

Одночастотные квантово-каскадные лазеры с переменной глубиной травления штрихов дифракционной решетки

© А.В. Бабичев¹, Н.Ю. Харин², Е.С. Колодезный¹, Д.С. Папылев¹, Г.В. Вознюк³, М.И. Митрофанов^{3,4},
А.Г. Гладышев¹, С.О. Слипченко³, А.В. Лютецкий³, В.П. Евтихий³, В.Ю. Паневин²,
Л.Я. Карачинский¹, И.И. Новиков¹, Н.А. Пихтин³, А.Ю. Егоров¹

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

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

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

E-mail: a.babichev@mail.ioffe.ru; Researcher ID: F-6479-2015

Поступила в Редакцию 17 марта 2025 г.

В окончательной редакции 31 марта 2025 г.

Принята к публикации 10 апреля 2025 г.

Представлены результаты исследования поверхностно-излучающих квантово-каскадных лазеров с селективным кольцевым резонатором радиуса 284 мкм. Использование дифракционной решетки с переменной глубиной травления (вплоть до 4.6 мкм) позволило реализовать одночастотный режим генерации на длине волны 7.42 и 7.66 мкм при температурах 85 и 293 К. Максимальный коэффициент подавления боковых мод составил 23 дБ при температуре 293 К. Характеристическая температура T_0 равнялась 166 К.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, одночастотная генерация, фосфид индия, метод прямой ионной литографии, дифракционная решетка.

DOI: 10.61011/FTP.2025.01.60496.7698

1. Введение

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) с распределенной обратной связью (РОС) традиционно используются для газоанализа [1]. Системы диодной лазерной абсорбционной спектроскопии на основе многопроходных ячеек (Херриотта) позволяют снизить порог детектирования газов (вплоть до 10^{-8} [2,3]). Применение данных систем спектроскопии связано с необходимостью реализации ККЛ с малой расходимостью излучения [4].

Конструкция селективного кольцевого резонатора обеспечивает расходимость излучения в 20 раз ниже, чем в полосковых ККЛ [4]. Дополнительная фокусировка излучения возможна при реализации резкого или плавного фазового сдвига [5,6], за счет использования метаповерхностей [4] и дифракционной решетки с переменной глубиной травления штрихов [7].

В данной работе представлены результаты по формированию и исследованию квантово-каскадных лазеров с селективным кольцевым резонатором, в котором штрихи дифракционной решетки вытравливались методом прямой ионной литографии.

2. Экспериментальные образцы

Гетероструктура квантово-каскадного лазера выращивалась методом молекулярно-пучковой эпитаксии на

сильно легированной подложке InP с кристаллографической ориентацией (100). Использована конструкция активной области на основе 35 периодов, представленная в работе [8] с целью повышения эффективности лазера по напряжению. Данная конструкция с однофононным опустошением нижнего лазерного уровня и последующим выбросом носителей заряда через мини-зону продемонстрировала рекордную выходную оптическую мощность (3.6 Вт для лазера с шириной контакта 20 мкм и длиной резонатора 3 мм [8]) среди активных областей, включающих 35 периодов в каскаде на основе ненапряженной гетеропары. Несмотря на то что ранее нами была продемонстрирована большая максимальная выходная оптическая мощность (4.4 Вт) для лазеров на основе схемы активной области с двухфононным опустошением нижнего уровня [9], величина полной эффективности лазера (wall-plug efficiency, WPE) в 1.5 раза ниже (3.8%), чем для обсуждаемой в [8] конструкции (5.6% при уровне токовой накачки 6 А). В качестве обкладок волновода использованы слои фосфида индия. Суммарная толщина слоев нижней и верхней обкладок волновода составила 3.5 и 4.2 мкм. Дополнительные слои $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 250 нм ограничивали активную область.

