

07

Одночастотная генерация на радиальных модах в квантово-каскадных лазерах на основе селективного кольцевого резонатора

© А.В. Бабичев¹, Н.Ю. Харин², Е.С. Колодезный¹, Д.С. Папылев¹, Д.А. Михайлов³, Г.В. Вознюк³, М.И. Митрофанов^{3,4}, В.В. Дюделев³, А.Г. Гладышев¹, С.О. Слипенченко³, А.В. Лютецкий³, В.П. Евтихий³, В.Ю. Паневин², Л.Я. Карачинский¹, И.И. Новиков¹, Г.С. Соколовский³, Н.А. Пихтин³, А.Ю. Егоров¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

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

³ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

⁴ НТЦ микроэлектроники РАН, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 12 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 4 марта 2025 г.

Принято к публикации 11 марта 2025 г.

Представлены результаты по реализации стабильной одночастотной генерации в квантово-каскадных лазерах на основе селективного кольцевого резонатора. Штрихи дифракционной решетки второго порядка с переменной глубиной травления при движении вдоль кольцевого резонатора сформированы методом прямой ионной литографии. Одночастотная генерация получена на длине волны $7.65 \mu\text{m}$ с коэффициентом подавления отношения сигнал/шум $22-25 \text{ dB}$ вблизи порога генерации. Повышение уровня токовой накачки на 40% приводит к росту коэффициента подавления боковых мод до 28 dB .

Ключевые слова: сверхрешетки, квантово-каскадный лазер, селективный кольцевой резонатор, одночастотная генерация, фосфид индия, прямая ионная литография.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.11.60489.20280

Поверхностно-излучающие одночастотные квантово-каскадные лазеры (ККЛ) являются альтернативой длинноволновым вертикально-излучающим лазерам [1–5], так как позволяют реализовать массив лазеров с вертикальным выводом излучения.

К настоящему времени представлены результаты по формированию и исследованию выходных характеристик поверхностно-излучающих ККЛ в конструкции фотонного кристалла [6], селективного кольцевого резонатора [7–12], селективного микрокольцевого резонатора [13], а также микрополосковых лазеров с распределенной обратной связью [14]. В сравнении с лазерами в конструкции фотонного кристалла [6] геометрия селективного кольцевого резонатора позволяет реализовать генерацию при непрерывном (CW) режиме токовой накачки. При этом максимальная температура генерации в CW-режиме составила 300 и $100-230 \text{ K}$ для ККЛ спектрального диапазона вблизи $4.6 \mu\text{m}$ [12,15] и $8 \mu\text{m}$ [16,17] соответственно. Использование зарощенной гетероструктуры ККЛ и эффективного теплоотвода на основе AlN позволило авторам [12,15] существенно снизить тепловую нагрузку лазера и впервые реализовать генерацию в CW-режиме при комнатной температуре. Выходная оптическая мощность в CW-режиме составила 400 mW [15], однако в силу значительного коэффициента связывания между дифракционной решеткой и активной областью генерация соответствовала моде высокого порядка (61). Как результат, авторам [15] не удалось реали-

зовать генерацию с максимумом интенсивности в центре дальнего поля (первый максимум был расположен при угле $2\theta = 12^\circ$). Переход к конструкции, предполагающей комплексный режим связывания, обеспечил генерацию на фундаментальной моде с выходной оптической мощностью 202 mW , однако максимума интенсивности в центре дальнего поля не продемонстрировано. Двойной „резкий“ (при углах 90 и 270° при движении вдоль селективного кольцевого резонатора) фазовый сдвиг на величину π [18] традиционно используется для реализации максимума интенсивности в центре дальнего поля. Альтернативный подход состоит в применении плавного фазового сдвига (за счет формирования двух дифракционных решеток) на величину π с изменяющейся шириной штриха при движении вдоль кольцевого резонатора. Аналогичный фазовый сдвиг возможно реализовать за счет изменения глубины травления штрихов дифракционной решетки.

В настоящей работе представлены первые результаты по реализации одночастотной лазерной генерации в ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора с переменной глубиной травления штрихов дифракционной решетки вдоль кольцевого резонатора.

