

Исследование пространственных характеристик излучения поверхностно-излучающих квантово-каскадных лазеров с кольцевым резонатором

© А.В. Бабичев¹, Д.А. Михайлов², Д.В. Чистяков², Е.С. Колодезный¹, А.Г. Гладышев¹, Г.В. Вознюк²,
М.И. Митрофанов^{2,4}, Д.В. Денисов³, С.О. Слипченко², А.В. Лютецкий², В.В. Дюделев², В.П. Евтихийев²,
Л.Я. Карачинский¹, И.И. Новиков¹, Н.А. Пихтин², А.Ю. Егоров⁵, Г.С. Соколовский²

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО,
197101 Санкт-Петербург, Россия

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

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет
им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 1 марта 2022 г.

В окончательной редакции 24 марта 2022 г.

Принята к публикации 24 марта 2022 г.

Представлены результаты исследований квантово-каскадных лазеров с кольцевым резонатором с поверхностным выводом излучения за счет сформированной в слоях верхней обкладки волновода дифракционной решетки второго порядка. Продемонстрирована поверхностная лазерная генерация вблизи 7.85 мкм с малой плотностью порогового тока, порядка 3.8 кА/см², в сравнении с полосковыми квантово-каскадными лазерами аналогичной длины. Представлены результаты измерений распределения интенсивностей ближнего и дальнего полей при различных уровнях токовой накачки. Оценочное значение угла вывода излучения относительно нормали к поверхности находится в диапазоне (5.7–6.7)°.

Ключевые слова: кольцевой резонатор, дифракционная решетка, прямая литография сфокусированным ионным пучком, сверхрешетки, квантово-каскадный лазер, эпитаксия, фосфид индия.

DOI: 10.21883/FTP.2022.06.52597.9825

1. Введение

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) спектрального диапазона 8–12 мкм представляют интерес для создания систем распознавания химических элементов (chemical fingerprinting) [1,2], в том числе за счет возможности интеграции на одном чипе [3,4]. В силу наличия ТМ поляризации излучения в лазерах на основе межподзонных переходов [5], реализация поверхностного вывода излучения возможна за счет формирования одномерной [6,7] или двумерной дифракционной решетки (на основе фотонных кристаллов [8,9]). В то же время реализация генерации в непрерывном режиме токовой накачки в конструкции фотонных кристаллов затруднительна. В свою очередь использование конструкции кольцевого резонатора и дифракционной решетки 2-го порядка на всей поверхности резонатора позволяет реализовать генерацию в непрерывном режиме токовой накачки при комнатной температуре с выходной оптической мощностью ~ 0.2 Вт [10,11].

В ККЛ с кольцевым резонатором дифракционная решетка используется как для селекции оптических мод,

так и для поверхностного вывода излучения. Кроме того, возможно использовать конструкцию кольцевого резонатора для селекции азимутальных мод [12–15], а распределенный брэгговский отражатель (РБО) — для поверхностного вывода излучения.

Традиционно секции РБО используются для селекции оптических мод в полосковых лазерах [16–18], а использование дополнительных секций РБО позволяет исключить эффект неконтролируемого „набега“ фазы при скальвании полосковых лазеров [19]. Формирование дифракционной решетки 2-го порядка между двух секций РБО позволяет осуществить поверхностный вывод излучения [20,21]. Результаты по влиянию дифракционной решетки 2-го порядка на параметры поверхностного вывода излучения в полосковых лазерах представлены в работе [7]. Однако результаты для ККЛ в кольцевой конструкции не были рассмотрены.

В настоящей работе представлены результаты исследования ближнего и дальнего поля ККЛ с кольцевым резонатором с выводом излучения через дифракционную решетку 2-го порядка, сформированную на поверхности кольцевого резонатора методом пря-

мой ионной литографии сфокусированным ионным пучком.

