

# Микродисковые лазеры с вынесенной контактной площадкой мостиковой конструкции, сформированные жидкостным химическим травлением

© А.А. Образцова<sup>1</sup>, А.А. Пивоварова<sup>2</sup>, С.Д. Комаров<sup>1</sup>, И.С. Федосов<sup>1</sup>, К.А. Иванов<sup>1</sup>,  
Н.А. Калюжный<sup>2</sup>, С.А. Минтаиров<sup>2</sup>, Н.Д. Ильинская<sup>2</sup>, Ю.П. Яковлев<sup>2</sup>,  
И.С. Махов<sup>1</sup>, Н.В. Крыжановская<sup>1</sup>, А.Е. Жуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,  
190121 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: aobraztsova@hse.ru

Поступила в Редакцию 3 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 10 апреля 2025 г.

Принята к публикации 17 апреля 2025 г.

Представлен подход к созданию микролазеров с квантовыми точками на подложках GaAs с дисковым резонатором, электрическим контактом мостикового типа и опорной мезой, сформированными методом жидкостного химического травления. Мостиковая конструкция представляет собой две соединенные подвешенной золотой балкой мезаструктуры, одна из которых является, собственно, микродисковым резонатором, а вторая служит для создания вынесенного электрического контакта. Предложенный метод открывает пути для изготовления инъекционных микролазеров малого диаметра, поскольку исключает необходимость прикрепления электрического провода к верхней поверхности резонатора микролазера. Изготовлены микролазеры с мостиковым контактом, продемонстрировано формирование близкой к вертикальной стенки микрорезонатора вблизи активной области структуры, получены спектры электролюминесценции микролазеров в широком интервале токов накачки, подтверждающие возможность лазерной генерации как при комнатной, так и при повышенных температурах.

