

УДК 681.7.069.24

ПОВЕРХНОСТНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА И УВЕЛИЧЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ КОЭФФИЦИЕНТА СВЯЗИ

© 2023 г. А. В. Бабичев¹ *, Е. С. Колодезный¹, А. Г. Гладышев¹, Н. Ю. Харин², А. Д. Петрук², В. Ю. Паневин², Г. В. Вознюк^{1,3}, М. И. Митрофанов^{3,4}, С. О. Слипченко³, А. В. Лютецкий³, В. П. Евтихий^{1,3}, Л. Я. Карачинский¹, И. И. Новиков¹, Н. А. Пихтин³, А. Ю. Егоров⁵

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский университет ИТМО”, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”, Санкт-Петербург, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки “Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.babichev@itmo.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022 г.

После доработки 23.12.2022 г.

Принята к публикации 27.02.2023 г.

Представлены результаты исследования характеристик поверхностно-излучающих квантово-каскадных лазеров с кольцевым резонатором с дифракционной решеткой второго порядка. Подбор режимов травления методом прямой ионной литографии позволил увеличить коэффициент связи до 12 см^{-1} . Продемонстрирована лазерная генерация вблизи 7.6 мкм с малой величиной пороговой плотности тока (порядка 0.3 кА/см^2).

DOI: 10.31857/S036767652370148X, EDN: VMALWG

ВВЕДЕНИЕ

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) среднего инфракрасного диапазона представляют особый интерес для систем детектирования химических элементов и различных газов [1–5]. Малые геометрические размеры позволяют интегрировать на одной подложке несколько кольцевых ККЛ и полые волноводы, что дает возможность изготавливать системы одновременного детектирования нескольких газов в смеси. Более того, малые размеры кольцевого резонатора ККЛ наряду с отсутствием зеркал позволяют реализовать непрерывный режим генерации при комнатной температуре с поверхностным выводом излучения [6]. При этом подбор периода дифракционной решетки второго порядка обеспечивает поверхностный вывод излучения по нормали к поверхности ККЛ [7, 8]. Использование двойного сдвига фазы в дифракционной решетке второго порядка позволя-

ет получить сфокусированное излучение с максимумом интенсивности в центре дальнего поля [9–11].

В работе представлены результаты по изготовлению и исследованию характеристик поверхностно-излучающих ККЛ спектрального диапазона $7.5\text{--}8.0 \text{ мкм}$ с кольцевым резонатором и выводом излучения через дифракционную решетку второго порядка с двойным сдвигом фазы. Для формирования дифракционной решетки с увеличенным коэффициентом связи, сформированной на всей поверхности кольцевого резонатора был использован метод травления сфокусированным ионным пучком (метод прямой ионной литографии), являющийся альтернативой методам реактивного ионного травления верхней обкладки волновода [6, 12–15] или селективного жидкостного травления слоя InGaAs с последующим наращиванием слоем InP [16].