Формирование кольцевого резонатора со средним радиусом 284 мкм и шириной вблизи поверхности 19 мкм проводилось за счет жидкостного травления двойной мезоструктуры на глубину ~ 11 мкм. После формирования

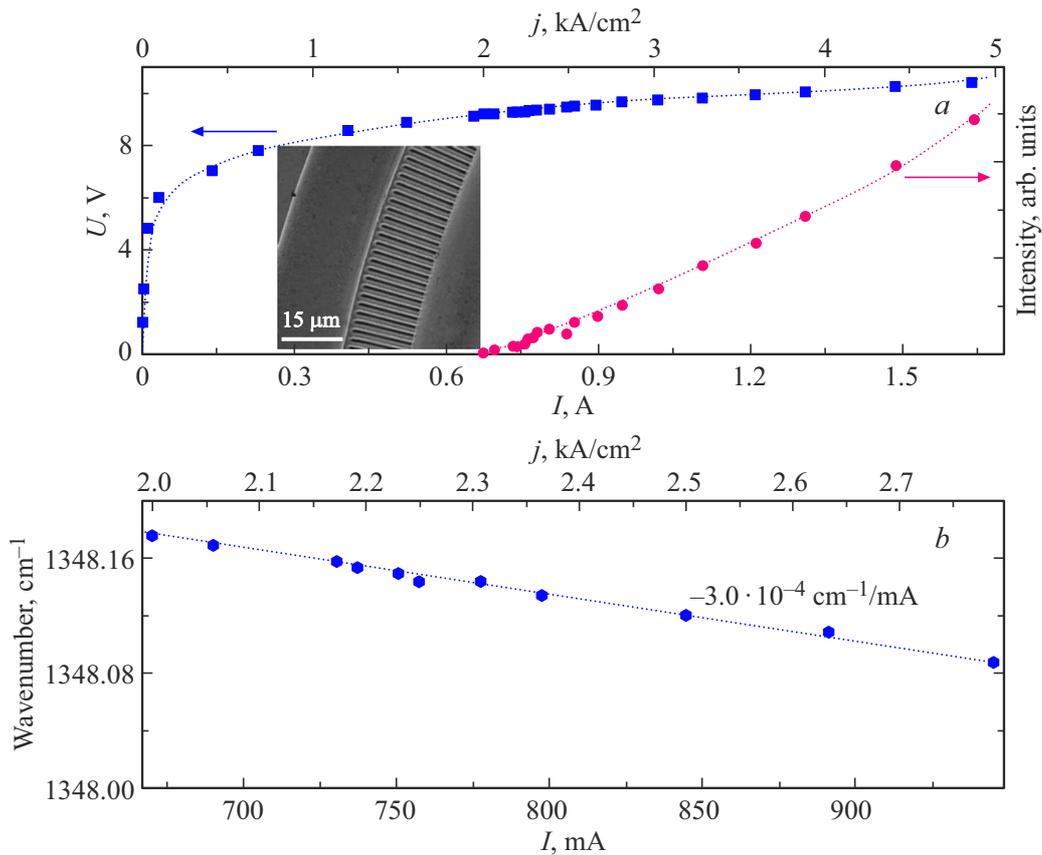


Рис. 1. Вольт-, ватт-амперная характеристика ККЛ с селективным кольцевым резонатором (а). На вставке — изображение сканирующей электронной микроскопии. Сдвиг положения линии одночастотной генерации с увеличением уровня токовой накачки (b). Температура на образце — 85 К.

изоляции на основе SiO_2 и вскрытия окна в ней проводилось напыление верхней контактной металлизации (Ti/Au). Нижняя металлизация формировалась после утончения подложки. Монтаж лазера осуществлялся на медный теплоотвод.

Для формирования профиля дифракционной решетки использован метод прямой (безмасковой) ионной литографии. Данный метод может быть использован наряду с применением полутонковой (gray-scale) литографии при формировании дифракционной решетки с переменной глубиной травления. Выбор метода формирования дифракционной решетки определялся с учетом следующих факторов:

1) преимущество электронной в сравнении с лазерной полутонковой литографией состоит в возможности плавного изменения засветки резиста и субмикронном разрешении формируемого профиля [10];

2) применение электронной полутонковой литографии связано с необходимостью использования специальных стекол, прозрачность которых зависит от уровня накачки сфокусированным электронным пучком (high energy beam sensitive glass, HEBS);

3) после проявления резиста, засвеченного методом полутонковой литографии, формируется трехмерный про-

филь в слоях резиста, выступающего маской, который при „сухом“ травлении [11–14] в метан- или хлорсодержащей плазме транслируется в слой верхней обкладки волновода. Таким образом, основным недостатком метода полутонковой литографии является малая разница между минимальной и максимальной глубиной травления, определяемая толщиной резиста ($\leq 1 \mu\text{m}$);

4) метод безмасковой ионной литографии не имеет принципиального ограничения по перепаду глубины травления штрихов дифракционной решетки.