2. Экспериментальные образцы

Гетероструктура ККЛ была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии [22]. На подложке InP с кристаллографической ориентацией $(100) \pm 0.5^\circ$ был сформирован буферный слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 500 нм. Слои каскада были сформированы на основе гетеропары $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ в конструкции с двухфононным опустошением нижнего уровня. Суммарная толщина слоев активной области составила 2,63 мкм. Верхняя обкладка волновода была сформирована на основе фосфида индия толщиной 3,9 мкм с уровнем легирования $1.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Контактные слои $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с переменным уровнем легирования $1.0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $1.0 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ имели суммарную толщину 120 нм. При формировании кристаллов кольцевых резонаторов были использованы следующие шаги процессирования: жидкостное травление мезы, напыление диэлектрика, открытие окна в диэлектрике, напыление слоев верхней металлизации, утончение подложки, напыление слоев нижней металлизации. Травление мезоструктуры проводилось с затравом в подложку. Радиус кольцевого резонатора, измеренный в средней точке, составил 191 мкм. Ширина кольцевого резонатора вблизи поверхности — 20 мкм. Для проведения измерений монтаж кристалла кольцевого резонатора проводился подложкой вниз на медный теплоотвод при помощи индиевого припоя.

Формирование дифракционной решетки на сегменте резонатора проводилось в сверхвысоком вакууме сфокусированным ионным пучком галлия с энергией ионов 30 кэВ и рабочем токе 490 пА [23]. Ионная доза при травлении штрихов дифракционной решетки составляла $1.4 \cdot 10^{11} \text{ пК/см}^2$. Период дифракционной решетки в угловых координатах составил 0.71° (соответствует $\Lambda \sim 2.367 \text{ мкм}$ при радиусе кольцевого резонатора 191 мкм). Сквозность — 60%. Глубина травления штрихов составила $2097 \pm 100 \text{ нм}$ (с учетом толщины верхних слоев металлизации) (рис. 1). Выбор глубины травления определялся в ходе численных расчетов. Ранее было показано, что использование сильного режима связывания приводит к генерации на модах высшего порядка [10,11,24]. Расчетная величина коэффициента связывания κ на длине связывания L в теории связанных волн (coupled-mode theory) [25]) определяется как „скачок“ действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления в вытравленной и не вытравленной областях дифракционной решетки. Для реализации одночастотного режима генерации типичные значения $\kappa \sim 16 \text{ см}^{-1}$ ($\kappa L \sim 1.6$) [26] для случая связывания по действительной части и $\kappa = (1.52 + 4.91i) \text{ см}^{-1}$ ($\kappa L = 0.4 + 1.2i$) для случая комплексного связывания [11]. Для исследуемой дифракционной решетки расчетная величина κ составила $\sim 3.9 \text{ см}^{-1}$. Длина области

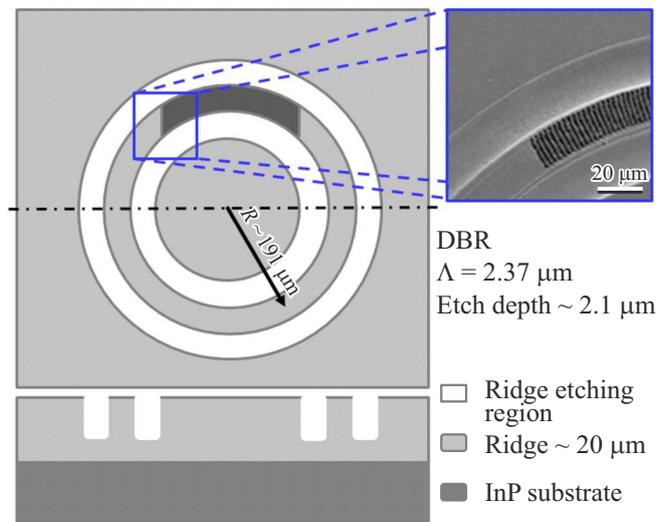


Рис. 1. Схематический вид ККЛ с кольцевым резонатором (вид сверху и сечение). На вставке — изображение сканирующей электронной микроскопии сформированной дифракционной решетки (вид сверху).