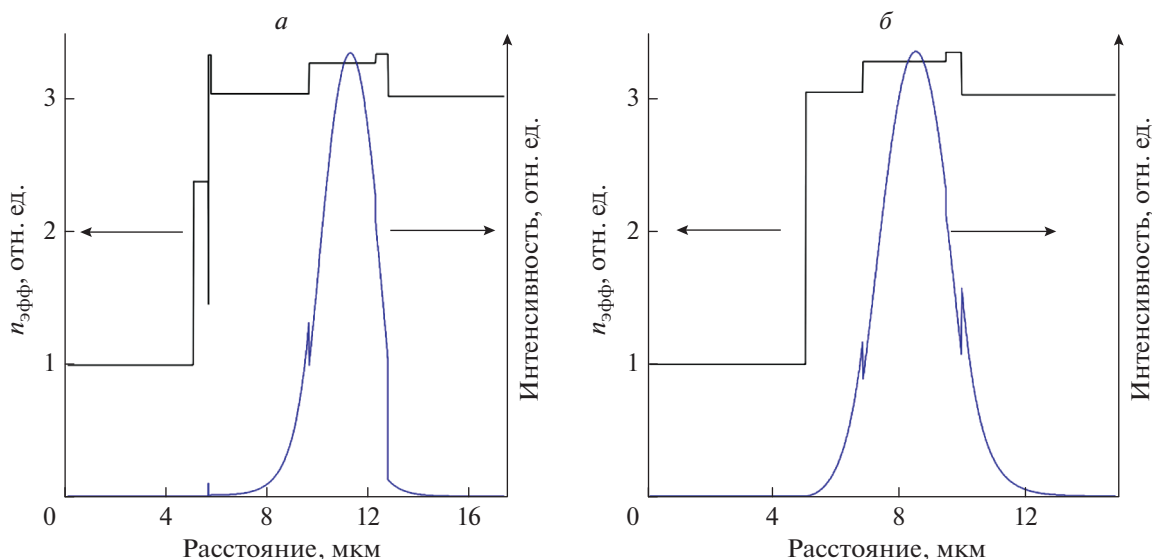


Рис. 1. Профиль показателя преломления (левая ось ординат) и распределение интенсивности основной моды в резонаторе (правая ось ординат) для невытравленной (а) и вытравленной (б) областей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Гетероструктура ККЛ была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке InP с кристаллографической ориентацией $100^\circ \pm \pm 0.5^\circ$ с уровнем легирования $(1-3) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В отличие от ККЛ спектрального диапазона 4–6 мкм [17, 18] для длинноволновых ККЛ отсутствует проблема надбарьерного выброса носителей заряда за счет переходов из прямозонной Г-долины в непрямозонные Х и L долины квантовых ям [19]. Как результат, при построении активных областей ККЛ спектрального диапазона 7–8 мкм возможно применение гетеропары $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$, согласованной по постоянной кристаллической решетке с материалом подложки [20]. Активная область включала 50 периодов, эпитаксия которых осуществлена на поверхности буферного слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 500 нм. Верхняя обкладка волновода была сформирована из слоя InP толщиной 3.9 мкм с уровнем легирования кремнием $1.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Слои $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ суммарной толщиной 120 нм использованы в качестве контактных слоев. Данная конструкция волновода обеспечила фактор оптического ограничения для основной моды (величина Г-фактора) порядка 76%, согласно результатам численного расчета. При формировании кристаллов ККЛ была применена конструкция мезы с двойной канавкой [6, 12]. Ширина кольцевого резонатора вблизи поверхности составила 26 мкм. Монтаж кристалла ККЛ на медный теплоотвод проводился подложкой вниз при помощи индиевого припоя.

Проведен численный расчет коэффициента связи в дифракционной решетке для различной глубины вытравливания штрихов. Величина коэффициента связи k на длине связи L , в теории связанных волн, определялась как “скачок” действительной части эффективного показателя преломления в вытравленной и в не вытравленной областях для случая штрихов дифракционной решетки без последующего заполнения их металлом [6]. На основе расчета значений эффективного показателя преломления n_{eff} для данных двух областей проведена оценка коэффициента связи на основе выражения (1) для различной глубины травления:

$$k = \pi \Delta n_{\text{eff}} / \lambda_B, \quad (1)$$

где Δn_{eff} — изменение действительной части эффективного показателя преломления, а λ_B — длина волны брэгговского резонанса.

Для реализации одночастотного режима генерации в кольцевых ККЛ типичные значения $k \sim 12-16 \text{ см}^{-1}$ и произведение $kL \sim 1.4-1.6$ [21, 22]. В ходе расчетов показано, что увеличение глубины травления до 2.8 мкм (с учетом толщины металлизации) позволяет реализовать величину $k \sim 12 \text{ см}^{-1}$ и $kL \sim 1.4$ для исследованной длины резонатора. При расчете величины n_{eff} учитывался профиль распределения электромагнитного поля поперек сформированного волновода (профиль распределения интенсивности основной моды). На рис. 1 представлен профиль показателя преломления (левая ось ординат), а также профиль распределения интенсивности основной моды (правая ось ординат) для невытравленной

Таблица 1. Основные технологические параметры литографического процесса при формировании дифракционной решетки методом СИП. Расчетная глубина была определена на основании ранее проведенных экспериментов по оценке скоростей травления

Энергия ионов, кэВ	Рабочий ток, пА	Количество экспонирований	Время экспозиции в точке, мкс	Шаг, нм	Суммарная экспозиционная доза, см ⁻²	Расчетная глубина, нм
30	2500	5000	5	150	$1.74 \cdot 10^{18}$	2800 ± 100

(рис. 1а) и вытравленной на глубину 2.8 мкм (рис. 1б) областей.