Гетероструктура ККЛ была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии на слаболегированной подложке фосфида индия (с концентрацией примеси серы $(1-3) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Для формирования каскада на основе 50 периодов использована схема с двухфонным

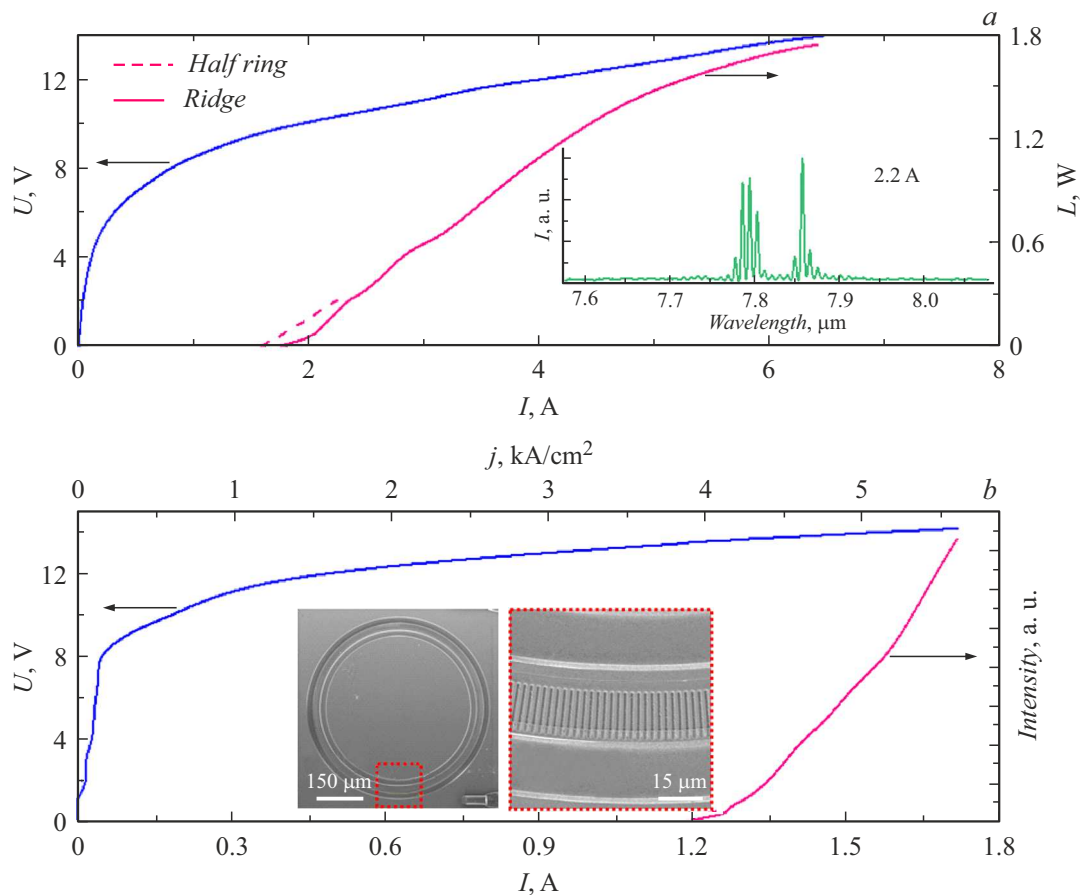


Рис. 1. *a* — вольт- и ватт-амперные характеристики полукольцевого (штриховые линии) и полоскового (сплошные линии) ККЛ при температуре 293 К. Выходная оптическая мощность приведена с обоих зеркал. Вставка демонстрирует спектр генерации полукольцевого ККЛ при 2.2 А. *b* — зависимость интегральной интенсивности излучения от уровня токовой накачки и вольт-амперная характеристика ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора при температуре 83 К. На вставках — полученные методом сканирующей электронной микроскопии изображения ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора.

опустошением нижнего уровня [19]. В качестве нижней и верхней обкладок выступали слои $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и InP с толщиной 500 и 3900 nm и уровнем легирования $5 \cdot 10^{16}$ и $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Верхний контактный слой был сформирован на основе $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ и имел толщину 120 nm с градиентом по легированию в диапазоне $(1-100) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Профиль кольцевого резонатора со средним радиусом 289 μm и шириной 25 μm (вблизи контактного слоя) формировался жидкостным травлением на глубину 7 μm. Ширина области токовой накачки вблизи контактного слоя составила 17 μm (см. вставку на рис. 1, *b*). Наряду с изготовлением кольцевых ККЛ были сформированы полукольцевые (аналогичного радиуса) и полосковые (с длиной резонатора 1.7 mm и шириной контакта вблизи поверхности 20 μm) ККЛ с целью оценки выходной оптической мощности.