**Ключевые слова:** микролазеры, мостиковый контакт, моды шепчущей галереи, жидкостное химическое травление.

DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60498.7587

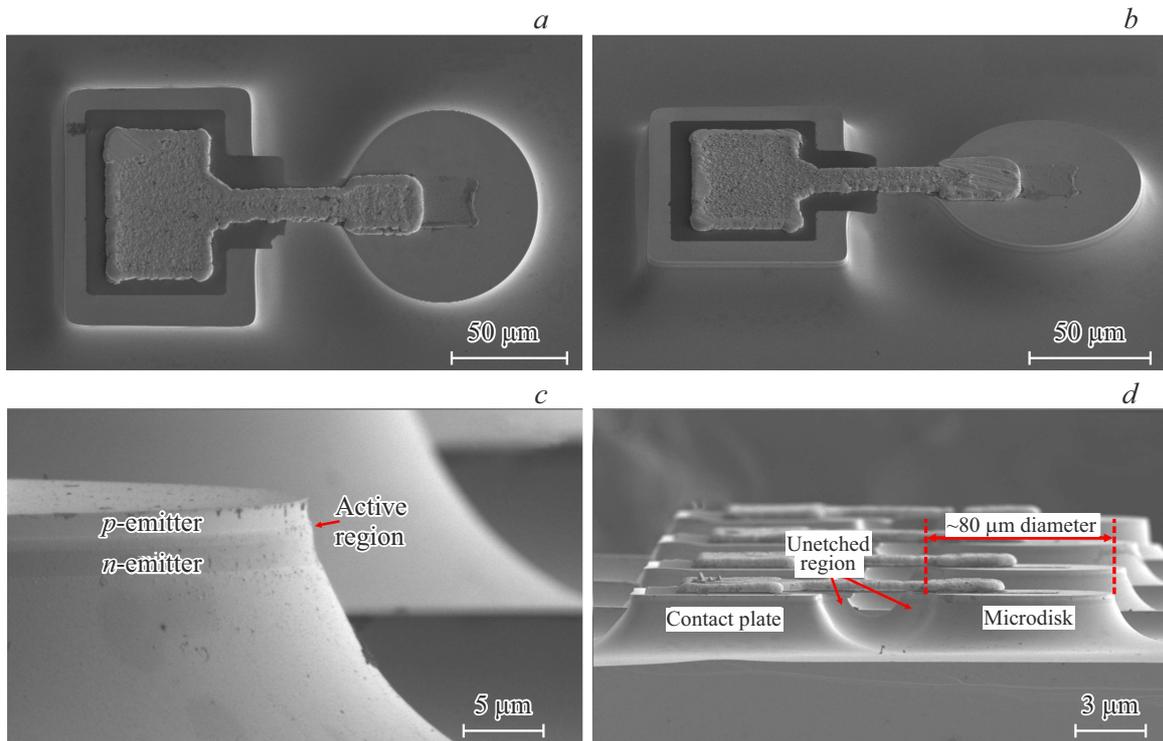
## 1. Введение

Полупроводниковые микродисковые лазеры с модами шепчущей галереи (МШГ) с квантовыми точками представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в разработке микроизлучателей света, которые находят применение в различных оптоэлектронных приложениях от систем оптической коммуникации до биомедицинского зондирования [1,2]. Благодаря высокой добротности [3], низкому порогу генерации [4] и латеральной направленности выходного излучения они имеют значительные преимущества перед другими типами микролазеров (вертикально излучающие лазеры, лазеры на фотонном кристалле и др.). В последние годы ведутся разработки [5–8] по интеграции микродисковых лазеров с другими элементами с конечной целью их использования в составе фотонных интегральных схем. Для интеграции таких лазеров требуется обеспечить надежный электрический контакт. Из-за малых размеров микролазеров возникают сложности с осуществлением электрического контакта к ним посредством прямой пайки (сварки) или контакта микрозондом. Кроме того, для интегрального исполнения микролазеров с фотонной интегральной схемой требуется реализация электрических

соединений между элементами схемы, что также должно реализовываться в едином технологическом цикле.

В настоящей работе мы демонстрируем подход к созданию микродисковых лазеров мостикового типа с вынесенной контактной площадкой. Мостиковая конструкция представляет собой две отдельные мезаструктуры с перекинутым между ними воздушным металлическим контактом. Ключевой особенностью данной конструкции является то, что контактная площадка для сборки выведена на отдельно стоящую, электрически изолированную диэлектриком опорную мезу. Воздушный протрав под металлическим выводом обеспечивает электрическую изоляцию слоев гетероструктуры между мезами [9,10]. Такая реализация конструкции позволяет осуществлять не только стабильную электрическую накачку, не ухудшая при этом функциональные характеристики микролазера, но и снять ограничение на минимальный размер микролазера, обусловленное возможностями формирования контакта к верхней поверхности резонатора.

Изготовление микролазеров, как правило, включает синтез методами молекулярно-пучковой или газофазной эпитаксии с последующим формированием микрорезонаторов в форме диска или кольца с помощью фото- или электронной литографии и травления. В нашей



**Рис. 1.** СЭМ-изображения сформированных микролазеров с мостиковым электрическим контактом: *a* — вид сверху, *b* — вид под углом, *c* — вид боковой стенки для глубокого травления, *d* — вид на устройства и области неотравки.

работе для формирования микродисковых резонаторов с вынесенным контактом использован метод жидкостного химического травления, в котором по сравнению с плазмохимическим травлением для формирования электрического контакта мостикового типа между микролазером и контактной площадкой не требуется использование дополнительных планаризирующих покрытий, наличие которых ухудшает теплоотвод и приводит к уменьшению оптической выходной мощности из-за поглощения латерально-выходящего излучения [11]. Кроме того, в случае жидкостного химического травления формирование мостикового контакта происходит в едином цикле с травлением мез, поскольку жидкостное травление обеспечивает осуществление травления в латеральном направлении под областью металла. В то же время требуется оптимизация режимов жидкостного травления для формирования мезы с вертикальными стенками.

В настоящей работе впервые созданы микродисковые лазеры с мостиковым контактом, продемонстрировано формирование близкой к вертикальной стенке микро-резонатора вблизи активной области структуры, достигнута лазерная генерация при комнатной и повышенных температурах.

