

07.3

Увеличение оптической мощности микродисковых лазеров InGaAs/GaAs, перенесенных на кремниевую подложку методом термокомпрессии

© Ф.И. Зубов¹, М.В. Максимов¹, Н.В. Крыжановская^{1,2}, Э.И. Моисеев², А.М. Надточий²,
А.С. Драгунова^{1,2}, С.А. Блохин^{2,3}, А.А. Воробьев¹, А.М. Мажаров¹, С.А. Минтаиров³,
Н.А. Калюжный³, А.Е. Жуков^{2,¶}

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: zhukale@gmail.com

Поступило в Редакцию 8 июня 2021 г.

В окончательной редакции 23 июня 2021 г.

Принято к публикации 23 июня 2021 г.

Исследована мощность излучения в непрерывном режиме микродисковых лазеров с квантовыми ямами-точками InGaAs/GaAs, гибридно интегрированных с подложкой кремния эпитаксиальной стороной вниз с помощью термокомпрессионного соединения. Вследствие уменьшения теплового сопротивления и подавления саморазогрева наблюдается рост значений токов, при которых происходит насыщение мощности и гашение лазерной генерации, а также увеличение предельной мощности. В микродисках диаметром $19\ \mu\text{m}$ наибольшая величина выходной оптической мощности в непрерывном режиме генерации составила $9.4\ \text{mW}$.

Ключевые слова: микролазер, гибридная интеграция, квантовые точки, непрерывный режим генерации.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51604.18911

В последние годы большое внимание уделяется разработке микролазеров на основе материалов A^3B^5 , которые могли бы быть размещены на кремниевой подложке и таким образом позволили бы реализовать интеграцию светоизлучающих приборов с элементами кремниевой микроэлектроники и/или кремниевой фотоники [1]. Заметные успехи были достигнуты за счет использования микродисковых/микрокольцевых лазеров на основе гетероструктур A^3B^5 с квантовыми точками, синтезируемых непосредственно на кремниевых подложках: продемонстрирована лазерная генерация в непрерывном режиме при температуре 100°C [2], продемонстрирована квазидночастотная генерация в длине волны свыше $1.3\ \mu\text{m}$ [3], показана возможность прямой модуляции с частотой до $6.5\ \text{GHz}$ [4], достигнута пороговая плотность тока $0.36\ \text{kA/cm}^2$ и оценен срок службы более $80\ 000\ \text{h}$ [5]. Использование квантовых точек обеспечивает низкую чувствительность к эпитаксиальным дефектам и поверхностной безызлучательной рекомбинации, а гетероструктуры InGaAs/GaAs/AlGaAs позволяют по сравнению с гетероструктурами на основе InP улучшить температурную стабильность благодаря более высокой теплопроводности и большим разрывам зон на гетерограницах. Однако технология синтеза соединений A^3B^5 на кремниевых подложках является довольно сложной, а изготовленные из таких пластин приборы по характеристикам все еще уступают их аналогам на подложках GaAs. Использовать максимально

высокие приборные характеристики лазерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с квантовыми точками позволяет гибридная интеграция, т.е. перенос микролазеров или их массивов, предварительно изготовленных из синтезированной на обычной подложке GaAs лазерной гетероструктуры, на специально подготовленные области поверхности кремниевой подложки [5,6].

Одним из приложений микродисковых/микрокольцевых лазеров является их использование для оптической накачки других микроскопических объектов. Так, в работе [7] сообщалось о применении излучаемой в свободное пространство оптической мощности инжекционного микродискового лазера для возбуждения пяти вертикальных микрорезонаторов (микропилларов) при проведении экспериментов по квантовой электродинамике. Еще одним применением, требующим достаточно высоких значений мощности, излучаемой в свободное пространство, является реализация оптической связи на сверхкороткие расстояния, которая, в частности, может быть осуществлена посредством микролазера и волноводного фотоприемника, расположенных на некотором удалении друг от друга [8,9]. Для достижения высокой скорости передачи данных требуются довольно большие токи инжекции и значительная выходная мощность излучения. Насколько нам известно, наибольшее значение полной выходной мощности микродисковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs было продемонстрировано для прибора диаметром $31\ \mu\text{m}$ с

активной областью в виде массивов квантовых ям-точек InGaAs и составляет в непрерывном режиме генерации 18 mW [10].