Для формирования штрихов дифракционной решетки с переменной глубиной травления могут быть использованы техники полутонковой (gray-scale) литографии (прямой лазерной, электронной или рентгеновской, технологии использования масок-стекло, прозрачность которых зависит от дозы облучения), а также прямая

ионная литография. В отличие от методов полутонковой литографии прямая ионная литография сочетает в себе как технологию формирования литографического рисунка, так и безмаскового травления. С помощью прямой ионной литографии проведено травление 767 штрихов дифракционной решетки второго порядка (с периодом 2.37 μm). Период решетки задавался положением максимума спектра электролюминесценции в полукольцевом лазере (см. вставку к рис. 1, *a*). Глубина травления штрихов увеличивалась при движении по поверхности кольцевого резонатора. Минимальная глубина травления составила ~ 605 nm и определялась толщиной металлизации. Максимальная глубина травления штрихов составила ~ 4.41 μm. Поперечные размеры штриха решетки $0.71 \times 16 \mu\text{m}$. Энергия ионов во время экспозиции составила 20 keV, рабочий ток 2 nA, шаг пучка 10 nm, время экспонирования 2 μs. Ионная доза варьировалась в диапазоне $(6.25-20) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$.

Спектры генерации ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора, расположенного в криостате, измерялись при температуре 83 К с помощью фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v, работающего в режиме