## 2. Материалы и методы

Синтез лазерной гетероструктуры производился методом газофазной эпитаксии из металлоорганических

соединений на подложке  $n^+$ -GaAs, разориентированной на  $6^\circ$  относительно плоскости (100). Структура состояла из буферного слоя  $n^+$ -GaAs, нижнего эмиттерного слоя  $n$ -Al<sub>0.39</sub>Ga<sub>0.61</sub>As толщиной 1.5 мкм, 0.75 мкм нелегированного волноводного слоя GaAs, 1.2 мкм верхнего эмиттерного слоя  $p$ -AlGaAs, а также контактного слоя  $p^{++}$ -GaAs толщиной 0.15 мкм. В волноводном слое находилась активная область, состоящая из 6 слоев квантовых точек InGaAs/GaAs, формирование которых происходило путем осаждения на GaAs слоя In<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>As толщиной 2 нм. Слои с квантовыми точками были разделены друг от друга спейсером GaAs толщиной 40 нм.

Микролазеры были получены с помощью методов стандартной оптической литографии. При формировании диэлектрических и металлических слоев использовался метод взрывной литографии. Для изоляции контактной площадки от опорной мезы создавалась диэлектрическая подкладка из двухкомпонентной системы материалов TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>, нанесенных методом магнетронного распыления. Формирование омического контакта методом высоковакуумного термического испарения проводилось напылением системы Ag-Mn-Ni-Au к слою  $p$ -GaAs и Au-Ge-Ni-Au для  $n$ -GaAs с последующим одновременным вжиганием в атмосфере водорода. Вывод омического контакта на опорную мезу также формировался методом термического испарения, для этого проводилось напыление системы Cr-Au. Полученная ме-

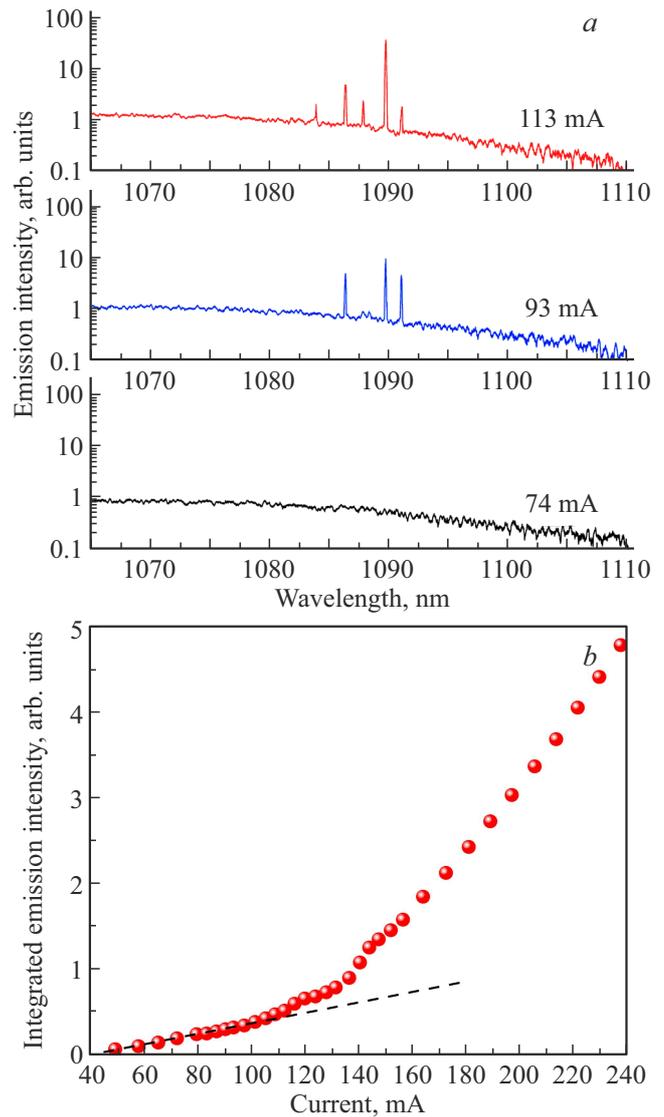
таллическая балка утолщалась с помощью селективного гальванического осаждения золота до толщины  $\sim 3$  мкм.

