

07

## Одночастотная генерация квантово-каскадного лазера с распределенной обратной связью на частоте вблизи 4.1 THz

© М.В. Винокуров<sup>1</sup>, Д.А. Белов<sup>1,2</sup>, А.В. Иконников<sup>2</sup>, М.В. Майтама<sup>1</sup>, И.А. Глинский<sup>1</sup>, И.Е. Рыков<sup>1</sup>, Р.Р. Галиев<sup>3</sup>, А.Ю. Павлов<sup>3</sup>, Д.С. Пономарев<sup>1,3</sup>, А.А. Афоненко<sup>4</sup>, Д.В. Ушаков<sup>4</sup>, Ф.И. Zubov<sup>1,5</sup>, Р.А. Хабибуллин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

<sup>4</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>5</sup> Алферовский университет, Санкт-Петербург Россия

E-mail: vinokurov.mv@phystech.edu

Поступило в Редакцию 23 марта 2026 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2026 г.

Принято к публикации 18 апреля 2026 г.

Достигнута одночастотная генерация терагерцевого квантово-каскадного лазера (ККЛ) с активной средой на основе GaAs/AlGaAs за счет формирования распределенной обратной связи (РОС) первого порядка с четвертьволновым сдвигом. Измеренные спектры излучения ККЛ с РОС демонстрируют наличие одночастотной генерации на частоте 4.11 THz, что хорошо совпадает с рассчитанной брэгговской частотой. Продемонстрирована работа ККЛ с РОС в непрерывном режиме генерации при температурах до 70 K и мощности до 60  $\mu$ W, что перспективно для создания компактных спектрометров высокого разрешения в терагерцевой области.

**Ключевые слова:** распределенная обратная связь, терагерцевые лазеры, спектр, квантово-каскадный лазер, одночастотная генерация, двойной металлический волновод, непрерывная генерация.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.14.63308.20690

Терагерцевые (THz) квантово-каскадные лазеры (ККЛ) продемонстрировали возможность генерации излучения в суб-THz-диапазоне [1], на частотах от 1.2 [2] до 6 THz [3] и даже выше [4,5]. Это делает данные источники крайне перспективными для задач терагерцевой спектроскопии. Генерация в таком широком диапазоне частот открывает возможности детектирования опасных веществ [6], исследования с высоким спектральным разрешением структуры атомов и ионов в плазме [7]. Способность терагерцевых ККЛ работать в непрерывном режиме генерации с лазерным пучком, близким к распределению Гаусса [8], позволяет использовать данные источники в качестве основы гетеродина спектрометра [9].

Одна из особенностей традиционных полосковых ККЛ с резонатором Фабри–Перо состоит в том, что генерируемое ими излучение обычно является многомодовым, с большим числом продольных и поперечных мод. Это значительно усложняет использование таких приборов для ряда задач, в частности для детектирования атомов и молекул, имеющих интенсивные линии поглощения в THz-диапазоне [10].

Одночастотная генерация ККЛ может быть достигнута различными способами, включая использование резонаторов Фабри–Перо небольшой длины, двухсекционных лазеров со связанными резонаторами Фабри–Перо [11], а также фотонных кристаллов [12].

Однако указанные методы имеют ряд недостатков: существенное уменьшение мощности генерируемого THz-излучения, трудность достижения требуемой частоты генерации и технологическая сложность реализации таких конструкций. Наиболее надежным и востребованным методом достижения одночастотной генерации в ККЛ является создание распределенной обратной связи (РОС) для селекции спектральных компонент генерируемого излучения [13].

В настоящей работе продемонстрирован терагерцевый ККЛ с РОС с одночастотной генерацией в непрерывном режиме. Активная область лазера основана на резонансно-фононном дизайне с четырьмя GaAs/Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As квантовыми ямами (КЯ) в периоде, что позволяет сохранять условие лазерной генерации до температур, превышающих 70 K (рис. 1) [14]. Толщины слоев в периоде начиная с инжекционного барьера составили 3.39/9.03/4.80/8.18/1.69/6.77/3.95/16.37 nm, где толщины КЯ GaAs выделены жирным шрифтом. Широкие КЯ GaAs (16.37 nm) легировались донорной примесью кремния с концентрацией  $N_d = 3.0 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Число периодов в структуре составляло 185, что соответствует суммарной толщине активной области лазера около 10  $\mu$ m.