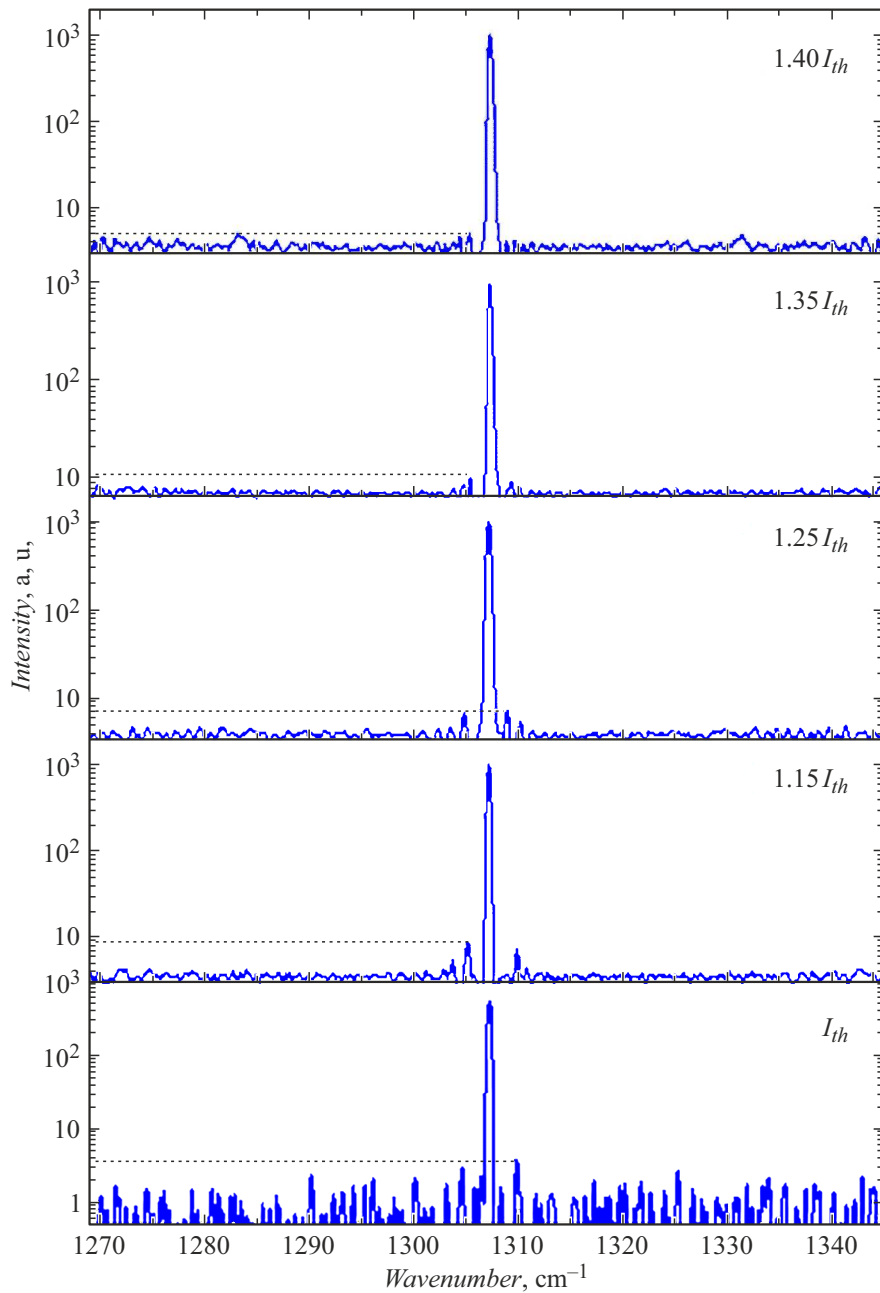


Рис. 2. Спектры одночастотной генерации ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора при различных уровнях токовой накачки и температуре 83 К.

пошагового сканирования (step-scan mode). Длительность и частота следования импульсов накачки составляли 150 ns и 15 kHz. Для регистрации абсолютной выходной оптической мощности полукольцевых и полосковых ККЛ использован измеритель мощности Thorlabs PM100/S401C.

Результаты измерения вольт- и ватт-амперных характеристик полукольцевых и полосковых ККЛ представлены на рис. 1, а. Выходная оптическая мощность полукольцевого ККЛ составила 270 mW при превышении порогового тока на 40%. Максимальная выходная мощность полоскового ККЛ составила 1.7 W. Таким

образом, можно утверждать, что данная конструкция гетероструктуры обеспечивает высокую выходную оптическую мощность.

Проведено измерение порогового тока I_{th} в кольцевом резонаторе (перед формированием дифракционной решетки), который составил 1.67 А при 293 К. Измерения проведены со скола образца, как обсуждалось ранее [20,21]. С учетом характеристической температуры $T_0 = 136$ К в исследованных ККЛ с кольцевым резонатором [22] проведена оценка порогового тока кольцевого резонатора при температуре 83 К, который составил ~ 0.4 А. Формирование селективного кольцевого резона-

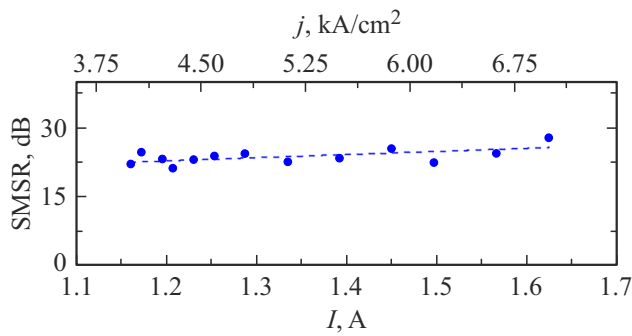


Рис. 3. Коэффициент подавления боковых мод при различном уровне токовой накачки.

тора (травление штрихов дифракционной решетки) привело к росту величины I_{th} до 1.16 А, что соответствует пороговой плотности тока $j_{th} = 3.8 \text{ kA/cm}^2$ (рис. 1, б). Результаты измерения спектров одночастотной генерации при уровне токовой накачки до 1.62 А представлены на рис. 2. Во всем исследуемом диапазоне наблюдается стабильная (mode-hop free) одночастотная генерация. Вблизи порогового значения накачки одночастотная генерация соответствует длине волны $7.65 \mu\text{m}$ с коэффициентом отношения сигнал/шум, равным 22–25 dB (рис. 3). Повышения уровня токовой накачки до $1.4I_{th}$ приводит к росту величины коэффициента подавления боковых мод (SMSR) до 28 dB. Ранее для ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора меньшего радиуса ($191 \mu\text{m}$) была продемонстрирована одночастотная генерация ($\text{SMSR} \leq 25 \text{ dB}$) в более узком динамическом диапазоне (до $1.27I_{th}$) [10].