Травление мезоструктур проводилось в полирующем травителе  $\text{HBr} \cdot \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , имеющем близкие скорости травления слоев гетероструктуры, благодаря чему удалось получить достаточно гладкую боковую стенку мезы. Травление осуществлялось на номинальную глубину 20 или 23 мкм. Глубина травления определялась с помощью стилусного профилометра Bruker DektakXT. Диаметр сформированных микродисковых лазеров составил  $\sim 84$  и  $80$  мкм для травления на глубину 20 и 23 мкм соответственно, что обусловлено латеральным растреливанием. Полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) изображения сформированных конструкций представлены на рис. 1. Как видно из рис. 1, *c*, наклон стенки резонатора вблизи активной области гетероструктуры практически вертикален. При этом из рис. 1, *d* видно, что в области под мостиком происходит недотрав гетероструктуры в силу ограниченности доступа химического травителя. В результате как со стороны вынесенной контактной площадки, так и со стороны микролазера в области мостика формируется выступ, величина которого тем меньше, чем больше глубина травления. Наличие такого выступа может уменьшать добротность (увеличивать оптические потери) резонатора лазера и, как следствие, влиять на его пороговые и спектральные характеристики.

Для измерений пластина со сформированными устройствами припаивалась p-контактом вниз на медный теплоотвод, также выступавший в качестве одного из электрических контактов, который размещался на массивном держателе, позволяющем варьировать температуру теплоотвода за счет встроенного двухстадийного термоэлемента и термодатчика. Электрический контакт к вынесенной контактной площадке исследуемого микролазера производился с помощью металлического микронзонда. Питание микролазеров осуществлялось импульсами тока длительностью 500 нс с частотой повторения 4 кГц. Излучение от микролазеров собиралось микрообъективом Mitutoyo MPlan APO NIR 20x и затем по многомодовому оптическому волокну направлялось в оптический анализатор спектров Yokogawa AQ6370D.

### 3. Результаты

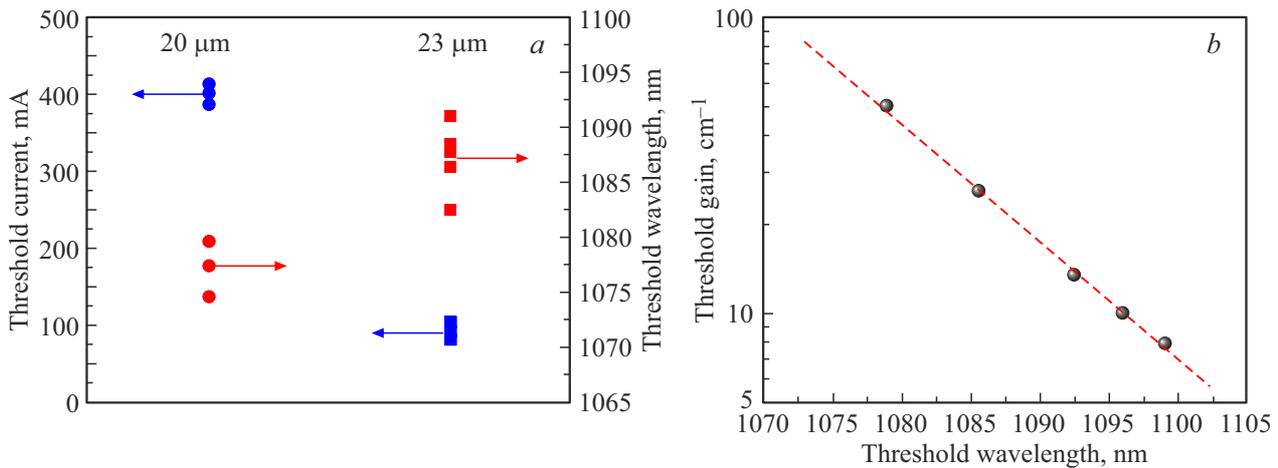
На рис. 2, *a* представлены спектры электролюминесценции микродискового лазера, сформированного травлением на глубину 23 мкм, полученные при комнатной температуре для различных токов накачки. При малых значениях тока накачки спектр электролюминесценции микролазера соответствует спонтанному излучению  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ -квантовых точек [12]. Спектральное положение максимума интенсивности спонтанного излучения активной области соответствует основному переходу неравновесных носителей заряда в точках и находится на длине волны  $\sim 1077$  нм. С увеличением тока накачки



