

08;09

Лазерная генерация перенесенных на кремний инжекционных микродисков с квантовыми точками InAs/InGaAs/GaAs

© А.Е. Жуков¹, Э.И. Моисеев¹, А.М. Надточий¹, А.С. Драгунова¹, Н.В. Крыжановская¹,
М.М. Кулагина², А.М. Можаров³, С.А. Кадинская³, О.И. Симчук³, Ф.И. Зубов³, М.В. Максимов³

¹ Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 24 апреля 2020 г.

В окончательной редакции 6 мая 2020 г.

Принято к публикации 6 мая 2020 г.

Микродисковые лазеры AlGaAs/GaAs с квантовыми точками InAs/InGaAs были перенесены на поверхность кремниевой пластины с помощью индиевого припоя. Микролазеры имеют общий электрический контакт, нанесенный поверх остаточной подложки n^+ -GaAs, а индивидуальная адресация достигается за счет размещения микродисков p -контактом вниз на отдельные контактные площадки на кремнии. Не выявлено влияния чужеродной подложки на электрические, пороговые, тепловые и спектральные характеристики. Микродиски способны работать в непрерывном режиме без принудительного охлаждения с пороговой плотностью тока около 0.7 kA/cm^2 . Длина волны генерации стабильна ($< 0.1 \text{ nm/mA}$) по отношению к току инжекции.

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, микродисковый лазер, наноструктуры, гибридная интеграция.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49844.18354

В последние десятилетия значительные усилия были направлены на разработку лазерных источников на основе прямозонных полупроводников A_3B_5 , синтезированных на кремниевых подложках, что обусловлено перспективами реализации быстродействующих лазерных систем оптической связи, интегрированных с кремниевой электроникой и транзисторной логикой [1,2]. Были продемонстрированы низкопороговые лазеры полосковой конструкции, созданные на основе системы материалов (Al)GaAs с активной областью, представляющей собой массивы самоорганизующихся квантовых точек In(Ga)As [3,4]. Применение лазерных гетероструктур AlGaAs/GaAs позволяет реализовать большие (по сравнению с гетероструктурами InGaAlP/InP) разрывы зон на гетерограницах, тогда как квантовые точки способствуют снижению чувствительности к дефектам и достижению длины волны генерации в одном из спектральных диапазонов оптической связи около $1.3 \mu\text{m}$. Недавно также были созданы первые микродисковые лазеры с квантовыми точками, монолитно интегрированные с кремнием [5–7].

Однако по приборным характеристикам лазеры на основе структур, синтезированных на кремнии, все еще уступают аналогам, выращенным на родных подложках (GaAs) [8], что связано с различиями в полярности, постоянных кристаллических решеток и коэффициентах теплового расширения материалов A_3B_5 и кремния. Избежать проблем, связанных с эпитаксиальным ростом A_3B_5 на Si, позволяет перенос на кремний эпитаксиальных структур или даже готовых микролазеров, синте-

зированных на родной подложке. Для этих целей, как правило, используются гетероструктуры, выращенные на подложках InP [9,10], несмотря на то что лазеры на их основе характеризуются низкой температурной стабильностью [11]. В то же время сообщения об использовании для гибридной интеграции лазерных гетероструктур AlGaAs/GaAs практически отсутствуют.

Ранее нами было показано, что использование в качестве активной области квантовых точек InAs/InGaAs позволяет реализовать лазерную генерацию при оптической накачке микродисковых лазеров AlGaAs/GaAs, перенесенных на кремний и закрепленных непроводящим диэлектриком на эпоксидной основе [12,13]. Применение квантовых точек позволяет формировать микролазеры без пассивации и/или заравнивания боковых поверхностей, что связано с подавлением поверхностной рекомбинации благодаря локализации носителей заряда в квантовых точках. Впервые о такой особенности квантовых точек сообщалось в [14].

В настоящей работе впервые продемонстрированы работающие при инжекционной накачке в непрерывном режиме микродисковые лазеры с квантовыми точками, синтезированные на подложке GaAs и перенесенные на кремниевую пластину.