Проведен анализ сдвига положения линии генерации за время действия импульса накачки. При уровне накачки $1.08I_{th}$ сдвиг положения линии генерации за время действия импульса составляет 0.22 cm^{-1} , а средняя скорость сдвига положения линии генерации v за время действия импульса накачки t (средняя величина $\delta v/\delta t$) составляет $2.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{ns}^{-1}$. Максимальный сдвиг положения линии генерации за время действия импульса накачки составил 0.41 cm^{-1} и соответствует уровню накачки в $1.4I_{th}$. Средняя величина $\delta v/\delta t$ при плотности тока накачки 5.3 kA/cm^2 составила $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{ns}^{-1}$. Ранее для ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора меньшего радиуса ($190 \mu\text{m}$) при аналогичной плотности порогового тока средняя величина dv/dt составляла $6.2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{ns}^{-1}$ [23].

Значение начального положения линии генерации за время действия импульса накачки сдвигается на величину -0.035 cm^{-1} с увеличением уровня токовой накачки до $1.4I_{th}$. С учетом скорости изменения положения линии генерации с температурой ($\delta v/\delta T$) для исследуемой конструкции ККЛ ($0.092 \text{ cm}^{-1}/\text{K}$ [24]) оценочное значение разогрева исследуемого ККЛ не превышает 0.4 К. При сопоставлении характеристик одночастотных лазеров с одинаковыми геометрическими размерами

применяется величина сдвига положения линии генерации Δv с увеличением тока. В свою очередь при сравнении лазеров с разной тепловой нагрузкой оценка сдвига положения линии генерации с увеличением плотности токовой накачки $\Delta v/\Delta j$ более корректна. Проведена оценка величины $\Delta v/\Delta j$, которая составила $0.099 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{kA}^{-1}$. Данное значение соотносится с ранее представленным для одночастотных полосковых лазеров, сформированных на основе аналогичной конструкции гетероструктуры ($\Delta v/\Delta j = 0.094 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{kA}^{-1}$ [24]).

Итак, представлены первые результаты по реализации поверхностной одночастотной генерации в ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора с переменной глубиной травления штрихов дифракционной решетки. В сравнении с ранее представленными результатами для ККЛ на основе селективного кольцевого резонатора [10] за счет оптимизации параметров глубины травления штрихов дифракционной решетки удалось повысить динамический диапазон по току, в котором наблюдается одночастотный режим генерации (до $1.4I_{th}$). Проведена оценка средней скорости сдвига положения линии генерации за время действия импульса накачки (величины chirp), которая составила $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{ns}^{-1}$ при плотности тока накачки 5.3 kA/cm^2 .

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] A. Andrejew, S. Sprengel, M.-C. Amann, *Opt. Lett.*, **41** (12), 2799 (2016). DOI: 10.1364/ol.41.002799
- [2] G.K. Veerabathran, S. Sprengel, A. Andrejew, M.-C. Amann, *Appl. Phys. Lett.*, **110** (7), 071104 (2017). DOI: 10.1063/1.4975813
- [3] A. Simaz, G. Böhm, A. Köninger, M.A. Belkin, in *2024 IEEE 29th Int. Semiconductor Laser Conf. (ISLC)* (IEEE, 2024), p. 1–2. DOI: 10.1109/islc57752.2024.10717418
- [4] A. Babichev, S. Blokhin, A. Gladyshev, L. Karachinsky, I. Novikov, A. Blokhin, M. Bobrov, N. Maleev, V. Andryushkin, E. Kolodeznyi, D. Denisov, N. Kryzhanovskaya, K. Voropaev, V. Ustinov, A. Egorov, H. Li, S.-C. Tian, S. Han, G. Sapunov, D. Bimberg, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **35** (6), 297 (2023). DOI: 10.1109/lpt.2023.3241001
- [5] S.A. Blokhin, A.V. Babichev, A.G. Gladyshev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, A.A. Blokhin, M.A. Bobrov, N.A. Maleev, V.V. Andryushkin, D.V. Denisov, K.O. Voropaev, I.O. Zhumaeva, V.M. Ustinov, A.Yu. Egorov, N.N. Ledentsov, *IEEE J. Quantum Electron.*, **58** (2), 2400115 (2022). DOI: 10.1109/jqe.2022.3141418