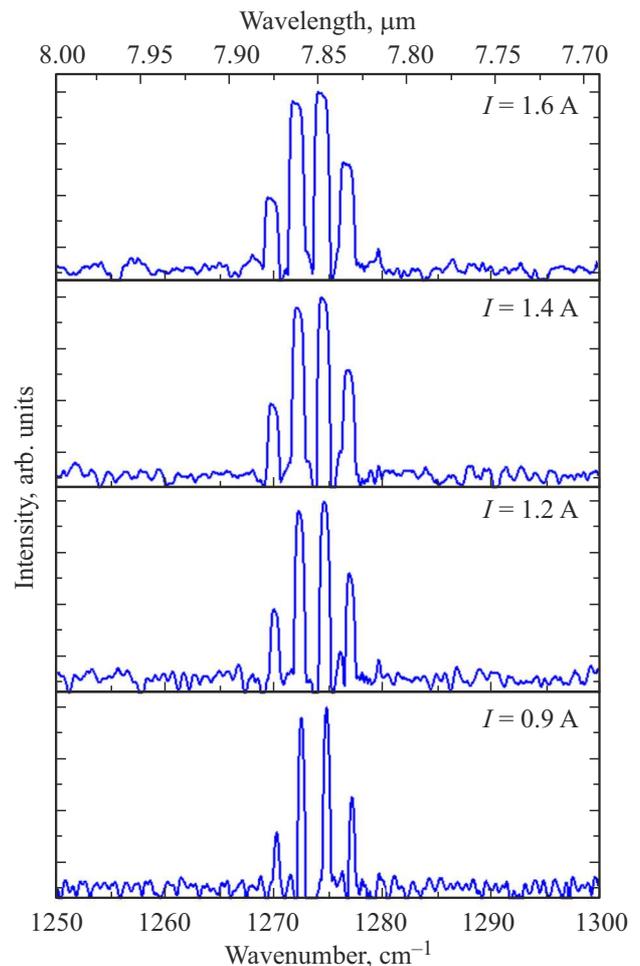


Рис. 2. Спектры поверхностной лазерной генерации ККЛ с кольцевым резонатором.

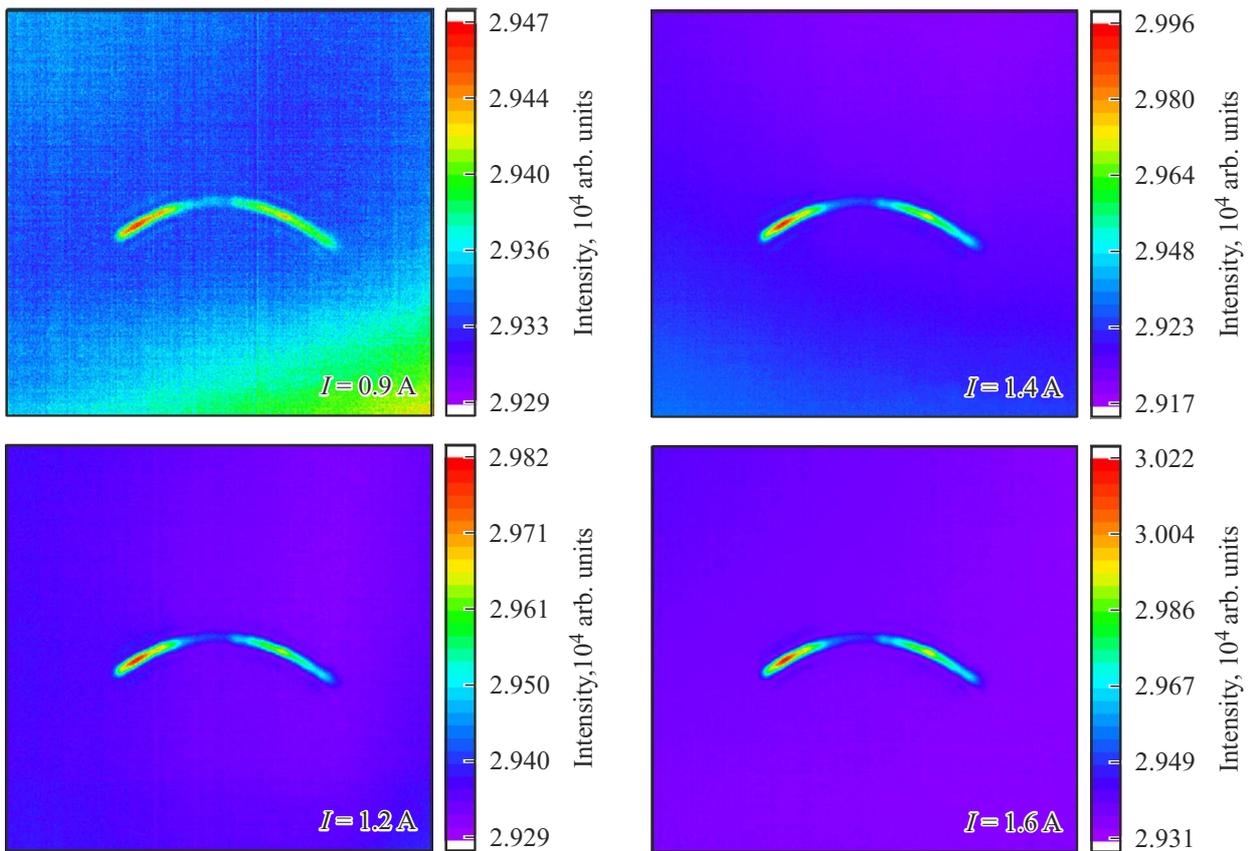


Рис. 3. Распределение интенсивности излучения в зоне ближнего поля. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.)