Методом прямой ионной литографии было сформировано 753 штриха дифракционной решетки 2-го порядка по окружности кольцевого резонатора. Период следования штрихов (Λ) и их ширина составили 2.37 и 16 μm , скважность — 50%. Минимальная глубина травления штрихов дифракционной решетки равнялась толщине верхней металлизации ($\sim 0.6 \mu\text{m}$). Максимальная глубина травления была увеличена для данной конструкции волновода до 4.55 μm (без учета толщины верхней металлизации) в сравнении с 3.8 μm , обсуждаемыми ранее [15]. Травление штрихов сфокусированным ионным пучком производилось рабочим током 2.1 nA с энергией ионов 20 keV . Время экспозиции штриха составило 16 с. Полная ионная доза для различных штрихов изменялась

в диапазоне $5.25 \cdot 10^{17} - 1.7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Изображение селективного кольцевого резонатора, полученное методом сканирующей электронной микроскопии, представлено на вставке рис. 1.

Спектры генерации регистрировались с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, в режиме пошагового сканирования (step-scan mode). Спектральное разрешение составило 0.2 см^{-1} . Длительность и частота следования импульсов равнялись 150 нс и 10 кГц. Измерения характеристик лазера проведены при 85 и 293 К при размещении образца в криостате, с термостабилизацией его температуры.

3. Результаты и обсуждение

Зависимость интегральной интенсивности излучения от уровня токовой накачки наряду с вольт-амперной характеристикой при 85 К приведены на рис. 1, а. Пороговый ток (I_{th}) составил 0.67 А. Использование конструкции активной области, представленной ранее в [8], позволило снизить пороговое напряжение с 13.5 В [15] до 9.2 В за счет уменьшения числа периодов в каскаде и изменения схемы опустошения нижнего уровня и инжектора. С учетом количества периодов в каскаде продемонстрирована низкая величина дефектного напряжения при пороге генерации (95 мэВ), что несколько превышает минимальную величину (90 мэВ [16]) для конструкций с „коротким“ инжектором. Пороговая плотность тока j_{th} для исследуемого ККЛ с селективным кольцевым резонатором составила 2.0 кА/см^2 . Напряжение, соответствующее рассогласованию периодов в каскаде [17], составило 12.7 В, что соответствует дефектному напряжению 196 мэВ. Таким образом, насыщение ватт-амперной характеристики наблюдается при пятикратном превышении порогового тока.

Спектры генерации селективного кольцевого резонатора, измеренные при температуре 85 К, представлены на рис. 2. Продемонстрирована одночастотная генерация на длине волны 7.42 мкм без изменения порядка радиальной моды (mode-hole free). Вблизи порога генерации коэффициент подавления боковых мод (величина side-mode suppression ratio, SMSR) составил 20 дБ. Превышение порога генерации на 16% позволило увеличить значение SMSR до 24 дБ. Коэффициент подавления боковых мод на уровне 18–19 дБ продемонстрирован вплоть до $1.41 \cdot I_{th}$. Превышение порога генерации на 50% приводит к переходу в многомодовый режим генерации. Спектр генерации представлен 8 радиальными модами. Дальнейшее увеличение уровня токовой накачки (до $2.43 \cdot I_{th}$) приводит к росту интенсивности линии генерации в диапазоне длин волн 7.57–7.69 мкм и подавлению интенсивности линий генерации вблизи 7.44 мкм. Проведена оценка сдвига положения линии одночастотной генерации с увеличением уровня плотности токовой накачки (см. рис. 1, б), которая составила -0.1 см/кА .