**Рис. 2.** Спектры электролюминесценции (*a*), измеренные при различных токах накачки, и зависимость интегральной интенсивности электролюминесценции от тока накачки (*b*) для микродискового лазера с номинальной глубиной травления 23 мкм.

в длинноволновой части полосы спонтанного излучения возникает серия узких линий, соответствующих модам шепчущей галереи, поддерживаемых микрорезонатором. О переходе в режим лазерной генерации также свидетельствует пороговый вид зависимости интегральной интенсивности люминесценции лазера от тока накачки (рис. 2, *b*). Пороговый ток лазерной генерации  $I_{th}$  для данного микродискового лазера составляет  $\sim 93$  мА, что соответствует пороговой плотности тока  $\sim 1.8$  кА/см<sup>2</sup>. Во всем исследованном диапазоне значений токов накачки микродисковый лазер демонстрирует многомодовую генерацию.

Микролазеры, сформированные травлением на меньшую глубину (20 мкм), демонстрируют существенно



**Рис. 3.** Значения пороговых токов лазерной генерации (синие символы) и длины волны доминирующей на пороге генерации моды (красные символы) для микродисков с травлением на глубину 23 мкм (квадраты) и 20 мкм (точки) (а). Зависимость порогового модового усиления от длины волны генерации, полученная для полосковых лазеров, изготовленных из той же эпитаксиальной структуры (б).

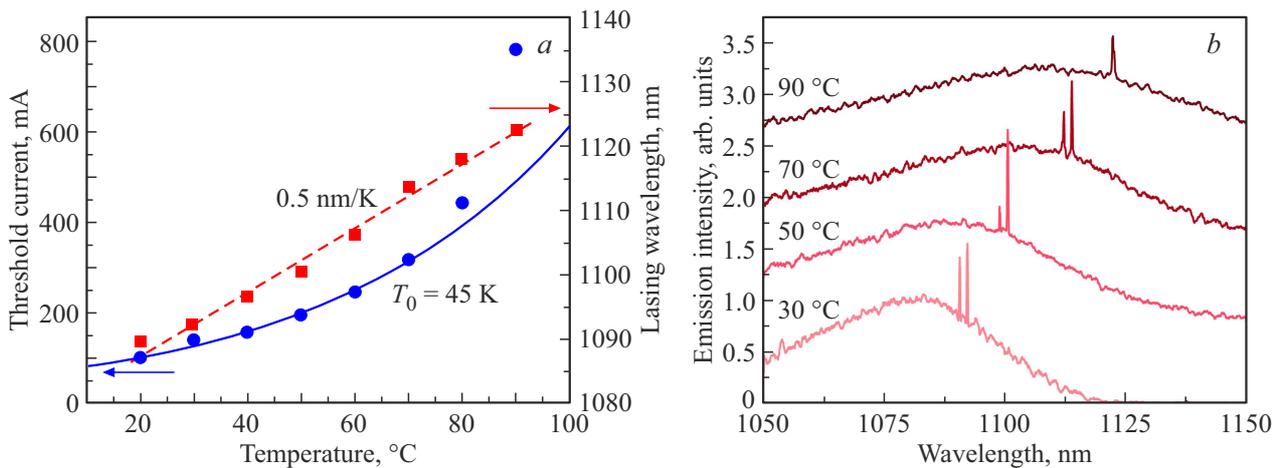
худшие характеристики по сравнению с микролазерами, сформированными травлением на глубину 23 мкм. Как можно видеть из рис. 3, а, увеличение глубины травления с 20 до 23 мкм в разы понижает величину порогового тока лазерной генерации. Наиболее вероятной причиной является меньший размер выступа, формирующегося под мостиковым контактом, и, как результат, меньшие оптические потери, обусловленные рассеянием света, для резонаторов с большей глубиной травления. Действительно, существенный рост порогового тока наблюдался в микрокольцевых лазерах при присоединении к ним радиального волновода, который связывался с ростом оптических потерь за счет значительного рассеяния излучения в углах на границе стыка микрокольцевого резонатора с радиальным оптическим волноводом [13]. Более того, микролазеры, полученные травлением на большую глубину, демонстрируют лазерную генерацию в более длинноволновой части спектра, несмотря на то что они все сформированы из одной и той же эпитаксиальной лазерной гетероструктуры. Известно, что рост уровня потерь в лазерах на квантовых точках приводит к коротковолновому смещению длины волны лазерной генерации [14], что также свидетельствует о меньшем уровне потерь в микролазерах, полученных травлением на глубину 23 мкм.