связывания L — 223 мкм. Величина $\text{Abs}(\kappa L) \sim 0.1$. При формировании же дифракционной решетки на всей поверхности резонатора величина $\text{Abs}(\kappa L)$ составит ~ 0.5 .

Спектры генерации измерялись с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 70v при температуре 294 К. Детектирование оптического сигнала производилось с помощью фотодиода HgCdTe. Спектральное разрешение составляло 0.16 см^{-1} . При исследовании спектров излучения длительность импульсов тока накачки τ составляла 200 нс, а при исследовании вольт-, ватт-амперных характеристик $\tau = 70$ нс. Частота следования импульсов f была 25 кГц.

Для регистрации пространственных характеристик в зоне ближнего и дальнего поля была использована болометрическая камера Dataray WinCamD-IR-BB с разрешением 640×480 пикселей (размер пикселя $17 \times 17 \text{ мкм}^2$). При исследовании ближнего поля изображение проецировалось на поверхность камеры с помощью линзы с фокусным расстоянием 3 мм и числовой апертурой 0.56. Коэффициент увеличения составлял 200. При исследовании дальнего поля изображение регистрировалось непосредственно (без использования фокусирующих линз) болометрической камерой на расстоянии 7.5 мм. Длительность импульсов накачки при измерении пространственных характеристик составила 70 нс, частота повто-

рения импульсов — 48 кГц. Все измерения проведены при температуре 291°C .

3. Результаты и обсуждение

Нормированные спектры поверхностной лазерной генерации при различных уровнях токовой накачки представлены на рис. 2 в полулогарифмическом масштабе. Вблизи порогового значения тока $I_{\text{th}} = 0.8 \text{ A}$ (пороговая плотность тока составила 3.8 кА/см^2) спектры генерации представлены четырьмя линиями (модами) вблизи 7.85 мкм . Межмодовое расстояние составило $\sim 2.3 \text{ см}^{-1}$, что соотносится со случаем рассмотрения мод шепчущей галереи. Была проведена оценка группового коэффициента отражения, значение которого составило $n_{\text{group}} \sim 3.39$. Ранее было показано [27], что при значении ширины полоска кольцевого резонатора $\sim 4 \text{ мкм}$ наблюдается существенное увеличение оптических потерь для поперечных (радиальных) мод высшего порядка, что приводит к одночастотной генерации. В свою очередь при ширине полоска кольцевого резонатора $\sim 10 \text{ мкм}$ в спектре генерации может присутствовать вторая радиальная мода. В работах [27,28] было показано наличие второй линии генерации, отстоящей