- [6] Z. Wang, 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). DOI: 10.1364/oe.27.022708
- [7] G. Marschick, S. Ischeri, R. Szedlak, H. Moser, J.P. Waclawek, E. Arigliani, R. Weih, W. Schrenk, G. Strasser, B. Hinkov, A. Maxwell Andrews, B. Lendl, B. Schwarz, *APL Photon.*, **9** (10), 100806 (2024). DOI: 10.1063/5.0221189
- [8] 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 Photon.*, **11** (2), 395 (2024). DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c01159
- [9] H. Knötig, B. Hinkov, R. Weih, S. Höfling, J. Koeth, G. Strasser, *Appl. Phys. Lett.*, **116** (13), 131101 (2020). DOI: 10.1063/1.5139649
- [10] A. Babichev, E. Kolodeznyi, A. Gladyshev, N. Kharin, V. Panevin, V. Shalygin, G. Voznyuk, M. Mitrofanov, S. Slipchenko, A. Lyutetskii, V. Evtikhiev, L. Karachinsky, I. Novikov, N. Pikhtin, A. Egorov, *J. Opt. Technol.*, **90** (8), 422 (2023). DOI: 10.1364/jot.90.000422
- [11] S. Kacmoli, C.F. Gmachl, *Appl. Phys. Lett.*, **124** (1), 010502 (2024). DOI: 10.1063/5.0180606
- [12] D.H. Wu, M. Razeghi, *APL Mater.*, **5** (3), 035505 (2017). DOI: 10.1063/1.4978810
- [13] D. Stark, M. Beck, J. Faist, *APL Photon.*, **10** (1), 016122 (2025). DOI: 10.1063/5.0245311
- [14] D. Stark, F. Kapsalidis, S. Markmann, M. Bertrand, B. Marzban, E. Gini, M. Beck, J. Faist, *Laser Photon. Rev.*, **18** (8), 2300663 (2024). DOI: 10.1002/lpor.202300663
- [15] 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). DOI: 10.1063/1.3672049
- [16] B. Hinkov, J. Hayden, R. Szedlak, P. Martin-Mateos, B. Jerez, P. Acedo, G. Strasser, B. Lendl, *Opt. Express*, **27** (10), 14716 (2019). DOI: 10.1364/oe.27.014716
- [17] E. Mujagić, M. Nobile, H. Detz, W. Schrenk, J. Chen, C. Gmachl, G. Strasser, *Appl. Phys. Lett.*, **96** (3), 031111 (2010). DOI: 10.1063/1.3292021
- [18] 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). DOI: 10.1038/srep16668
- [19] L. Boullay, T. Maroutian, P. Goulain, A. Babichev, A. Egorov, L. Li, E. Linfield, R. Colombelli, A. Bousseksou, *AIP Adv.*, **13** (1), 015315 (2023). DOI: 10.1063/5.0111159
- [20] M. Piccardo, B. Schwarz, D. Kazakov, M. Beiser, N. Opačak, Y. Wang, S. Jha, J. Hillbrand, M. Tamagnone, W.T. Chen, A.Y. Zhu, L.L. Columbo, A. Belyanin, F. Capasso, *Nature*, **582** (7812), 360 (2020). DOI: 10.1038/s41586-020-2386-6
- [21] N.Yu. Kharin, A.V. Babichev, D.A. Mikhailov, E.S. Kolodeznyi, V.V. Dudelev, V.Yu. Panevin, G. Voznyuk, M. Mitrofanov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, V.P. Evtikhiev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, G.S. Sokolovskii, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov, in *2024 Int. Conf. on Electrical Engineering and Photonics (ExPolytech)* (IEEE, 2024), p. 394–397. DOI: 10.1109/eexpolytech62224.2024.10755618
- [22] D.S. Papylev, E.S. Kolodeznyi, A.V. Babichev, N.Yu. Kharin, G.V. Voznyuk, M.I. Mitrofanov, S.O. Slipchenko, A.V. Lyutetskii, V.P. Evtikhiev, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, V.Yu. Panevin, N.A. Pikhtin, A.Yu. Egorov, *St. Petersburg Polytech. Univ. J.: Phys. Math.*, **17** (3.2), 71 (2024). DOI: 10.18721/JPM.173.213
- [23] M. Brandstetter, A. Genner, C. Schwarzer, E. Mujagic, G. Strasser, B. Lendl, *Opt. Express*, **22** (3), 2656 (2014). DOI: 10.1364/oe.22.002656
- [24] А.В. Бабичев, Е.С. Колодезний, А.Г. Гладышев, Д.В. Денисов, Н.Ю. Харин, А.Д. Петрук, В.Ю. Паневин, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Н.А. Пихтин, А.Ю. Егоров, *Письма в ЖТФ*, **48** (5), 7 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52147.19050 [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, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (3), 6 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.03.52872.19050].