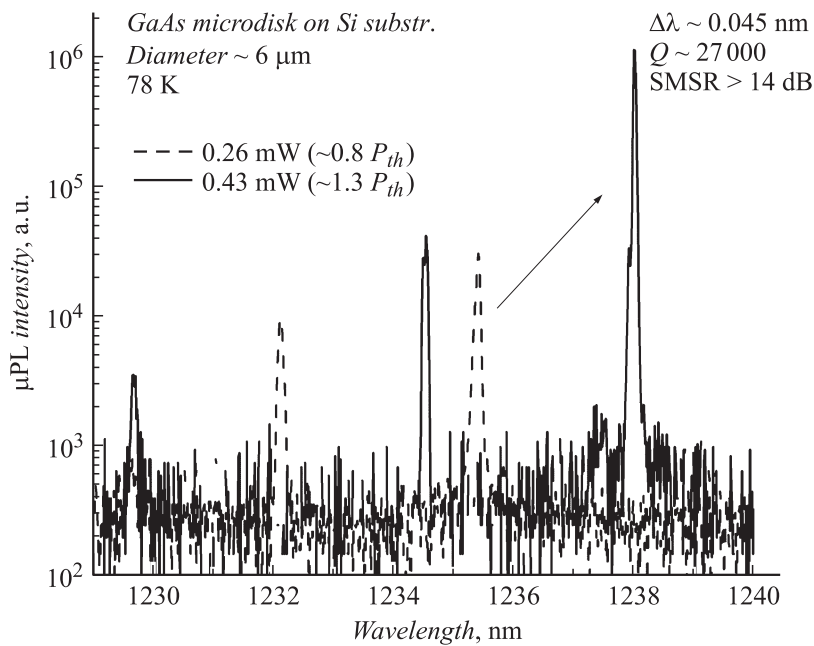


Рис. 2. Спектры микро-ФЛ, полученные при температуре 78 К и уровнях оптического возбуждения 260 (пунктир) и 430 μW (сплошная линия).

разогрева аналогичных дисков на селективно-оксидированном пьедестале [10]. Это обусловлено плохим тепловым контактом с подложкой. Мы полагаем, что разогрев может быть существенно уменьшен при использовании клея с более высокой теплопроводностью.

На рис. 3 приведены зависимости ширины линии доминирующей моды ШГ (1237 nm) на полувывоте (*a*) и интенсивности этой моды (*b*) от мощности оптического возбуждения. С ростом оптической накачки наблюдается монотонное сужение линии и при увеличении мощности оптического возбуждения с 320 до 470 μW (в полтора раза) интенсивность излучения мод ШГ возрастает более чем на порядок, т. е. микрорезонатор переходит в режим лазерной генерации. Спектры люминесценции в допороговом режиме (пунктир) и режиме лазерной генерации (сплошная линия) приведены на рис. 2. Полная