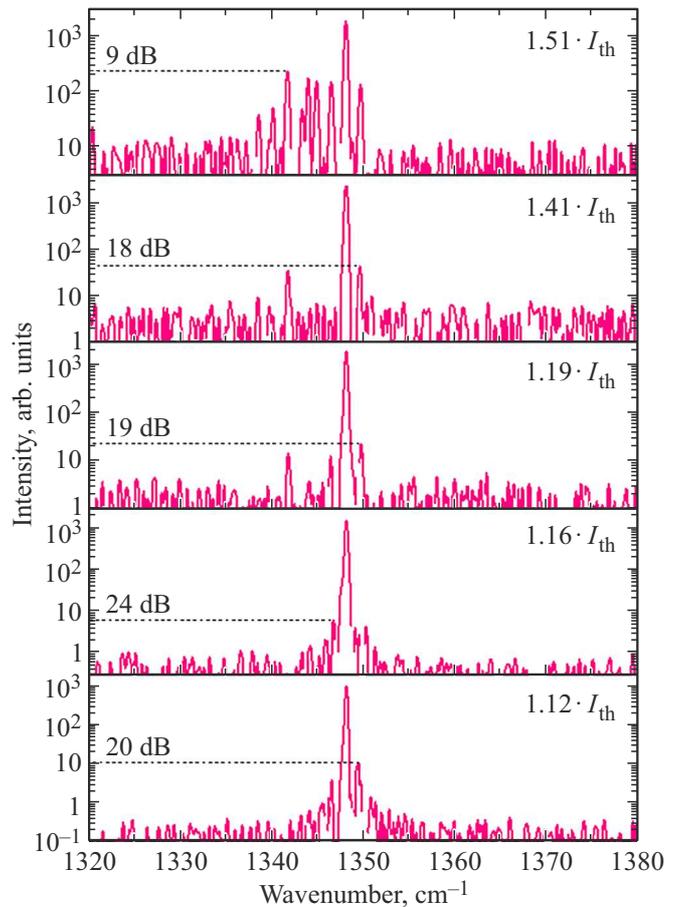


Рис. 2. Спектры одночастотной генерации при различном уровне токовой накачки (полулогарифмический масштаб). Температура на образце — 85 К.

Продемонстрирована одночастотная генерация (на длине волны 7.66 мкм) при комнатной температуре. Зависимость интегральной интенсивности излучения от уровня токовой накачки наряду с вольт-амперной характеристикой при 293 К приведены на рис. 3, а. Пороговые ток и плотность тока, соответствующие напряжению 9.2 В, составили 2.4 А и 7 кА/см^2 соответственно. Оценочное значение характеристической температуры T_0 равняется 166 К. Спектры генерации при 293 К представлены на рис. 4. Вблизи порогового значения спектр представлен двумя радиальными модами с коэффициентом подавления боковых мод, равным 14 дБ. Увеличение уровня токовой накачки до 2.64 А приводит к последовательному повышению величины SMSR до 23 дБ. Дальнейшее повышение уровня токовой накачки до 3.4 А приводит к падению коэффициента подавления боковых мод до 17 дБ. На рис. 3, б представлено положение линии генерации от уровня накачки. Повышение тока с 2.6 до 3.4 А приводит к длинноволновому сдвигу положения линии генерации $\sim 0.4 \text{ см}^{-1}$. Скорость сдвига положения линии генерации по току и по плотности тока накачки составила $-4.5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}/\text{мА}$