Помимо достижения целей непосредственно интеграции A^3B^5 и кремния перенос микролазеров на кремниевую подложку может при условии плотного прилегания A^3B^5 к Si обеспечить улучшение отвода тепла от активной области, как это имеет место в монтированных эпитаксиальной стороной вниз мощных полупроводниковых лазерах полосковой конструкции [11]. В настоящей работе сообщается о достижении предельного значения полной оптической мощности 9.4 mW, излучаемой в свободное пространство микродисковым лазером диаметром $19 \mu\text{m}$, гибридно интегрированным с кремниевой платой. Насколько нам известно, это значение мощности является наибольшим для микродисковых/микрокольцевых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/GaAs/AlGaAs сопоставимых размеров как на GaAs, так и интегрированных с Si. Как показывает моделирование, увеличение мощности достигается за счет снижения теплового сопротивления по сравнению с тепловым сопротивлением аналогичных приборов на исходной подложке GaAs и, как результат, наступления теплового загиба ватт-амперной характеристики при более высоких токах накачки.

Лазерная гетероструктура была выращена методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на подложке n^+ -GaAs и содержала шесть слоев квантовых ям-точек $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ в волноводе GaAs, ограниченном эмиттерными слоями AlGaAs. Полупроводниковые слои между активной областью и поверхностью гетероструктуры имели толщину менее $2.5 \mu\text{m}$ и включали верхний контактный слой p^+ -GaAs толщиной около $0.3 \mu\text{m}$, верхний эмиттерный слой p -AlGaAs толщиной около $1.5 \mu\text{m}$ и часть волноводного слоя GaAs полной толщиной около $0.8 \mu\text{m}$. Микродисковые резонаторы высотой около $5 \mu\text{m}$ и диаметром $19 \mu\text{m}$ были изготовлены с помощью фотолитографии и плазмохимического травления. Круглые контакты к p^+ -GaAs были сформированы на вершинах мез с помощью металлизации AgMn/Ni/Au. GaAs-подложка была утонена приблизительно до $100 \mu\text{m}$, после чего на ее задней поверхности был сформирован сплошной контакт AuGe/Ni/Au.

GaAs-подложка с микролазерами была разделена на отдельные чипы, каждый содержал от 4 до 12 микролазеров. На поверхности высокоомной подложки Si(100) толщиной $350 \mu\text{m}$ с помощью металлизации Cr/Au были сформированы контактные площадки, расположение и размер которых соответствовали микродискам. Далее Si-пластина посредством скрайбирования разделялась на отдельные платы так, чтобы контактные площадки под исследуемые микродисковые лазеры находились на краю плат. Позиционирование чипа с микродисками относительно контактных площадок на поверхности кремния и их последующее термокомпрессионное соединение Au–Au (давление 250 atm в течение 1 min) были выполнены с помощью установки Finetech

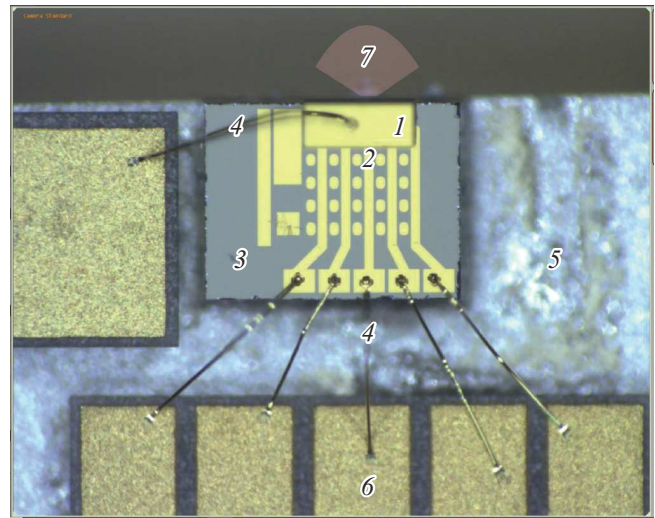


Рис. 1. Микрофотография массива микродисковых лазеров на подложке кремния. 1 — чип с микродисками (видна металлизированная подложка GaAs), 2 — контактные площадки и дорожки, 3 — кремниевая плата, 4 — проволока, 5 — теплоотвод, 6 — металлизированные диэлектрические основания, 7 — место вывода излучения микролазера.