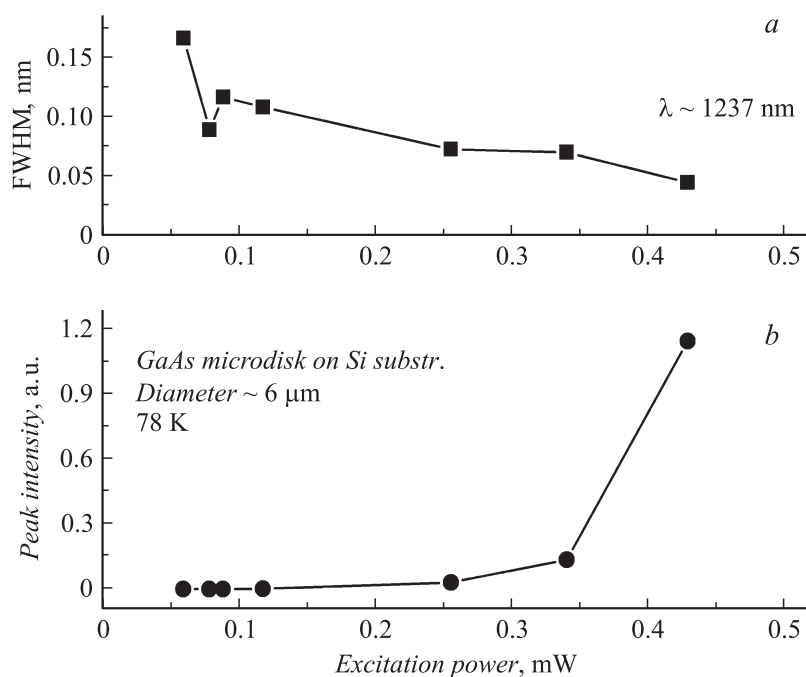


Рис. 3. Зависимости ширины на полувысоте (a) и интенсивности (b) моды ШГ с длиной волны 1237 nm от мощности оптического возбуждения при температуре 78 K.

ширина линии на полувысоте ($\Delta\lambda$) до порога лазерной генерации при малых накачках составляет около 0.15 nm (рис. 3, a), при этом отношение длины волны λ к $\Delta\lambda$ (добротность резонатора) составляет 8000. При увеличении мощности возбуждения спектральная ширина линии снижается и на пороге генерации достигает значения 0.075 nm ($\lambda/\Delta\lambda = 16\,000$). С дальнейшим ростом накачки ширина линии достигает предела, ограниченного спектральным разрешением нашей оптической системы. При этом $\lambda/\Delta\lambda$ для доминирующей моды превысило $2.7 \cdot 10^4$, а коэффициент подавления боковых мод составил 14 dB. Таким образом, микродиск демонстрирует квазиодночастотную лазерную генерацию.

Достигнутое значение $\lambda/\Delta\lambda$, сопоставимое с добротностью мод ШГ в микродисках грибовидной формы [11–13] и в дисках на оксидированном пьедестале [9,14], позволяет сделать вывод, что погружение микродиска в клей не приводит к деградации качества поверхности или к значительному увеличению потерь на вывод излучения за счет снижения контраста коэффициента преломления.

Описанная технология механического крепления дискового микрорезонатора на поверхность Si может быть перспективной для гибридной интеграции микродисковых резонаторов с элементами кремниевых фотонных схем. В то же время сильный разогрев исследованного микродиска свидетельствует о недостаточной теплопроводности использованного клея. Использование других разновидностей клея, например „жидкого стекла“, как мы ожидаем, поможет решить данную проблему.

Таким образом, разработана технология переноса микродисковых резонаторов с КТ InAs/GaAs на кремниевую подложку путем их крепления эпоксидным клеем и последующего отделения микродисков от подложки GaAs, на которой они выращивались, методом селективного травления с использованием стоп-слоя AlGaAs с высоким составом по Al. Диск диаметром $6\ \mu\text{m}$, зафиксированный на поверхности подложки Si с помощью эпоксидного клея, продемонстрировал лазерную генерацию при температуре 78 К с пороговой мощностью оптической накачки $320\ \mu\text{W}$. Отношение длины волны к ширине линии моды шепчущей галереи такого микродиска превысило $2.7 \cdot 10^4$, коэффициент подавления боковых мод составил 14 dB.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, РФФИ (грант 11-02-1256), программ фундаментальных исследований президиума РАН и ОНИТ РАН.

Список литературы

- [1] McCall S.L. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 289.
- [2] Xia J.S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 90. P. 141 102.
- [3] Choi H.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 211 101.
- [4] Liu X. et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. P. 2488.
- [5] Жуков А.Е. и др. // ФТП. 2012. Т. 46 (10). С. 1249.
- [6] Крыжановская Н.В. и др. // ФТП. 2012. Т. 46 (8). С. 1063.

- [7] Крыжановская Н.В. и др. // ФТП 2013. Т. 47 (10). С. 1396.
- [8] Kreuzer S. et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89 (1). P. 6751.
- [9] Mintairov A. et al. // Phys. Rev. B. 2008. V. 77. P. 195 322.
- [10] Надточий А. и др. // ФТП. 2008. Т. 42 (10). С. 1247.
- [11] Wang W.H. et al. // Phys. Rev. B. 2005. V. 71. P. 155 306.
- [12] Gayral B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 1908.
- [13] Michler P. et al. // APL. 2000. V. 77 (2). P. 184.
- [14] Крыжановская Н. и др. // ФТП. 2006. Т. 40 (9). С. 1128.