Перед формированием дифракционной решетки методом прямой литографии сфокусированным ионным пучком (СИП) был проведен анализ кольцевого лазера с помощью электронной и ионной микроскопии на предмет эллиптичности резонатора, а также измерен диаметр резонатора по средней окружности, который составил 374 мкм. Эллиптичности в резонаторе не обнаружено. Формирование дифракционной решетки проводилось в сверхвысоком вакууме с помощью сфокусированного ионного пучка ионов галлия с энергией 30 кэВ. Основные технологические параметры литографического процесса используемые при травлении решетки приведены в табл. 1. Требуемая глубина травления, с учетом толщины металлизации в 600 нм, была фиксирована на уровне 2800 ± 100 нм. Литографический рисунок состоял из прямоугольных штрихов размерами 1.183×16 мкм, расположенных по средней окружности кольцевого лазера радиусом 187 мкм. Сквозность следования штрихов составила 50%. Дифракционная решетка имела сдвиг фазы на величину π при углах 90° и 270° . Травление штрихов дифракционной решетки проводилось с использованием литографической системы NanoMaker. Штрихи решетки, были представлены в литографической структуре в виде линий, обуславливающих траекторию движения ионного пучка при экспонировании поверхности. Диаметр отверстия на поверхности лазера, сформированного ионным пучком с рабочим током 2500 пА за время экспозиции 1 мкс составил ~ 600 нм. Травление на большую глубину (~ 3 мкм) обеспечивалось за счет многократного экспонирования. При достижении необходимой глубины травления ширина штриха решетки (на поверхности лазера) составляла необходимые ~ 1.2 мкм (без учета толщины металлизации). Боковое растравливание обусловлено вкладом ионов из “хвостов” пространственного распределения пучка. Благодаря представлению штрихов решетки в литографической структуре в виде линий, а не прямоугольников, время, затраченное на литографию дифракционной решетки по всей поверхности кольцевого резонатора, удалось сократить до ~ 1.5 ч против ~ 3 ч [23]. Изображение сканирующей электронной микроскопии (СЭМ-изображение)

кристалла ККЛ (вид сверху) после формирования штрихов дифракционной решетки методом прямой ионной литографии представлено на рис. 2. Для снятия высокоразрешающих СЭМ-изображений кристалла ККЛ использован сканирующий электронный микроскоп Tescan MIRA-3.

Спектральные характеристики лазеров измерялись при температуре 77 К с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v. Для регистрации сигнала в режиме пошагового сканирования был использован быстродействующий фотодиод Hg-CdTe, охлаждаемый до температуры кипения жидкого азота, с типичным временем фотоответа ~ 100 нс. Спектральное разрешение составило 0.5 см^{-1} . При исследовании спектральных характеристик лазеров и зависимости интегральной интенсивности излучения от уровня токовой накачки длительности импульсов токовой накачки составили 100 и 70 нс соответственно. Частота следования импульсов зафиксирована на уровне 15 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены измеренные вольт-амперные характеристики, а также зависимость интегральной интенсивности излучения P от уровня токовой накачки I . Пороговый ток I_{th} составил ~ 80 мА, что соответствует пороговой плотности тока $j_{th} \sim 0.3 \text{ кА/см}^2$, пороговое напряжение $U_{th} \sim 12$ В. Низкое значение порогового напряжения в пересчете на период (0.24 В) свидетельствует об отсутствии дополнительного вклада, обусловленного падением напряжения на контактах. Наличие области инжектора в периоде каскада приводит к дополнительному падению напряжения в каскаде. Эквивалент данной величины, выраженный в миллиэлектронвольтах (мэВ), называют дефектным напряжением (defect voltage) в западной литературе, т.к. это дополнительная энергия в сравнении энергией кванта, которая тратится на разогрев гетероструктуры [24]. Оценочное значение дефектного напряжения, определяемого как разница порогового напряжения, выраженного в мэВ, приведенного к одному периоду каскада и энергии кванта составило 78 мэВ, что соответствует расчетному значению энергии между