Лазерная структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке n^+ -GaAs (100). Активная область представляет собой десять рядов квантовых точек InAs/InGaAs [15], разделенных нелегированными спейсерными слоями толщиной 35 nm и помещенных в нелегированный волноводный слой GaAs. Общая

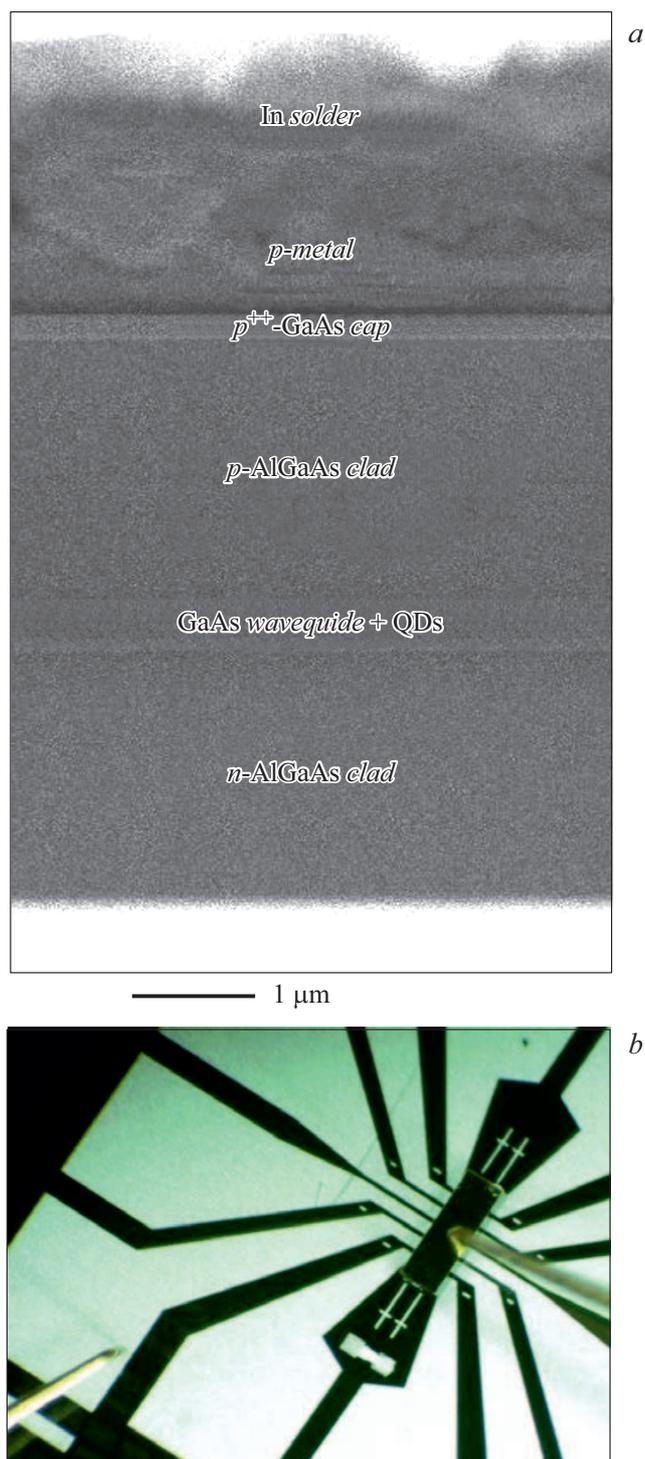


Рис. 1. Микрофотография боковой поверхности микродиска, закрепленного индием на кремниевой пластине (а), и фотография чипа, закрепленного на кремниевой пластине (б).

толщина волновода составляет около $0.44 \mu\text{m}$. Ограничивающие эмиттерные слои $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ имели толщину около $2 \mu\text{m}$ и были легированы кремнием (n -тип) и углеродом (p -тип). Структура заканчивалась контактным слоем $p^{++}\text{-GaAs}$ толщиной $0.2 \mu\text{m}$ (рис. 1, а).

Длина волны излучения активной области (основной оптический переход квантовых точек) была определена с помощью спектроскопии фотолюминесценции лазерной гетероструктуры равной 1265 nm при комнатной температуре, полная ширина линии излучения на половине высоты составила 57 nm . Изготовленные из пластины лазеры полосковой конструкции шириной $50 \mu\text{m}$, имеющие сколотые грани и длину резонатора 1 mm , продемонстрировали при импульсной накачке пороговую плотность тока 250 A/cm^2 , длина волны лазерной генерации составила 1276 nm .

Микродисковые резонаторы были сформированы с помощью фотолитографии и последующего глубокого (сквозь волновод и активную область) плазмохимического травления цилиндрических мез. Пассивация боковых стенок не проводилась. Индивидуальные электрические контакты круглой формы были изготовлены с помощью металлизации Ag-Mn/Ni/Au , нанесенной на поверхность верхнего слоя $p^{++}\text{-GaAs}$. Общий электрический контакт был изготовлен с помощью металлизации Au-Ge/Ni/Au со стороны задней поверхности подложки $n\text{-GaAs}$, утоненной до $100 \mu\text{m}$.