FINEPLACER@lambda 2. Используемый при этом нагрев до $240\text{--}250^\circ\text{C}$ не ведет к каким-либо повреждениям как самих микродисков, так и возможных приборных структур, которые могут быть предварительно сформированы на кремниевой подложке. Общая толщина металлизации между поверхностями подложки Si и A^3B^5 составляла менее $1 \mu\text{m}$. Далее кремниевая плата с закрепленным на ней массивом микролазеров напаивалась индиевым припоем на медный теплоотвод (рис. 1). Окончательное электрическое подключение выполнялось посредством золотых проволок, закрепляемых с помощью ультразвуковой микросварки.

Измерения проводились при комнатной температуре в непрерывном режиме генерации. Геометрия контактных площадок и соединительных дорожек, сформированных на кремниевой плате, давала возможность реализовать индивидуальное электрическое подключение к отдельным частям микродиска (рис. 2). Для электрической накачки использовался стабилизированный источник Keithley 2400 Series SourceMeter®. Вольт-амперные характеристики номинально идентичных микродисковых лазеров в пределах одного чипа практически совпадали (рис. 3). Излучение расположенного вблизи края теплоотвода микродискового лазера собиралось фотодиодом Thorlabs FDG1010 $10 \times 10 \text{ mm}$, размещаемым на расстоянии 2 mm от тестируемого прибора, т.е. азимутальный угол сбора излучения составлял 136° , а предельное отклонение от нормали $\varphi = 68^\circ$. При определении выходной мощности выполнялось интегрирование чувствительности фотодиода по углу φ падения света относительно нормали к поверхности в соответ-

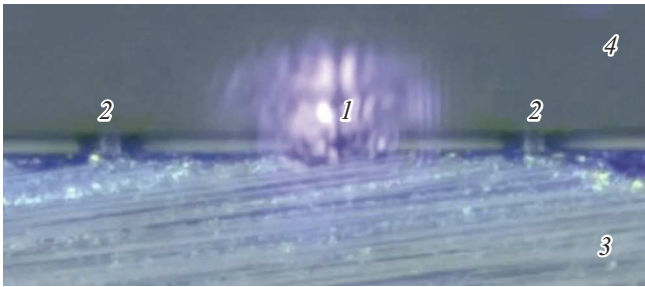


Рис. 2. Микрофотография области крепления массива микродисков на кремний. 1 — излучающий микродисковый лазер, 2 — незапитанные микродиски, 3 — кремниевая плата, 4 — остаточная GaAs-подложка.

ствии с соотношением

$$\eta(\varphi) = \eta(0) \cos \varphi,$$

где $\eta(0) = 0.55 \text{ A/W}$ — спектральная чувствительность Ge-диода на длине волны излучения микролазеров (около $1.1 \mu\text{m}$) при нормальном падении света. Кроме того, учитывалось частичное затенение излучения микродискового лазера кремниевой подложкой. Для сравнения также были выполнены измерения микродисковых лазеров до их переноса на кремниевую подложку. В этом случае чип напаивался GaAs-подложкой на медный теплоотвод. Измерение зависимости длины волны лазерной генерации от потребляемой электрической мощности показало примерно двукратное снижение теплового сопротивления, что было объяснено более высокой теплопроводностью подложки Si по сравнению с теплопроводностью GaAs, а также меньшей толщиной слоев, расположенных между активной областью и массивной подложкой [12].

На рис. 3 приведены результаты измерения зависимости полной оптической мощности от тока для пяти микродисковых лазеров до и после их переноса на кремниевую подложку. В обоих случаях имеет место заметный (примерно $\pm 30\%$) разброс значений мощности для номинально идентичных микролазеров, что может быть обусловлено различием в шероховатости боковой поверхности микрорезонаторов. Наблюдается незначительное (примерно на 20%) снижение порогового тока. В области больших токов происходит загиб ватт-амперной характеристики — явление, ранее неоднократно наблюдавшееся в вертикально-излучающих лазерах и обусловленное саморазогревом активной области [13]. Ток, соответствующий максимальному значению мощности, и ток гашения генерации увеличиваются от приблизительно 30 и 40 мА в исходных микролазерах до примерно 50 и 65 мА соответственно в микролазерах на кремнии. Пиковое значение мощности излучения возрастает в микролазерах этого размера с 3 до 6 мВт в среднем, а в микролазере, показавшем наибольшую мощность, — до 9.4 мВт.