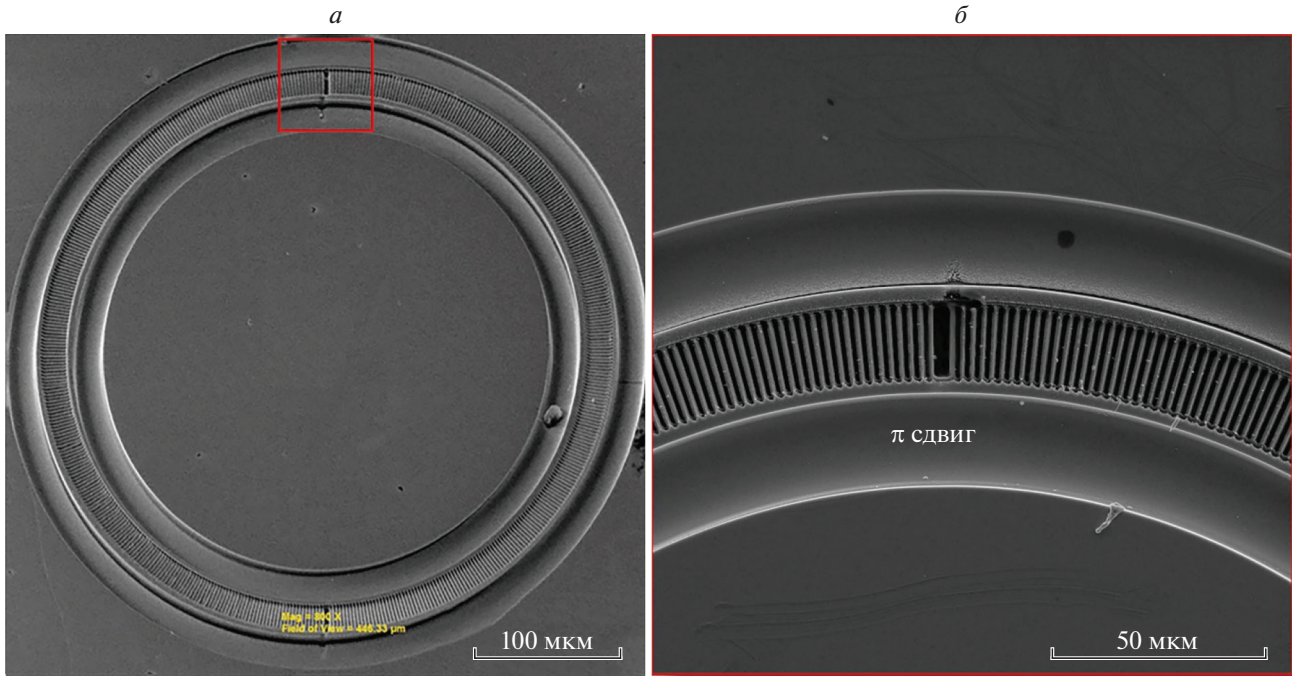


Рис. 2. СЭМ изображения ККЛ с кольцевым резонатором после формирования дифракционной решетки в слоях верхней обкладки волновода методом СИП. Красным квадратом на левой панели выделена область с одним из фазовых сдвигов (на величину π) дифракционной решетки, увеличенное изображение которой представлено на правой панели.

нижним лазерным уровнем и верхним уровнем следующего каскада (77.4 мэВ).

Ранее для полукольцевых ККЛ аналогичного радиуса пороговый ток составил 170 мА ($j_{th} \sim 1.4$ кА/см²) [25]. Повышение уровня токовой накачки до $15I_{th}$ (см. рис. 3) не приводит к насыщению зависимо-

сти интегральной интенсивности излучения от уровня токовой накачки.

Проведена оценка величины полных потерь α_i в кольцевом лазере, определяемой как произведение пороговой плотности тока и величины дифференциального усиления, приведенного к величине фактора оптического перекрытия (произведения $g\Gamma$). Согласно [25], дифференциальное усиление описывается выражением (2):