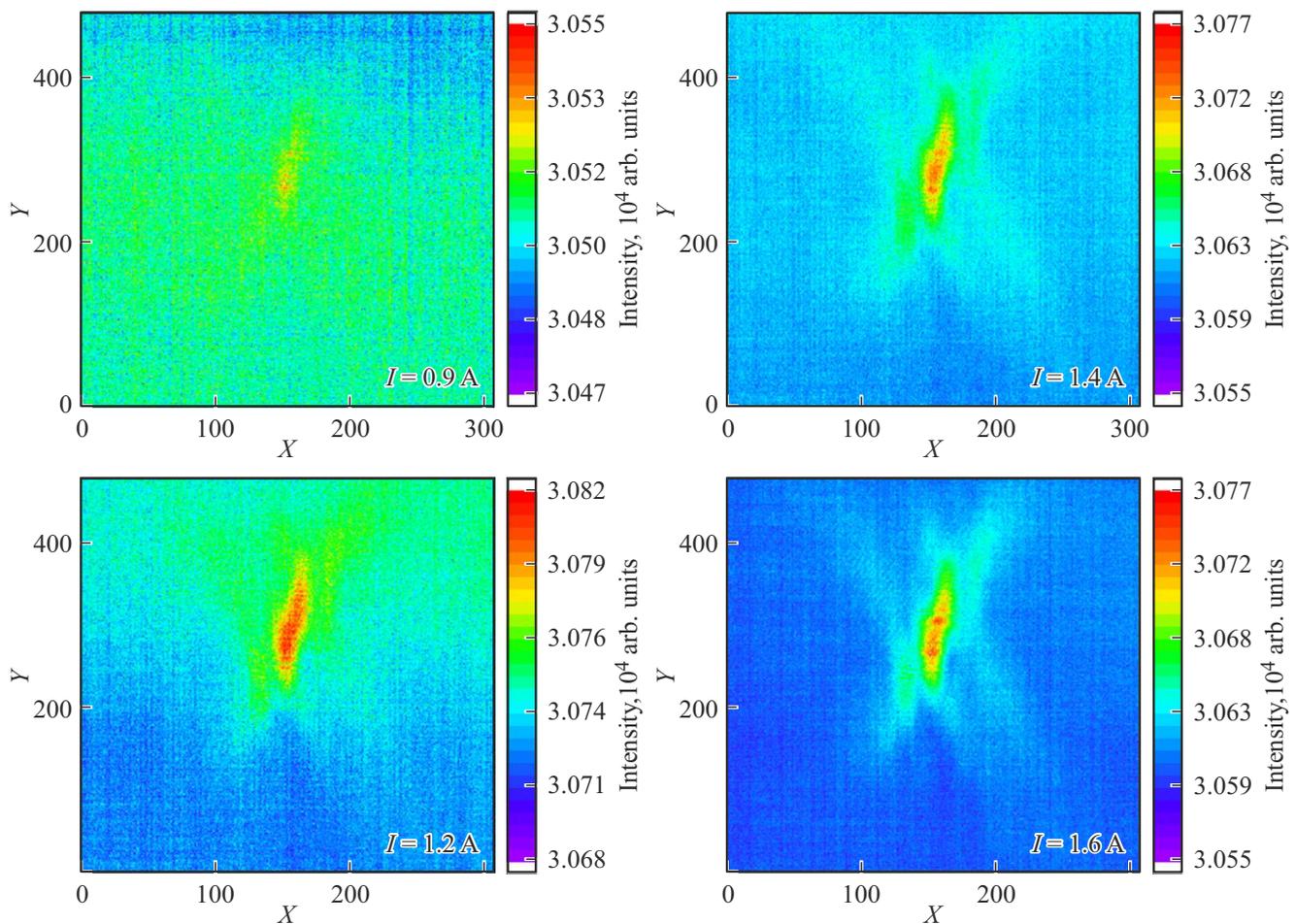


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения в зоне ближнего поля. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.)

на 43 нм от фундаментальной моды. В исследованных нами образцах данного эффекта не наблюдалось. В работе [29] показано, что при реализации слабого режима связывания ($\kappa \sim 0.1 \text{ см}^{-1}$, $\text{Abs}(\kappa L) \sim 0.01$) в спектре наблюдаются продольные (азимутальные) моды высшего порядка. В связи с этим можно высказать предположение, что многомодовый характер лазерной генерации в исследуемых образцах, где оценочная величина $\text{Abs}(\kappa L)$ на порядок выше, обусловлен либо несоответствием спектрального положения брэгговской длины волны максимуму спектра усиления [30], либо относительно малой величиной оптических потерь, вносимых дифракционной решеткой. Ранее для полукольцевых ККЛ с радиусом 191 мкм и аналогичной конструкцией гетероструктуры авторами продемонстрирована одночастотная лазерная генерация на длине волны излучения $\lambda = 7.778 \text{ мкм}$ [15]. Суммируя, наблюдается несоответствие спектрального положения брэгговской длины волны максимуму спектра усиления (7.778 мкм).

Увеличение уровня токовой накачки приводит к длинноволновому сдвигу длины волны излучения. С учетом величины температурного сдвига длины волны излу-

чения для представленной конструкции гетероструктуры в полосковом лазере ($\Delta\lambda/\Delta T = 0.56 \text{ нм/К}$ [31]) проведена оценка увеличения температуры лазера, при увеличении токовой накачки с 0.9 до 1.6 А, которая составила $\sim 6^\circ\text{C}$. Детальный анализ сдвига длины волны излучения с температурой следует проводить в одночастотном режиме генерации [26].