С использованием модели [14], учитывающей влияние саморазогрева на характеристики микродискового лазера, нами было выполнено моделирование его ватт-амперной характеристики. Были использованы следующие параметры, общие для обоих типов микролазеров: пороговый ток и внешняя дифференциальная эффективность лазерного излучения при комнатной температуре в отсутствие саморазогрева 7.1 мА и 0.3 мВт/мА соответственно, характеристическая температура порогового тока и внешней дифференциальной эффективности 90°C и ∞ соответственно, дифференциальное электрическое сопротивление при больших токах 23 Ω . Тепловое сопротивление было единственным использованным в расчетах параметром, значение которого мы полагали различающимся для исходных микродисковых лазеров (1.3 К/мВт) и микролазеров, перенесенных на кремниевую подложку (0.8 К/мВт). Удовлетворительное согласие, наблюдаемое для результатов расчетов и экспериментальных данных (с учетом разброса между номинально идентичными приборами), позволяет сделать вывод, что основной причиной улучшения мощностных характеристик микродисковых лазеров после их переноса на кремниевую подложку является снижение теплового сопротивления.

Таким образом, нами были исследованы ватт-амперные характеристики микродисковых лазеров с квантовыми ямами-точками InGaAs, которые в составе массивов идентичных приборов были перенесены на кремниевую подложку эпитаксиальной стороной вниз методом термокомпрессионного соединения. Наблюдаемое увеличение мощности микролазеров (вплоть до рекордно высокого для микродисковых/микрокольцевых лазеров

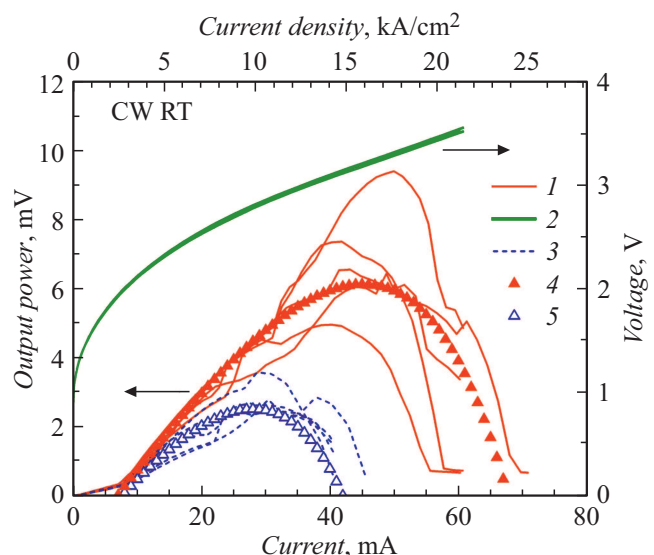


Рис. 3. Ватт- (1) и вольт-амперные (2) характеристики пяти микродисковых лазеров диаметром $19 \mu\text{m}$, смонтированных на кремниевой подложке. 3 — ватт-амперная характеристика до монтажа; 4 и 5 — результаты моделирования ватт-амперных характеристик микролазеров, смонтированных на Si, и микролазеров до монтажа соответственно.

сопоставимых размеров значения 9.4 mW) может быть объяснено исключительно снижением теплового сопротивления микродисков после их размещения на кремнии. Приборы выдерживают плотности тока по крайней мере 20 kA/cm² без каких-либо признаков деградации. Используемые при термокомпрессионном соединении температуры (менее 300°C) не представляют опасности для КМОП, что открывает возможность применения данного метода для гибридной интеграции лазерных излучателей с кремниевыми микросхемами.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-12-00287 (<https://rscf.ru/project/18-12-00287/>). Оптические исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ. А.М. Можаров благодарит Совет по грантам Президента РФ (СП-2169.2021.1)