$$g = 4\pi e \text{abs}(z_{43}^2) / (\epsilon_0 n_{eff} \lambda_0 (2\gamma_{43}) L_p) \tau_4 (1 - \tau_3 / \tau_{43}), \quad (2)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная в вакууме, e – заряд электрона, $2\gamma_{43}$ – ширина (FWHM) спектра спонтанного излучения, L_p – толщина слоев одного периода каскада, z_{43} – матричный элемент взаимодействия, τ_4 – время жизни на верхнем уровне, τ_3 – время жизни на нижнем уровне, τ_{43} – отношение времен. С учетом того, что согласно результатам численных оценок $\tau_4 = 1.96$ пс, $\tau_3 = 0.28$ пс, $\tau_{43} = 4.94$ пс, $z_{43} = 2.43$ нм, $n_{eff} = 3.215$. С учетом этого величина дифференциального усиления $g \sim 59$ см/кА. Тогда для расчетной величины $\Gamma = 76\%$ в исследуемой конструкции волновода ККЛ произведение $g\Gamma \sim 45$ см/кА. На основе полученного значения $g\Gamma$ оценочное значение величины полных внутренних потерь α_i [26] в

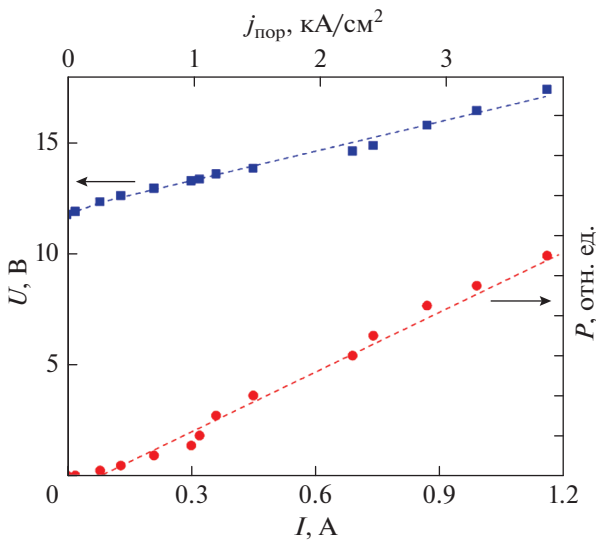


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика (левая ось ординат) и зависимость интегральной интенсивности излучения от уровня токовой накачки (правая ось ординат), измеренные при температуре 77 К.

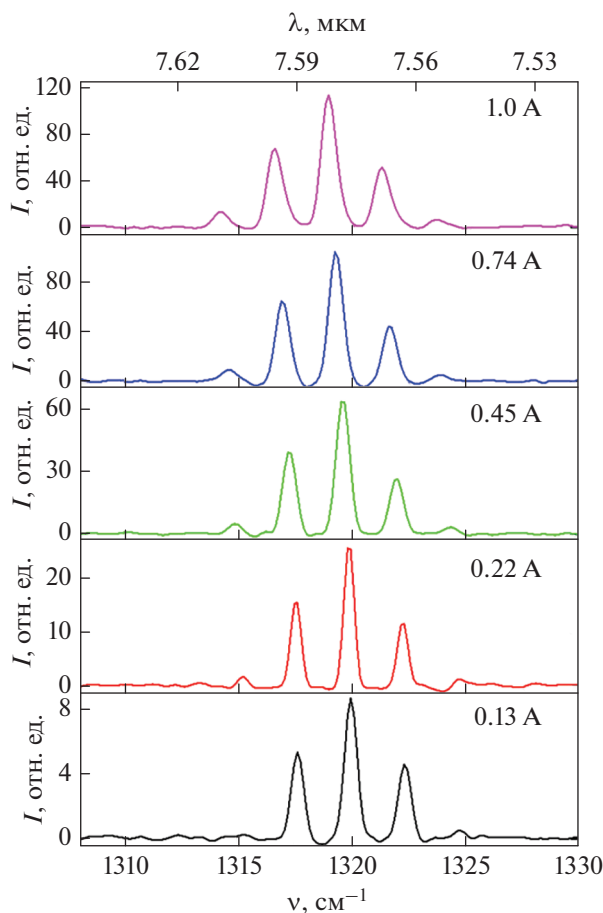


Рис. 4. Спектры многомодовой лазерной генерации, измеренные при температуре 77 К.