Величина полных оптических потерь, присущих исследованным микролазерам, сформированным с различной глубиной травления, может быть определена на основе сравнения длины волны генерации на пороге в микродисках и полосковых лазерах различной длины, выполненных из этой же эпитаксиальной структуры. В данном случае мы также используем то обстоятельство, что фактор оптического ограничения (как вертикальный, так и в плоскости) одинаков для лазерных мод в обоих случаях. Полученная взаимосвязь порогового усиления

и длины волны генерации для полосков различной длины показана на рис. 3, б, считая коэффициент отражения зеркал полоскового лазера равным 30%. При этом учитывался уровень внутренних потерь  $2 \text{ см}^{-1}$ , определенный из зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора полоскового лазера. Поскольку микродисковые и полосковые лазеры выполнены из одной и той же эпитаксиальной пластины, схожая длина волны на пороге генерации свидетельствует о схожем уровне потерь в лазерах. Тогда для микродисков с глубиной травления 23 мкм полный уровень потерь составляет величину  $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ , что хорошо согласуется с предыдущими результатами для микродисков, полученных плазмохимическим травлением [15]. Травление микродисков на меньшую глубину (20 мкм) дает существенно бóльшие полные потери около  $55 \text{ см}^{-1}$ .

На следующем этапе были изучены спектральные и пороговые характеристики микродискового лазера, сформированного травлением на глубину 23 мкм, при различных температурах (20–90 °С). Рост температуры кристаллической решетки приводит к росту порогового тока лазерной генерации (рис. 4, а), который в температурном интервале от 20 до 70 °С описывается характеристической температурой  $T_0 = 45 \text{ К}$ . При этом лазерная генерация наблюдается вплоть до 90 °С. Основными причинами роста порогового тока с температурой выступают, как мы полагаем, температурный рост вклада безызлучательной рекомбинации, а также рост теплового размытия распределения носителей заряда по состояниям квантовых точек (основное, возбужденные), также приводящий к более вероятному выбросу носителей из квантовых точек.

Рост температуры также приводит к красному смещению длины волны лазерной генерации с характерным



**Рис. 4.** Зависимости порогового тока (точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация с характеристической температурой  $T_0$ ) и длины волны доминирующей лазерной моды (квадраты — эксперимент, пунктирная линия — линейная аппроксимация) от температуры (а) и спектры электролюминесценции, измеренные при различных температурах при токе накачки, равном  $1.15 \times I_{th}$  (b) для микролазера с глубиной травления 23 мкм.