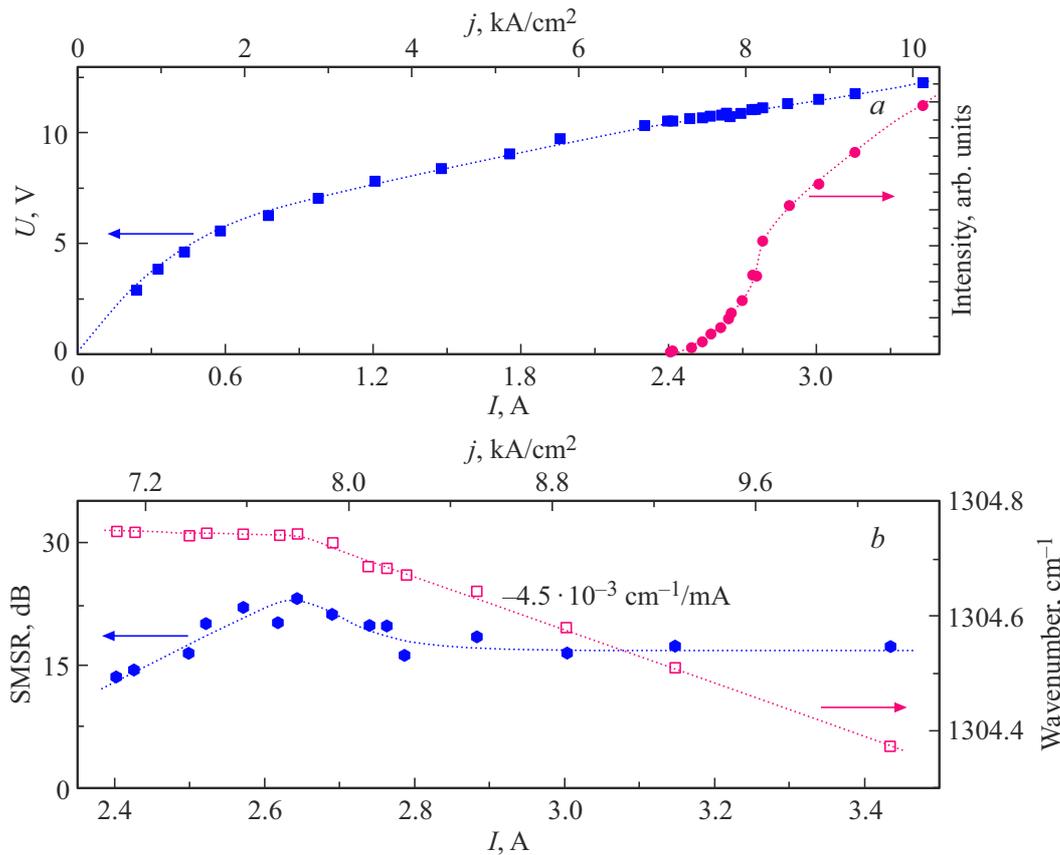


Рис. 3. Вольт-, ватт-амперная характеристика ККЛ с селективным кольцевым резонатором (а). Коэффициент подавления боковых мод и положение линии одночастотной генерации от уровня токовой накачки (b). Температура на образце — 293 К.

и $-0.16 \text{ см}^{-1}/\text{kA}$ соответственно. Данное значение превышает ранее представленное значение для одночастотных лазеров ($-0.1 \text{ см}^{-1}/\text{kA}$ [15,18]), что обусловлено различиями в конструкции лазера. Стоит отметить, что уменьшение величины SMSR с ростом уровня накачки соотносится с моментом начала сдвига положения линии генерации, вызванным разогревом лазера (см. рис. 3, b). С учетом температурного сдвига положения линии генерации, который составил $-0.209 \text{ см}^{-1}/\text{K}$ для исследованной конструкции резонатора, что соотносится с ранее представленными результатами [19], проведена оценка разогрева лазера. Показано, что увеличение уровня токовой накачки до 1.5 пороговых значений приводит к росту температуры лазера не более чем на 2 К.

С целью определения расходимости излучения в распределении интенсивности дальнего поля проведена оценка порядка радиальной моды (m).

При токах накачки до $1.07 \cdot I_{\text{th}}$ межмодовое расстояние $d\nu$ составляет $\sim 1.66 \text{ см}^{-1}$. Как результат, эффективный показатель преломления $n_{\text{eff}} = 1/(2\pi R_{\text{out}} d\nu) = 3.27$, где R_{out} — внешний радиус кольцевого резонатора [13]. Величина m может быть оценена с помощью выражения [13]: $m = 2\pi R_{\text{out}}(n_{\text{eff}}/\lambda - 1/\Lambda)$, где λ — спектральное положение линии генерации. Показано, что генерация соответствует моде 8-го порядка. С учетом выраже-

ния [13]: $\sin(2\Theta) = (n + m/2)\lambda/R_{\text{out}}$, проведена оценка углового положения первого и второго максимума в распределении интенсивности дальнего поля, которые позволили оценить полуширину распределения дальнего поля ($\sim 2^\circ$).

4. Заключение

Представлены первые результаты по реализации одночастотных квантово-каскадных лазеров с переменной глубиной травления штрихов дифракционной решетки, работающих при комнатной температуре (293 К). Применение конструкции активной области с однофононным опустошением нижнего лазерного уровня и последующим выбросом носителей заряда через мини-зону позволило повысить эффективность лазера. При 85 К реализована низкая пороговая плотность тока ($2 \text{ кА}/\text{см}^2$) для конструкции с увеличенной (до 4.6 мкм) глубиной травления штрихов дифракционной решетки. Продемонстрирован одночастотный режим генерации на длине волны 7.42 мкм . Максимальный коэффициент подавления боковых мод составил 24 дБ. Повышение температуры до 293 К позволило реализовать одночастотную генерацию на длине волны 7.66 мкм с максимальным