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Cornet, Y. Léger, C. Robert, *Integrated lasers on silicon* (ISTE Press, 2016). DOI: 10.1016/B978-1-78548-062-1.50007-X
- [2] Y. Wan, J. Norman, Q. Li, M.J. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, D. Huang, Z. Zhang, A.Y. Liu, A. Torres, D. Jung, A.C. Gossard, E.L. Hu, K.M. Lau, J.E. Bowers, *Optica*, **4** (8), 940 (2017). DOI: 10.1364/OPTICA.4.000940
- [3] N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, Yu. Polubavkina, M. Maximov, M. Kulagina, S. Troshkov, Yu. Zadiranov, Yu. Guseva, A. Lipovskii, M. Tang, M. Liao, J. Wu, S. Chen, H. Liu, A. Zhukov, *Opt. Lett.*, **42** (17), 3319 (2017). DOI: 10.1364/OL.42.003319
- [4] Y. Wan, D. Inoue, D. Jung, J.C. Norman, C. Shang, A.C. Gossard, J.E. Bowers, *Photon. Res.*, **6** (8), 776 (2018). DOI: 10.1364/PRJ.6.000776
- [5] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, A.S. Dragunova, M. Tang, S. Chen, H. Liu, M.M. Kulagina, S.A. Kadinskaya, F.I. Zubov, A.M. Mozharov, M.V. Maximov, *Materials*, **13** (10), 2315 (2020). DOI: 10.3390/ma13102315
- [6] A.E. Жуков, Э.И. Моисеев, А.М. Надточий, А.С. Драгунова, Н.В. Крыжановская, М.М. Кулагина, А.М. Можаров, С.А. Кадинская, О.И. Симчук, Ф.И. Зубов, М.В. Максимов, *Письма в ЖТФ*, **46** (16), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49844.18354
- [7] E. Stock, F. Albert, C. Hopfmann, M. Lerner, C. Schneider, S. Höfling, A. Forchel, M. Kamp, S. Reitzenstein, *Adv. Mater.*, **25** (5), 707 (2013). DOI: 10.1002/adma.201202778
- [8] Y. Wan, Z. Zhang, R. Chao, J. Norman, D. Jung, C. Shang, Q. Li, M.J. Kennedy, D. Liang, C. Zhang, J.-W. Shi, A.C. Gossard, K.M. Lau, J.E. Bowers, *Opt. Express*, **25** (22), 27715 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.027715
- [9] Н.В. Крыжановская, Э.И. Моисеев, А.М. Надточий, А.А. Харченко, М.М. Кулагина, С.А. Минтаиров, Н.А. Каложный, М.В. Максимов, А.Е. Жуков, *Письма в ЖТФ*, **46** (13), 7 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49582.18301
- [10] E. Moiseev, N. Kryzhanovskaya, M. Maximov, F. Zubov, A. Nadtochiy, M. Kulagina, Yu. Zadiranov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, A. Zhukov, *Opt. Lett.*, **43** (19), 4554 (2018). DOI: 10.1364/OL.43.004554
- [11] X. Li, Y. Zhang, J. Wang, L. Xiong, P. Zhang, Zh. Nie, Zh. Wang, H. Liu, X. Liu, *IEEE Trans. Comp. Pack. Manufact. Technol.*, **2** (10), 1592 (2012). DOI: 10.1109/TCPMT.2012.2207456
- [12] N. Kryzhanovskaya, E. Moiseev, A. Nadtochiy, M. Maximov, A. Dragunova, M. Fetisova, M. Kulagina, Yu. Guseva, S. Mintairov, N. Kalyuzhnyy, M. Tang, M. Liao, J. Wu, S. Chen, H. Liu, A. Zhukov, *Proc. SPIE*, **11775**, 117750P (2021). DOI: 10.1117/12.2589118
- [13] P.P. Baveja, B. Kogel, P. Westbergh, J.S. Gustavsson, A. Haglund, D.N. Maywar, G.P. Agrawal, A. Larsson, *Opt. Express*, **19** (16), 15490 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.015490
- [14] A.E. Zhukov, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, A.M. Nadtochiy, A.S. Dragunova, M.V. Maximov, F.I. Zubov, S.A. Kadinskaya, Yu. Berdnikov, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, *IEEE J. Quant. Electron.*, **56** (5), 2000908 (2020). DOI: 10.1109/JQE.2020.3009954