коэффициентом  $\sim 0.5$  нм/К (рис. 4, а). Длинноволновый сдвиг лазерной линии с температурой может быть вызван несколькими основными вкладами. Первый вклад связан с изменением показателя преломления активной области лазера с ростом температуры, который в микролазерах со схожей активной областью определяется коэффициентом  $\sim 80$  пм/К [16,17]. Второй вклад крайне слаб и связан с линейным термическим расширением материалов, формирующих микролазер. Третий вклад связан с длинноволновым смещением самого спектра усиления с ростом температуры, вызванного температурным изменением ширины запрещенной зоны материалов, формирующих активную область микролазера. Действительно, с ростом температуры наблюдается явное смещение полосы спонтанной люминесценции микролазеров (рис. 4, b) на величину  $\sim 0.45$  нм/К. Таким образом, проявляющееся в нашем случае красное смещение лазерной моды с температурой с коэффициентом 0.5 нм/К вызвано совокупностью всех вышеперечисленных факторов, из которых доминирующим является сужение запрещенной зоны.

#### 4. Заключение

В данной работе представлен новый подход к созданию микродисковых лазеров с квантовыми точками, использующий метод жидкостного травления и вынесенную контактную площадку. Предложенный метод позволяет устранить необходимость прикрепления электрического провода к верхней поверхности микрорезонатора и, таким образом, открывает возможность изготовления инжекционных микролазеров малого диаметра. Получены спектры электролюминесценции, подтверждающие возможность многомодовой генерации при различных

токах накачки. Вынесенные контакты улучшают стабильность электрического соединения благодаря возможности применения пайки или сварки для лазеров малых размеров и, как показали проведенные исследования, поддерживают работу устройства при повышенных температурах, что делает предложенную технологию перспективной для интеграции в фотонные схемы и оптоэлектронные устройства.

#### Финансирование работы

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10002, <https://rscf.ru/project/22-72-10002/>.

#### Благодарности

Исследования выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки „Комплексный оптоэлектронный стенд НИУ ВШЭ — Санкт-Петербург“.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] Y.C. Chen, X. Fan. *Adv. Opt. Mater.*, **7** (17), 1900377 (2019).
- [2] A.I. Nosich, E.I. Smotrova, S.V. Boriskina, T.M. Benson, P. Sewell. *Optical Quant. Electron.*, **39**, 1253 (2007).
- [3] L. He, Ş.K. Özdemir, L. Yang. *Laser Photon. Rev.*, **7** (1), 60 (2013).
- [4] X.F. Jiang, C.L. Zou, L. Wang, Q. Gong, Y.-F. Xiao. *Laser Photon. Rev.*, **10** (1), 40 (2016).