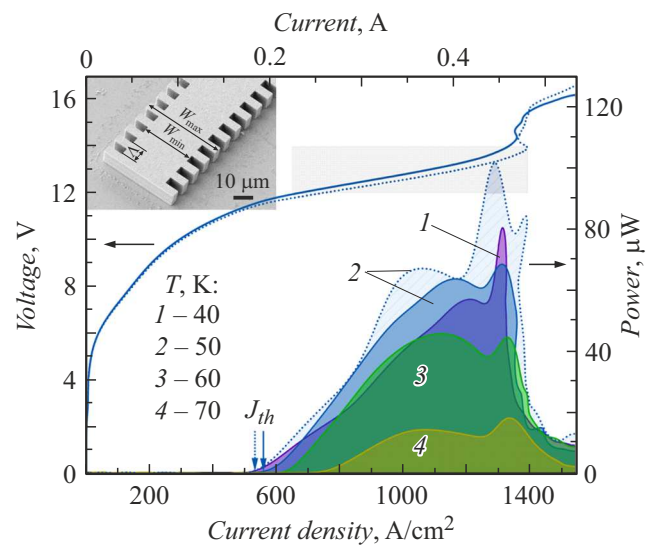
Для достижения одночастотной генерации ККЛ сформирована РОС первого порядка на основе периодического изменения ширины двойного металлического

волновода, что соответствует модуляции показателя преломления среды, в которой распространяется излучение. Преимуществом использования такого подхода являются относительная простота расчета частоты генерации лазера и минимальные изменения маршрута изготовления ККЛ с двойным металлическим волноводом [15,16]. За целевую частоту выбрана интенсивная линия поглощения изотополога воды  $\text{HD}^{16}\text{O}$  — 4.08 THz [17]. С помощью метода конечных элементов и решения системы скоростных уравнений по аналогии с работой [18] были подобраны оптимальные геометрические параметры ККЛ с РОС: период РОС  $\Lambda = 10.8 \mu\text{m}$ , ширина волновода от  $W_{\min} = 30 \mu\text{m}$  до  $W_{\max} = 48 \mu\text{m}$  (см. вставку на рис. 1), что определяет глубину модуляции. В состав РОС включен четвертьволновой сдвиг, размещенный в центре лазерного полоска. Наличие четвертьволнового сдвига является необходимым условием достижения одночастотной генерации для такой геометрии волновода [19,20]. Следует отметить, что используемый коэффициент заполнения РОС (соотношение ширины „зубца“ к периоду РОС) составлял 50%. При численной оптимизации геометрии РОС удалось получить расчетную брэгговскую частоту  $f_{Br} = 4.07 \text{ THz}$ , близкую к целевой частоте.

Изготовление ККЛ с РОС выполнялось в рамках стандартного маршрута изготовления ККЛ с двойным металлическим волноводом (детально описано в работах [15,16]). Формирование РОС с указанными выше параметрами происходит методом плазмохимического травления, где в качестве маски для травления используется верхний металл лазерного волновода. Центральная часть волновода шириной  $W_{\min} = 30 \mu\text{m}$  позволяет провести разварку золотой проволокой методом „шарик–клин“ для эффективной инжекции тока.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и ватт-амперных характеристик (ВтАХ) в непрерывном режиме проводились с помощью источника-измерителя Keithley 2400 и калиброванного оптоакустического приемника GC-1P производства ООО „Тидекс“ в диапазоне температур 40–70 К. Охлаждение ККЛ и поддержание заданной температуры осуществлялось криогенным рефрижератором Стирлинга TC4189 производства Lihan Cryogenics, Ltd. Спектральные исследования ККЛ с РОС и без нее проводились с помощью вакуумного фурье-спектрометра Bruker Vertex 70v. В качестве детектора использовался штатный пироэлектрический приемник, в качестве светоделиителя — Mylar Multilayer. Спектральное разрешение составляло  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  (6 GHz). При аподизации использовалась функция Хаппа–Гензеля.