Затем подложка с изготовленными микродисками была разделена на отдельные чипы, содержащие массив из 2×6 микродисков. На поверхности кремниевой пластины с использованием фотолитографии были сформированы контактные площадки и проводящие дорожки Cr/Au/In , сгруппированные по 12 штук. Конфигурация площадок соответствовала конфигурации микродисков в массиве, что при переносе обеспечивало индивидуальный электрический контакт к каждому из микродисков. Позиционирование чипа на кремниевой пластине контролировалось с помощью объектива фотолитографа. Чип с микродисками закреплялся на кремниевой пластине индиевым припоем, являющимся верхним слоем контактных площадок. Нагрев выполнялся до 200°C с последующим естественным охлаждением.

Электрическое подключение исследуемого микродиска осуществлялось с помощью BeCu -зондов, один из которых (полярность напряжения „-“) устанавливался на общий для всех микродисков контакт на $n\text{-GaAs}$, а второй (полярность напряжения „+“) помещался на индивидуальную контактную площадку, сформированную на периферии контактной дорожки на кремниевой пластине (рис. 1, б). В настоящей работе представлены результаты для микродиска диаметром $40 \mu\text{m}$.

Измерения проводились при накачке постоянным током от стабилизированного источника питания Keithley 2401. Принудительное охлаждение, а также помещение приборов на дополнительный теплоотвод не применялись. Излучение исследуемого микродиска собиралось 50-кратным объективом Mitutoyo M Plan Apo NIR, передавалось по оптическому волокну и детектировалось оптическим анализатором спектра Yokogawa AQ6370C.

Вольт-амперная характеристика микролазера, перенесенного на кремний (рис. 2), характеризуется напряжением открывания около 1.1 V и дифференциальным

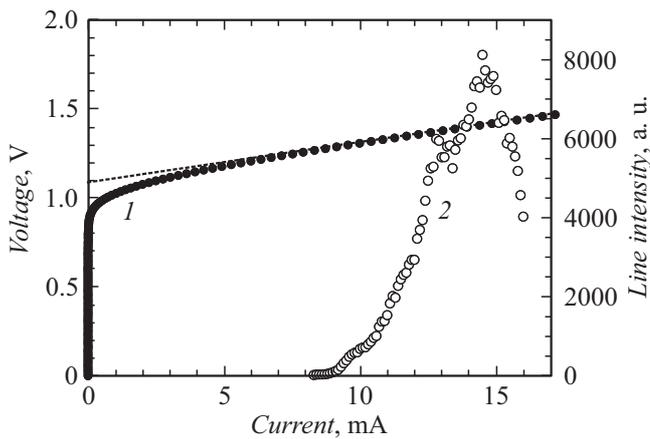


Рис. 2. Напряжение (1) и интегральная интенсивность линии излучения (2) в зависимости от тока накачки микродискового лазера, перенесенного на кремний.

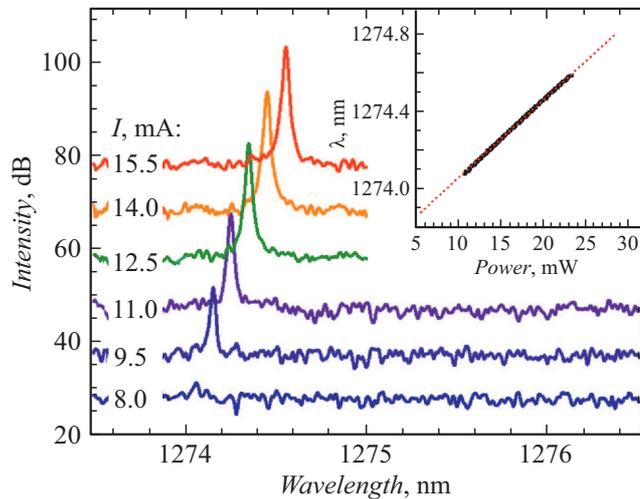


Рис. 3. Спектры излучения микродискового лазера при различных значениях тока накачки I . На вставке — положение максимума излучения в зависимости от электрической мощности. Пунктирная линия соответствует наклону 0.04 nm/mW .

сопротивлением около 22Ω (штриховая линия). На рисунке также приведена зависимость интегральной интенсивности линии излучения от тока накачки. Порог лазерной генерации составил 9 mA , что соответствует плотности тока около 0.7 kA/cm^2 . При токах свыше 14.5 mA наблюдаются насыщение и последующий спад интенсивности лазерной моды.