кольцевом лазере составило $\sim 14 \text{ см}^{-1}$. Как результат, Q фактор, определяемый на основе выражения (4) [27] составил 1900:

$$Q = 2\pi n_{eff} / \lambda \alpha_i. \quad (3)$$

Результаты измерения спектров лазерной генерации представлены на рис. 4. Вблизи порогового значения тока спектр представлен тремя линиями, расположенными вблизи длины волны $\lambda = 7.6 \text{ мкм}$ (соответствует волновому числу $\nu = 1316 \text{ см}^{-1}$, см. рис. 4). Данная длина волны излучения соответствует энергии кванта 163 мэВ, что хорошо соответствует расчетному значению энергии излучательных переходов при температуре 77 К для исследуемой конструкции активной области. Межмодовое расстояние соответствует случаю мод шепчущей галереи для кольцевого лазера с радиусом 187 мкм. Проведена оценка величины группового показателя преломления n_{gr} , который составил 3.36. Ранее для полукольцевых ККЛ аналогичного радиуса спектр лазерной генерации был представлен 10 модами шепчущей галереи вблизи порогового значения [26], а увели-

чение уровня токовой накачки до 1.0 А приводило к возникновению дополнительных азимутальных мод высшего порядка и существенному увеличению полной ширины спектра генерации (до 400 нм или 71 см^{-1} [26]). В то же время, данного эффекта уширения спектра генерации, наблюдаемого в полукольцевых ККЛ, не наблюдалось в исследованных ККЛ, что обусловлено дополнительной селекцией мод, вызванной формированием дифракционной решетки на поверхности кольцевого резонатора (дополнительными селективными оптическими потерями). С ростом уровня токовой накачки наблюдается длинноволновый сдвиг положения оптических мод, что может быть обусловлено уменьшением разрыва зоны проводимости на гетерогранице наряду с эффектом Штарка [24]. С учетом величины коэффициента сдвига длины волны генерации лазера с температурой для аналогичной конструкции гетероструктуры ($-0.09 \text{ см}^{-1}/\text{K}$ [28]) проведена оценка величины разогрева лазера во время действия импульса накачки, которая составила порядка 10 К при уровне накачки в 1 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты по оптимизации технологических режимов изготовления дифракционной решетки методом прямой ионной литографии за счет изменения стратегии сканирования сфокусированным ионным пучком поверхности лазера при формировании штрихов решетки. Продемонстрирована поверхностная лазерная генерация вблизи 7.6 мкм в квантово-каскадных лазерах с кольцевым резонатором с увеличенным до 12 см^{-1} коэффициентом связи дифракционной решетки и оптической моды. Несмотря на наблюдаемую селекцию мод шепчущей галереи, одночастотный режим генерации не достигнут, что может быть обусловлено недостаточной вертикальностью вытравленных штрихов дифракционной решетки и является предметом дальнейших исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10285 – Е.С. Колодезный, А.В. Баби́чев (Университет ИТМО) – эпитаксия гетероструктур, формирование кристаллов и исследование характеристик лазеров; проект № 21-12-00304 – В.П. Евтихийев (Университет ИТМО) – подбор режимов травления методом прямой ионной литографии), а также программы “Приоритет 2030” (Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков (Университет ИТМО) – исследование образцов методом сканирующей электронной микроскопии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Harrer A., Szedlak R., Schwarz B. et al. // Sci. Reports. 2016. V. 6. No. 1. Art. No. 21795.*