- [5] E. Stock, F. Albert, C. Hopfmann, M. Lermer, C. Schneider, S. Höfling, A. Forchel, M. Kamp, S. Reitzenstein. *Advanced Mater.*, **25** (5), 707 (2013).
- [6] Y. Wan, D. Jung, D. Inoue, J.C. Norman, C. Shang, A.C. Cossard, J.E. Bowers. *2018 Progress in Electromagnetics Research Symp.* (Toyama, Japan, 2018) p. 249.
- [7] N.V. Kryzhanovskaya, F.I. Zubov, E.I. Moiseev, A.S. Dragunova, K.A. Ivanov, M.V. Maximov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, S.V. Mikushev, M.M. Kulagina, J.A. Guseva, A.I. Likhachev, A.E. Zhukov. *Laser Phys. Lett.*, **19** (1), 016201 (2021).
- [8] N.V. Kryzhanovskaya, K.A. Ivanov, N.A. Fominykh, S.D. Komarov, I.S. Makhov, E.I. Moiseev, J.A. Guseva, M.M. Kulagina, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, A.I. Lihachev, R.A. Khabibullin, R.R. Galiev, A.Yu. Pavlov, K.N. Tomosh, M.V. Maximov, A.E. Zhukov. *J. Appl. Phys.*, **134**, 103101 (2023).
- [9] Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. Патент 2783353 RU (Россия, 2022).
- [10] А.А. Пивоварова, Е.В. Куницына, Г.Г. Коновалов, С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, И.А. Андреев, Н.А. Пихтин, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев. *ЖПС*, **90** (1), 102 (2023).
- [11] N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, F.I. Zubov, A.M. Mozharov, M.V. Maximov, N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.M. Kulagina, S.A. Blokhin, K.E. Kudryavtsev, A.N. Yablonskiy, S.V. Morozov, Yu. Berdnikov, S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Photon. Res.*, **7** (6), 664 (2019).
- [12] M.V. Maximov, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.V. Kryzhanovskaya, E.I. Moiseev, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, A.S. Payusov, F.I. Zubov, V.N. Nevedomskiy, S.S. Rouvimov, A.E. Zhukov. *Appl. Sci.*, **10**, 1038 (2020).
- [13] N.A. Fominykh, F.I. Zubov, K.A. Ivanov, E.I. Moiseev, A.M. Nadtochiy, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, I.A. Melnichenko, V.V. Pirogov, S.A. Scherbak, B.D. Urmanov, A.V. Nahorny, N.V. Kryzhanovskaya, A.E. Zhukov. *St. Petersburg Polytechnical University. J. Phys. Math.*, **16** (1.2), 126 (2023).
- [14] Н.В. Кръжановская, И.С. Махов, А.М. Надточий, К.А. Иванов, Э.И. Моисеев, И.А. Мельниченко, С.Д. Комаров, С.А. Минтаиров, Н.А. Калюжный, М.В. Максимов, Ю.М. Шерняков, А.Е. Жуков. *Письма ЖТФ*, **50** (21), 57 (2024).
- [15] A.E. Zhukov, E.I. Moiseev, A.M. Nadtochiy, N.A. Fominykh, K.A. Ivanov, I.S. Makhov, M.V. Maximov, F.I. Zubov, V.G. Dubrovskii, S.A. Mintairov, N.A. Kalyuzhnyy, N.Yu. Gordeev, Yu.M. Shernyakov, N.V. Kryzhanovskaya. *IEEE J. Quant. Electron.*, **59** (1), 2000108 (2023).
- [16] I. Makhov, S. Komarov, N. Fominykh, A. Obratsova, V. Voitovich, N. Derkach, I. Melnichenko, N. Shandyba, N. Chernenko, M. Solodovnik, A. Lipovskii, Yu. Shernyakov, N. Kalyuzhnyy, S. Mintairov, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov. *Optics Lett.*, **50** (2), 387 (2025).
- [17] I. Makhov, K. Ivanov, E. Moiseev, N. Fominykh, A. Dragunova, N. Kryzhanovskaya, A. Zhukov. *Nanomaterials*, **13**, 877 (2023).

Редактор Г.А. Оганесян

## Bridge-contact microdisk lasers formed by wet chemical etching

A.A. Obratsova<sup>1</sup>, A.A. Pivovarova<sup>2</sup>, S.D. Komarov<sup>1</sup>, I.S. Fedosov<sup>1</sup>, K.A. Ivanov<sup>1</sup>, N.A. Kalyuzhnyy<sup>2</sup>, S.A. Mintairov<sup>2</sup>, N.D. Il'inskaya<sup>2</sup>, Yu.P. Yakovlev<sup>2</sup>, I.S. Makhov<sup>1</sup>, N.V. Kryzhanovskaya<sup>1</sup>, A.E. Zhukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> HSE University,  
190121 St. Petersburg, Russia  
<sup>2</sup> Ioffe Institute,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Presents an approach to create quantum dot micro-lasers on GaAs substrates with a disk cavity, a bridge-type electrical contact and a supporting mesa formed by wet chemical etching. The bridge structure consists of two mesa structures connected by a suspended gold beam, one of which is actually a microdisk cavity, and the other allows to create an external electrical contact. The proposed method opens up ways to fabricate small-diameter injection microlasers, since it eliminates the need to attach an electrical wire to the upper surface of the microlaser cavity. Microlasers with a bridge electrical contact were fabricated, the formation of a close-to-vertical microcavity sidewall in the active region of the structure was demonstrated and the electroluminescence spectra of the microlasers were obtained in a wide range of pump currents, confirming the possibility of lasing both at room and elevated temperatures.