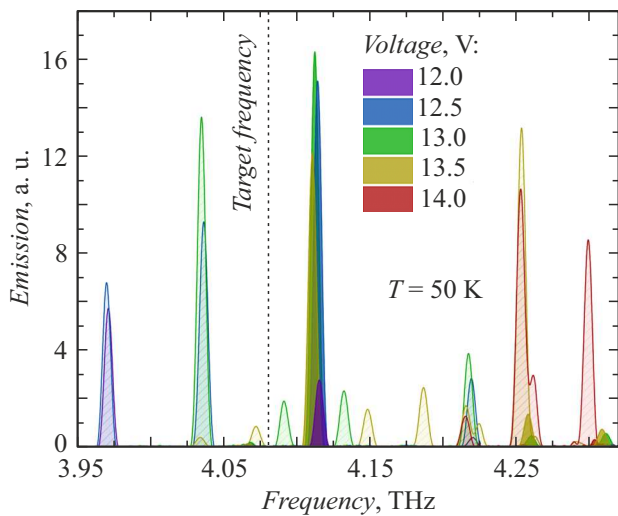
В указанном диапазоне температур наблюдалась генерация ККЛ с РОС в непрерывном режиме с выходной мощностью в десятки микроватт (рис. 1). Для сравнения также приводится ВтАХ для изготовленного из той же структуры ККЛ с полосковым резонатором Фабри–Перо (далее ККЛ без РОС), работающего в непрерывном режиме при температуре 50 К. Плотности пороговых токов  $J_{th}$  при  $T = 50 \text{ K}$  составляют 535 и



**Рис. 1.** ВАХ и ВтАХ для ККЛ с РОС (сплошные линии) и без нее (пунктирные линии) при различных температурах. ВАХ для ясности приведены только при  $T = 50 \text{ K}$ . Стрелками указаны значения пороговых плотностей тока при  $T = 50 \text{ K}$ . Верхняя ось (ток) относится только к ККЛ с РОС. Серая область соответствует диапазону рабочих напряжений, для которого проводились измерения спектров. На вставке — изображение части ККЛ с РОС, полученное с помощью растрового электронного микроскопа Carl Zeiss Supra 35. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

562  $\text{A/cm}^2$  для ККЛ без РОС и с РОС соответственно. Приведенные значения  $J_{th}$  показывают, что формирование структуры РОС вносит минимальные оптические потери и не приводит к значительному увеличению  $J_{th}$ . При этом линейные участки роста ВтАХ для ККЛ с РОС и без РОС практически совпадают, т.е. включение РОС в состав ККЛ не приводит к уменьшению излучаемой мощности. Выигрыш по мощности излучения у ККЛ без РОС при больших токах накачки наиболее вероятно связан со значительным смещением спектра усиления в высокочастотную область, где РОС подавляет генерацию на высокочастотных модах. Отметим, что изготовленные непрерывные ККЛ с РОС демонстрируют схожие параметры по выходной мощности и максимальной рабочей температуре при сравнении с зарубежными работами [21–24].

На рис. 2 приведены спектры генерации ККЛ с РОС и без нее, измеренные при разных напряжениях при  $T = 50 \text{ K}$ . ККЛ с РОС за счет наличия четвертьволнового сдвига практически во всем рабочем диапазоне напряжений (12–14 V) демонстрирует одночастотную генерацию на частоте 4.11 THz, что согласуется с рассчитанной брэгговской частотой  $f_{Br} = 4.07 \text{ THz}$ . Небольшое отличие (на 40 GHz) частоты излучения ККЛ с РОС от расчетной  $f_{Br}$ , вероятнее всего, связано с неточностью определения эффективного показателя преломления многослойной активной среды ККЛ. Важно



**Рис. 2.** Спектры излучения при  $T = 50$  К ККЛ с РОС (выделены заливкой) и без нее (выделены штриховкой) при различных напряжениях на лазерах. Вертикальной пунктирной линией обозначена целевая частота, соответствующая линии поглощения  $\text{HD}^{16}\text{O}$ . Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

отметить, что спектральная линия ККЛ с РОС на частоте 4.11 THz не совпадает с набором мод Фабри–Перо. Это подтверждает работу РОС по подавлению мод Фабри–Перо и генерацию лазера на брэгговской частоте на основе теории связанных волн [25]. Спектр ККЛ без РОС является многомодовым, охватывающим диапазон частот 3.97–4.33 THz. При увеличении напряжения происходит перекачка энергии в высокочастотные моды, что связано со штарковским сдвигом контура усиления ККЛ.