Результаты исследования распределения интенсивности излучения в зоне ближнего поля представлены на рис. 3. Вблизи порога генерации размеры (суммарная длина) области излучения соотносятся с размерами области сегмента кольцевого резонатора с дифракционной решеткой ($\sim 67^\circ$). В то же время стоит отметить наличие „провала“ интенсивности, в связи с чем наблюдается разделение поля на две области в направлении 20° и 32° соответственно. Ранее для ККЛ с дифракционной решеткой, сформированной на всей длине резонатора, ближнее поле было представлено наличием однородного излучения по всему периметру кольцевого резонатора [32,33]. Увеличение тока накачки до $2I_{\text{th}}$ не привело к перераспределению интенсивности излучения и исчезновению провала в интенсивности,

Зависимость угла вывода излучения от уровня токовой накачки лазера

Уровень токовой накачки, А	λ_0 , мкм/ α_0 , град.	λ_1 , мкм/ α_1 , град.	λ_2 , мкм/ α_2 , град.	λ_3 , мкм/ α_3 , град.
0.9	7.873/–6.55	7.858/–6.19	7.844/–5.85	7.830/–5.50
1.2	7.874/–6.58	7.860/–6.23	7.845/–5.87	7.831/–5.53
1.4	7.875/–6.60	7.861/–6.26	7.847/–5.92	7.832/–5.55
1.6	7.877/–6.71	7.863/–6.31	7.849/–5.97	7.834/–5.60

что может быть обусловлено неоднородностью параметров дифракционной решетки в силу значительной глубины вытравливаемой РБО, аналогично результатам, представленным для межзонных каскадных лазеров с кольцевым резонатором [27].

Результаты исследования распределения интенсивности дальнего поля представлены на рис. 4. Ранее было показано, наличие многомодовой генерации приводит к существенному видоизменению распределения интенсивности в дальнем поле кольцевого резонатора и увеличению полной ширины, измеренной на полувысоте с 3 до 10° [34].

Угол вывода излучения α относительно нормали к поверхности будет определяться на основе выражения $\alpha = \arcsin(\text{Re}(n_{\text{eff}}/n_0) - \lambda/(\Delta n_0))$, где n_{eff} — эффективный показатель преломления лазера, n_{air} — эффективный показатель преломления второй среды, в данном случае воздуха, λ — длина волны лазерной генерации [7,34]. На основе данного выражения была проведена оценка угла вывода излучения α_i (см. таблицу). Эффективный показатель преломления можно оценить на основе выражения $n_{\text{eff}} = \lambda/\Lambda$, где λ — длина волны излучения в одночастотном режиме генерации [29]. В силу многомодового режима генерации в исследуемых ККЛ при оценке угла вывода излучения использовано расчетное значение n_{eff} . Показано, что при наличии в спектре четырех линий генерации (азимутальных оптических мод) угол вывода излучения варьируется в диапазоне $-(5.5-6.7)^\circ$, что может приводить к видоизменению интенсивности излучения в дальнем поле, представленной на рис. 4.

4. Заключение

Продемонстрирована поверхностная лазерная генерация вблизи 7.85 мкм. Лазер с кольцевым резонатором демонстрирует малую плотность порогового тока (3.8 кА/см^2) по сравнению с полосковыми лазерами аналогичной длины. Многомодовый характер генерации не позволяет корректно интерпретировать полученные результаты распределения интенсивности в дальнем поле кольцевого ККЛ вследствие наличия излучения на нескольких длинах волн с характерными углами расходимости для каждой длины волны. Оценочные значения угла вывода излучения относительно нормали к поверхности находятся в диапазоне $(5.7-6.7)^\circ$.