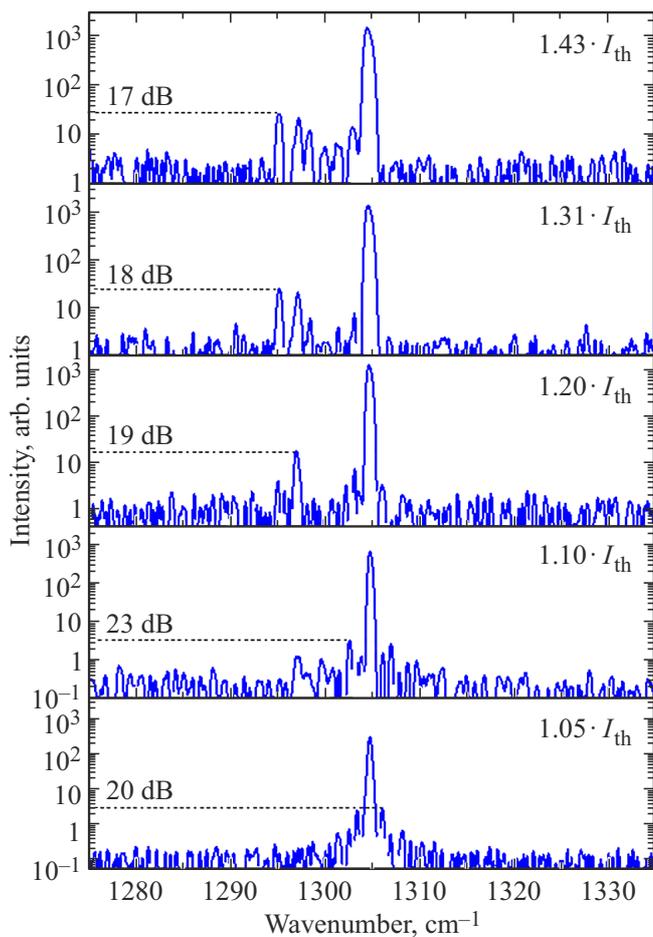


Рис. 4. Спектры одночастотной генерации при различном уровне токовой накачки (полулогарифмический масштаб). Температура на образце — 293 К.

коэффициентом подавления боковых мод 23 дБ. Пороговая плотность тока составила 7 кА/см^2 . Превышение порогового значения на 43 % привело к сдвигу длины волны генерации, соответствующему разогреву лазера $\sim 2 \text{ К}$. На основе межмодового расстояния в спектрах генерации проведена оценка расходимости излучения в распределении интенсивности дальнего поля, которая составила $\sim 2^\circ$.