Спектры излучения при различных токах накачки показаны на рис. 3 (для наглядности спектры последовательно сдвинуты по оси ординат на 10 dB). Ширина линии излучения в режиме генерации составляет около 15 nm , что близко к спектральному разрешению измерительной системы. Положение линии излучения соответствует основному оптическому переходу квантовых точек. С ростом накачки линия сдвигается в длинноволновую сторону. Усредненная скорость изме-

нения длины волны составляет 0.067 nm/mA . Нормированный на потребляемую электрическую мощность длинноволновый сдвиг составляет 0.04 nm/mW (вставка на рис. 3). Это соответствует тепловому сопротивлению микролазера 0.53 K/mW .

Таким образом, нами впервые продемонстрирована лазерная генерация при инжекционной накачке в непрерывном режиме перенесенного на кремний микродискового лазера с квантовыми точками. Предложенный метод гибридной интеграции позволяет осуществить индивидуальную адресацию к микродиску. Следует отметить, что электрические, пороговые, спектральные и тепловые характеристики микролазера, перенесенного на кремний, соответствуют значениям, ранее измеренным на исходной подложке GaAs. Представленные результаты подтверждают устойчивость микролазеров на основе квантовых точек к переносу на чужеродную подложку.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение 19-72-30010). Оптические исследования осуществлены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ в 2020 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П. // УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 459–480.
- [2] Cornet C., Léger Y., Robert C. Integrated lasers on silicon. London: ISTE Press, 2016. 178 p.
- [3] Liu A.Y., Zhang C., Norman J., Snyder A., Lubyshev D., Fastenau J.M., Liu A.W.K., Gossard A.C., Bowers J.E. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. N 4. P. 041104.
- [4] Chen S., Li W., Wu J., Jiang Q., Tang M., Shutts S., Elliott S.N., Sobiesierski A., Seeds A.J., Ross I., Smowton P.M., Liu H. // Nature Photon. 2016. V. 10. N 5. P. 307–311.
- [5] Wan Y., Norman J., Li Q., Kennedy M.J., Liang D., Zhang C., Huang D., Zhang Z., Liu A.Y., Torres A., Jung D., Gossard A.C., Hu E.L., Lau K.M., Bowers J.E. // Optica. 2017. V. 4. N 8. P. 940–944.
- [6] Kryzhanovskaya N., Moiseev E., Polubavkina Yu., Maximov M., Kulagina M., Troshkov S., Zadiranov Yu., Guseva Yu., Lipovskii A., Tang M., Liao M., Wu J., Chen S., Liu H., Zhukov A. // Opt. Lett. 2017. V. 42. N 17. P. 3319–3322.
- [7] Wan Y., Inoue D., Jung D., Norman J.C., Shang C., Gossard A.C., Bowers J.E. // Photon. Res. 2018. V. 6. N 8. P. 776–781.
- [8] Liu A.Y., Herrick R.W., Ueda O., Petroff P.M., Gossard A.C., Bowers J.E. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2015. V. 21. N 6. P. 1900708.
- [9] Tanabe K., Watanabe K., Arakawa Y. // Sci. Rep. 2012. V. 2. P. 349.

- [10] Zhang C., Liang D., Kurezveil G., Bowers J.E., Beausoleil R.G. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2015. V. 21. N 6. P. 1502607.
- [11] Zou L.-X., Huang Y.-Z., Liu B.-W., Lv X.-M., Ma X.-W., Yang Y.-D., Xiao J.-L., Du Y. // Opt. Express. 2015. V. 23. N 3. P. 2879–2888.
- [12] Надточий А.М., Крыжановская Н.В., Максимов М.В., Жуков А.Е., Моисеев Э.И., Кулагина М.М., Вашанова К.А., Задиранов Ю.М., Мухин И.С., Аракчеева Е.М., Livshits D., Lipovskii A.A. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 23. В. 18. С. 70–77.
- [13] Moiseev E.I., Kryzhanovskaya N.V., Nadtochiy A.M., Maximov M.V., Zhukov A.E., Shostak I.I., Kulagina M.M., Savel'ev A.V., Vashanova K.A., Lipovskii A.A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 541. P. 012049.
- [14] Ouyang D., Ledentsov N.N., Bimberg D., Kovsh A.R., Zhukov A.E., Mikhrin S.S., Ustinov V.M. // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. N 12. P. L53–L54.
- [15] Zhukov A.E., Kovsh A.R., Maleev N.A., Mikhrin S.S., Ustinov V.M., Tsatsul'nikov A.F., Maximov M.V., Volovik B.V., Bedarev D.A., Shernyakov Yu.M., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bimberg D. // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. N 13. P. 1926–1928.