В дальнейшем использование большего коэффициента связывания по действительной части (index coupling) либо реализация комплексного механизма связывания (complex-coupling [11]) должны позволить реализовать режим одночастотной генерации в кольцевом ККЛ.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10285).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [34] A. Harrer, R. Szedlak, B. Schwarz, H. Moser, T. Zederbauer, D. MacFarland, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, B. Lendl, G. Strasser. *Sci. Rep.*, **6** (1), 31236 (2016).
- [2] F. Kapsalidis, M. Shahmohammadi, M.J. Süess, J.M. Wolf, E. Gini, M. Beck, M. Hundt, B. Tuzson, L. Emmenegger, J. Faist. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **124** (6), 107 (2018).
- [3] R. Szedlak, J. Hayden, P. Martín-Mateos, M. Holzbauer, A. Harrer, B. Schwarz, B. Hinkov, D. MacFarland, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, P. Acedo, B. Lendl, G. Strasser. *Opt. Eng.*, **57** (1), 011005 (2017).
- [4] R. Szedlak, A. Harrer, M. Holzbauer, B. Schwarz, J.P. Waclawek, D. MacFarland, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, B. Lendl, G. Strasser. *ACS Photonics*, **3** (10), 1794 (2016).
- [5] O. Spitz, A. Herdt, M. Carras, W. Elsässer, F. Grillot. In: *OSA Tech. Digest* (San Jose, CA, USA, Optica Publishing Group, 2019), paper SW3N.2. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2019.SW3N.2
- [6] C. Pflügl, M. Austerer, W. Schrenk, S. Golka, G. Strasser, R. Green, R.P. Green, L.R. Wilson, J.W. Cockburn, A.B. Krysa, J.S. Roberts. *Appl. Phys. Lett.*, **86** (21), 211102 (2005).
- [7] E. Cristobal, H. Shu, A. Lyakh. *AIP Advances*, **11** (11), 115221 (2021).
- [8] Z. Wang, Y. Liang, B. Meng, Y.T. Sun, G. Omanakuttan, E. Gini, M. Beck, I. Sergachev, S. Lourduoss, J. Faist, G. Scalari. *Opt. Express*, **27** (16), 22708 (2019).
- [9] S. Saito, R. Hashimoto, K. Kaneko, T. Kakuno, Y. Yao, N. Ikeda, Y. Sugimoto, T. Mano, T. Kuroda, H. Tanimura, S. Takagi, K. Sakoda. *Appl. Phys. Express*, **14** (10), 102003 (2021).