Финансирование работы

Исследование авторов из Университета ИТМО выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-79-10285–П, <https://rscf.ru/project/20-79-10285/> в части исследования характеристик лазеров.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Hofstetter, M. Beck, J. Faist, M. Nägele, M.W. Sgrist. *Optics Lett.*, **26** (12), 887 (2001).
- [2] C. Wang, P. Sahay. *Sensors*, **9** (10), 8230 (2009).
- [3] П.И. Абрамов, Е.В. Кузнецов, Л.А. Скворцов, М.И. Скворцов. *ЖПИС*, **86** (1), 5 (2019).
- [4] R. Szedlak, C. Schwarzer, T. Zederbauer, H. Detz, A. Maxwell Andrews, W. Schrenk, G. Strasser. *Appl. Phys. Lett.*, **104** (15), 151105 (2014).
- [5] R. Szedlak, M. Holzbauer, D. MacFarland, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, C. Schwarzer, W. Schrenk, G. Strasser. *Sci. Rep.*, **5** (1), 16668 (2015).
- [6] R. Szedlak, T. Hisch, B. Schwarz, M. Holzbauer, D. MacFarland, T. Zederbauer, H. Detz, A.M. Andrews, W. Schrenk, S. Rotter, G. Strasser. *Sci. Rep.*, **8** (1), 7998 (2018).
- [7] P.N. Figueiredo, A. Muraviev, R.E. Peale. *Proc. SPIE*, **9466**, 946602 (2015).
- [8] А.В. Бабичев, Е.С. Колодезный, Д.А. Михайлов, В.В. Дюделев, А.Г. Гладышев, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Г.С. Соколовский, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров. *Письма ЖТФ*, **50** (16), 18 (2024).
- [9] А.В. Бабичев, Д.А. Пашнев, А.Г. Гладышев, А.С. Курочкин, Е.С. Колодезный, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, L. Bouley, Д.А. Фирсов, Л.Е. Воробьев, Н.А. Пихтин, A. Bousseksou, А.Ю. Егоров. *Письма ЖТФ*, **45** (22), 21 (2019). [A.V. Babichev, D.A. Pashnev, A.G. Gladyshev, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, L. Bouley, D.A. Firsov, L.E. Vorobjev, N.A. Pikhtin, A. Bousseksou, A.Yu. Egorov. *Techn. Phys. Lett.*, **45** (11), 1136 (2019)].
- [10] C. Schuster, M. Heinrich, A. Voigt, A. Zanzal, P. Reynolds, S. DeMoor, G. Ekindorf, A. Schleunitz, G. Gruetzner. *Proc. SPIE*, **12956**, 129560H (2024).
- [11] G. Marschick, J. Pelini, T. Gabbrielli, F. Cappelli, R. Weih, H. Knötig, J. Koeth, S. Höfling, P. De Natale, G. Strasser, S. Borri, B. Hinkov. *ACS Photonics*, **11** (2), 395 (2024).
- [12] G. Marschick, S. Iseri, R. Szedlak, H. Moser, J.P. Waclawek, E. Arigliani, R. Weih, W. Schrenk, G. Strasser, B. Hinkov, A. Maxwell A.B. Lendl, B. Schwarz. *APL Photonics*, **9** (10), 100806 (2024).
- [13] 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).
- [14] M. Shahmohammadi, F. Kapsalidis, M.J. Süess, E. Gini, M. Beck, M. Hundt, B. Tuzson, L. Emmenegger, J. Faist. *Semicond. Sci. Technol.*, **34** (8), 083001 (2019).
- [15] А.В. Бабичев, Н.Ю. Харин, Е.С. Колодезный, Д.А. Михайлов, Г.В. Вознюк, М.И. Митрофанов, В.В. Дюделев, А.Г. Гладышев, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, В.П. Евтихийев, В.Ю. Паневин, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Г.С. Соколовский, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров. *ПЖТФ*, **51** (11), 52 (2025).
- [16] W. Zhou, Q.-Y. Lu, D.-H. Wu, S. Slivken, M. Razeghi. *Opt. Express*, **27** (11), 15776 (2019).
- [17] A. Lyakh, R. Maulini, A. Tsekoun, R. Go, C.K.N. Patel. *Opt. Express*, **20** (22), 24272 (2012).

- [18] 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). [A.V. Babichev, E.S. Kolodeznyi, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, N.Yu. Kharin, A.D. Petruk, V.Yu. Panevin, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov. Techn. Phys. Lett., **48** (3), 69 (2022)].
- [19] D.H. Wu, M. Razeghi. APL Materials, **5** (3), 035505 (2017).

Редактор Г.А. Оганесян

Single-mode quantum-cascade lasers with variable etching depth of grating slits

A.V. Babichev¹, N.Yu. Kharin², E.S. Kolodeznyi¹, D.S. Papylev¹, G.V. Voznyuk³, M.I. Mitrofanov^{3,4}, A.G. Gladyshev¹, S.O. Slipchenko³, A.V. Lyutetsky³, V.P. Evtikhiev³, V.Yu. Panevin², L.Ya. Karachinsky¹, I.I. Novikov¹, N.A. Pikhtin³, A.Yu. Egorov¹

¹ ITMO University,

197101 St. Petersburg, Russia

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

195251 St. Petersburg, Russia

³ Ioffe Institute,

194021 St. Petersburg, Russia

⁴ Submicron Heterostructures for Microelectronics,

Research & Engineering Center,

Russian Academy of Sciences,

194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of the study of surface-emitting quantum-cascade lasers with a ring cavity radius of $284\ \mu\text{m}$ were presented. The use of a grating with a variable etching depth (up to $4.6\ \mu\text{m}$) provided a single-mode lasing at a wavelength of 7.42 and $7.66\ \mu\text{m}$ at a temperature of 85 and $293\ \text{K}$. The maximum side-mode suppression ratio was $23\ \text{dB}$ at $293\ \text{K}$. The characteristic temperature T_0 was $166\ \text{K}$.