2. *Szedlak R., Hayden J., Martín-Mateos P. et al.* // Opt. Engin. 2018. V. 57. No. 1. Art. No. 011005.
3. *Tütüncü E., Kokoric V., Szedlak R. et al.* // Analyst. 2016. V. 141. No. 22. P. 6202.
4. *Szedlak R., Harrer A., Holzbauer M. et al.* // ACS Photonics. 2016. V. 3. No. 10. P. 1794.
5. *Hinkov B., Pilat F., Lux L. et al.* // Nature Commun. 2022. V. 13. No. 1. Art. No. 4753.
6. *Wu D.H., Razeghi M.* // APL Materials. 2017. V. 5. No. 3. Art. No. 035505.
7. *Mujagić E., Hoffmann L.K., Schartner S. et al.* // Proc. SPIE. 2009. V. 7230. Art. No. 723015.
8. *Mujagić E., Hoffmann L.K., Schartner S. et al.* // Proc. CLEO/QELS 2009 (Baltimore, 2009) Art. No. CThT4.
9. *Schwarze C., Szedlak R., Ahn S.I. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. No. 8. Art. No. 081101.
10. *Szedlak R., Schwarzer C., Zederbauer T. et al.* // Opt. Express. 2014. V. 22. No. 13. P. 15829.
11. *Szedlak R., Holzbauer M., MacFarland D. et al.* // Sci. Reports. 2015. V. 5. Art. No. 16668.
12. *Piccardo M., Schwarz B., Kazakov D. et al.* // Nature. 2020. V. 582. No. 7812. P. 360.
13. *Schwarzer C., Mujagić E., Yao Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 97. No. 7. Art. No. 071103.
14. *Holzbauer M., Szedlak R., Detz H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111. No. 17. Art. No. 171101.
15. *Knötig H., Hinkov B., Weih R. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. No. 13. Art. No. 131101.
16. *Bai Y., Tsao S., Bandyopadhyay N. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. No. 26. Art. No. 261104.
17. *Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Дюделев В.В. и др.* // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 9. С. 35; *Babichev A.V., Gladyshev A.G., Dudelev V.V. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46. No. 5. P. 442.
18. *Дюделев В.В., Михайлов Д.А., Бабичев А.В. и др.* // Квант. электрон. 2020. Т. 50. № 11. С. 989; *Dudelev V.V., Mikhailov D.A., Babichev A.V. et al.* // Quant. Electron. 2020. V. 50. No. 11. P. 989.
19. *Lyakh A., Maulini R., Tsekoun A. et al.* // Opt. Express. 2012. V. 20. No. 22. P. 24272.
20. *Бабичев А.В., Гладышев А.Г., Курочкин А.С. и др.* // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 8. С. 31; *Babichev A.V., Gladyshev A.G., Kurochkin A.S. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. No. 4. P. 398.
21. *Brandstetter M., Genner A., Schwarzer C. et al.* // Opt. Express. 2014. V. 22. No. 3. P. 2656.
22. *Mujagić E., Schwarzer C., Yao Y. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. No. 14. Art. No. 141101.
23. *Бабичев А.В., Михайлов Д.А., Колодезный Е.С. и др.* // ФТП. 2022. Т. 56. № 9. С. 908; *Babichev A.V., Mikhailov D.A., Kolodeznyi E.S. et al.* // Semiconductors. 2022. V. 56. No. 9. P. 689.
24. *Bai Y., Slivken S., Kuboya S. et al.* // Nature Photonics. 2010. V. 4. No. 2. P. 99.
25. *Gmachl C., Tredicucci A., Capasso F. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. No. 24. P. 3130.
26. *Бабичев А.В., Пашнев Д.А., Гладышев А.Г. и др.* // Опт. и спектроск. 2020. Т. 128. № 8. С. 1165; *Babichev A.V., Pashnev D.A., Gladyshev A.G. et al.* // Opt. Spectrosc. 2020. V. 128. No. 8. P. 1187.
27. *Faist J., Gmachl C., Striccoli M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. No. 17. P. 2456.
28. *Бабичев А.В., Колодезный Е.С., Гладышев А.Г. и др.* // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. № 5. С. 7; *Babichev A.V., Kolodeznyi E.S., Gladyshev A.G. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2022. V. 48. No. 3. P. 6.

Surface emitting quantum-cascade lasers with a second-order grating and increased coupling coefficient

A. V. Babichev^{a,*}, E. S. Kolodeznyi^a, A. G. Gladyshev^a, N. Yu. Kharin^b, A. D. Petruk^b, V. Yu. Panevin^b, G. V. Voznyuk^{a,c}, M. I. Mitrofanov^{c,d}, S. O. Slipchenko^c, A. V. Lyutetskii^c, V. P. Evtikhiev^{a,c}, L. Ya. Karachinsky^a, I. I. Novikov^a, N. A. Pikhtin^c, A. Yu. Egorov^e

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101 Russia

^b Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251 Russia

^c Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

^d Submicron Heterostructures for Microelectronics Research & Engineering Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

^e Alferov Saint Petersburg National Research Academic University of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 194021 Russia

*e-mail: a.babichev@itmo.ru

The results of studying the characteristics of surface-emitting quantum-cascade ring lasers with a second-order grating are presented. The selection of etching receipt by ion beam lithography made it possible to increase the coupling coefficient to 12 cm^{-1} . Lasing close to $7.6 \mu\text{m}$ with a low threshold current density (about 0.3 kA/cm^2) is demonstrated.