- [10] Y. Bai, S. Tsao, N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Q.Y. Lu, D. Caffey, M. Pushkarsky, T. Day, M. Razeghi. *Appl. Phys. Lett.*, **99** (26), 261104 (2011).
- [11] D.H. Wu, M. Razeghi. *APL Materials*, **5** (3), 035505 (2017).
- [12] P.Q. Liu, K. Sladek, X. Wang, J.Y. Fan, C.F. Gmachl. *Appl. Phys. Lett.*, **99** (24), 241112 (2011).
- [13] P.Q. Liu, X. Wang, J.Y. Fan, C.F. Gmachl. *Appl. Phys. Lett.*, **98** (6), 061110 (2011).
- [14] A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, V.V. Dudelev, E.S. Kolodeznyi, G.S. Sokolovskii, V.E. Bugrov, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, A.S. Ionov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, N.A. Pikhtin, A.Y. Egorov. *Techn. Phys. Lett.*, **45** (4), 398 (2019).
- [15] A.V. Babichev, D.A. Pashnev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, L.Y. Karachinsky, A.Y. Egorov. *Opt. Spectrosc.*, **128** (8), 1187 (2020).
- [16] A.J. Ward, D.J. Robbins, D.C.J. Reid, N.D. Whitbread, G. Busico, P.J. Williams, J.P. Duck, D. Childs, A.C. Carter. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **16** (11), 2427 (2004).
- [17] A. Sadeghi, P.Q. Liu, X. Wang, J. Fan, M. Troccoli, C.F. Gmachl. *Opt. Express*, **21** (25), 31012 (2013).
- [18] A.V. Babichev, D.A. Pashnev, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, G.V. Voznyuk, L.Y. Karachinsky, I.I. Novikov, M.I. Mitrofanov, V.P. Evtikhiev, D.A. Firsov, L.E. Vorob'ev, N.A. Pikhtin, A.Y. Egorov. *Techn. Phys. Lett.*, **46** (4), 312 (2020).
- [19] B.G. Lee, M.A. Belkin, R. Audet, J. MacArthur, L. Diehl, C. Pflügl, F. Capasso, D.C. Oakley, D. Chapman, A. Napoleone, D. Bour, S. Corzine, G. Höfler, J. Faist. *Appl. Phys. Lett.*, **91** (23), 231101 (2007).
- [20] P. Jouy, C. Bonzon, J. Wolf, E. Gini, M. Beck, J. Faist. *Appl. Phys. Lett.*, **106** (7), 071104 (2015).
- [21] C. Boyle, C. Sigler, J.D. Kirch, D.F. Lindberg, T. Earles, D. Botez, L.J. Mawst. *Appl. Phys. Lett.*, **108** (12), 121107 (2016).
- [22] A.Y. Egorov, A.V. Babichev, L.Y. Karachinsky, I.I. Novikov, E.V. Nikitina, M. Tchernycheva, A.N. Sofronov, D.A. Firsov, L.E. Vorobjev, N.A. Pikhtin, I.S. Tarasov. *Semiconductors*, **49** (11), 1527 (2015).
- [23] А.В. Бабичев, Е.С. Колодезный, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, Г.В. Вознюк, М.И. Митрофанов, Н.Ю. Харин, В.Ю. Паневин, С.О. Слипенченко, А.В. Лютецкий, В.П. Евтихийев, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров. *ФТП*, **55** (7), 602 (2021).
- [24] M. Razeghi, W. Zhou, S. Slivken, Q.Y. Lu, D. Wu, R. McClintock. *Appl. Optics*, **56** (31), H30 (2017).
- [25] H. Kogelnik, C.V. Shank. *J. Appl. Phys.*, **43** (5), 2327 (1972).
- [26] M. Brandstetter, A. Genner, C. Schwarzer, E. Mujagic, G. Strasser, B. Lendl. *Opt. Express*, **22** (3), 2656 (2014).
- [27] H. Knötig, B. Hinkov, R. Weih, S. Höfling, J. Koeth, G. Strasser. *Appl. Phys. Lett.*, **116** (13), 131101 (2020).
- [28] M. Holzbauer, R. Szedlak, H. Detz, R. Weih, S. Höfling, W. Schrenk, J. Koeth, G. Strasser. *Appl. Phys. Lett.*, **111** (17), 171101 (2017).
- [29] C. Schwarzer, E. Mujagić, S.I. Ahn, A.M. Andrews, W. Schrenk, W. Charles, C. Gmachl, G. Strasser. *Appl. Phys. Lett.*, **100** (19), 191103 (2012).
- [30] E. Mujagić, M. Nobile, H. Detz, W. Schrenk, J. Chen, C. Gmachl, G. Strasser. *Appl. Phys. Lett.*, **96** (3), 031111 (2010).
- [31] А.В. Бабичев, Е.С. Колодезный, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, Н.Ю. Харин, А.Д. Петрук, В.Ю. Паневин, С.О. Слипенченко, А.В. Лютецкий, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров. *Письма ЖТФ*, **48** (5), 7 (2022).
- [32] C. Schwarzer, R. Szedlak, L. Burgstaller, A. Genner, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, G. Strasser. *Proc. 2013 Conf. on Lasers and Electro-Optics — Int. Quantum Electronics Conf.* (Munich, Germany, Optica Publishing Group, 2013), paper CB_2_3.
- [33] R. Szedlak, M. Holzbauer, D. MacFarland, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, C. Schwarzer, W. Schrenk, G. Strasser. *Sci. Rep.*, **5**, 16668 (2015).
- [34] E. Mujagić, L.K. Hoffmann, S. Schartner, M. Nobile, H. Detz, D. Andrijasevic, M. Austerer, W. Schrenk, A.M. Andrews, P. Klang, M.P. Semtsiv, W.T. Masselink, G. Strasser. *Proc. SPIE*, **7230**, 723015 (2009).

Редактор А.Н. Смирнов

Study of the spatial characteristics of emission of surface-emitting ring quantum-cascade lasers

A.V. Babichev¹, D.A. Mikhailov², D.V. Chistyakov², E.S. Kolodeznyi¹, A.G. Gladyshev¹, G.V. Voznyuk², M.I. Mitrofanov^{2,4}, D.V. Denisov³, S.O. Slipchenko², A.V. Lyutetskii², V.V. Dudelev², V.P. Evtikhiev², L.Ya. Karachinsky¹, I.I. Novikov¹, N.A. Pikhtin², A.Yu. Egorov⁵, G.S. Sokolovskii²

¹ ITMO University,
197101 St. Petersburg, Russia

² Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

³ St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197022 St. Petersburg, Russia

⁴ Submicron Heterostructures for Microelectronics
Research and Engineering Center,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

⁵ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of studies of ring quantum-cascade lasers with surface emission due to a second-order grating formed in the top cladding layers are presented. Surface emission near $7.85\ \mu\text{m}$ with a low threshold current density ($3.8\ \text{kA}/\text{cm}^2$), in comparison with ridge quantum-cascade lasers of the same cavity length is demonstrated. The results of measurements of the intensity distribution of the near and far fields at different pumping levels are presented. The estimated value of the angle of beam extraction relative to the surface normal is in the range $(5.7\text{--}6.7)^\circ$.