Таким образом, нами разработан, изготовлен и экспериментально охарактеризован ККЛ с РОС, включающей четвертьволновый сдвиг, с одночастотной генерацией в широком диапазоне напряжений. Спектральная линия РОС ККЛ вблизи 4.11 THz хорошо согласуется с рассчитанной брэгговской частотой, нацеленной на линию поглощения полутяжелой воды  $\text{HD}^{16}\text{O}$ . Продемонстрирована работа ККЛ с РОС в непрерывном режиме генерации с мощностью в десятки микроватт при температурах до 70 К, что позволяет использовать для охлаждения лазеров компактные криогенные рефрижераторы.

### Финансирование работы

Исследование излучательных характеристик ККЛ с РОС выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-49-10010 (<https://rscf.ru/project/25-49-10010/>). Расчет конструкции РОС осуществлен при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф26РНФ-052. Изготовление ККЛ с РОС реализовано при поддержке госзадания НИЦ „Курчатовский институт“. Сборка ККЛ на тепло-

отводе выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSRM-2026-0022). Д.А. Белов благодарит Фонд развития теоретической физики и математики „БАЗИС“ за стипендиальную поддержку.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] O.Y. Volkov, I.N. Duzhikov, R.A. Khabibullin, A.N. Baranov, Y.Y. Divin, *Appl. Phys. Lett.*, **121** (26), 263504 (2022). DOI: 10.1063/5.0135562
- [2] C. Walther, M. Fischer, G. Scalari, R. Terazzi, N. Hoyler, J. Faist, *Appl. Phys. Lett.*, **91** (13), 131122 (2007). DOI: 10.1063/1.2793177
- [3] M. Shahili, S.J. Addamane, A.D. Kim, C.A. Curwen, J.H. Kawamura, B.S. Williams, *Nanophotonics*, **13**, 1735 (2024). DOI: 10.1515/nanoph-2023-0726
- [4] D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, R.A. Khabibullin, M.A. Fadeev, V.I. Gavrilenko, A.A. Dubinov, *J. Appl. Phys.*, **135** (13), 133108 (2024). DOI: 10.1063/5.0198236
- [5] D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, R.A. Khabibullin, M.A. Fadeev, A.A. Dubinov, *Phys. Status Solidi RRL*, **18** (5), 2300392 (2024). DOI: 10.1002/pssr.202300392
- [6] H.S. Müller, F. Schlöder, J. Stutzki, G. Winnewisser, *J. Mol. Struct.*, **742**, 215 (2005). DOI: 10.1016/j.molstruc.2005.01.027
- [7] X. Lü, B. Röben, K. Biermann, J.R. Wubs, U. Macherotte, K.-D. Weltmann, J.H. van Helden, L. Schrottke, H.T. Grahn, *Semicond. Sci. Technol.*, **38**, 035003 (2023). DOI: 10.1088/1361-6641/acb1cd
- [8] R. Li, Y. Xu, S. Zhang, Y. Ma, J. Liu, B. Zhou, L. Wang, N. Zhuo, J. Liu, J. Zhang, S. Zhai, S. Liu, F. Liu, Q. Lu, *Light Sci. Appl.*, **13**, 193 (2024). DOI: 10.1038/s41377-024-01567-2
- [9] H. Hübers, H. Richter, U.U. Graf, R. Güsten, B. Klein, J. Stutzki, H. Wiesemeyer, *Nat. Commun.*, **14** (1), 6812 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-42389-x
- [10] R.A. Khabibullin, N.V. Shchavruk, D.S. Ponomarev, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, K.V. Maremyanin, O.Y. Volkov, V.V. Pavlovskiy, A.A. Dubinov, *Opt.-Electron. Rev.*, **27**, 129 (2019). DOI: 10.1016/j.opelre.2019.11.002
- [11] Р.А. Хабибуллин, Д.С. Пономарев, И.А. Глинский, А.К. Долгов, Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, *Одночастотный квантово-каскадный лазер терагерцового диапазона*, патент РФ № RU 2839382 C1 (per. 30.04.2025).
- [12] Y. Chassagneux, R. Colombelli, W. Maineult, S. Barbieri, H.E. Beere, D.A. Ritchie, S.P. Khanna, E.H. Linfield, A.G. Davies, *Nature*, **457**, 174 (2009). DOI: 10.1038/nature07636
- [13] B.G. Lee, M.A. Belkin, C. Pflügl, L. Diehl, H.A. Zhang, R.M. Audet, J. MacArthur, D.P. Bour, S.W. Corzine, G.E. Höfler, F. Capasso, *IEEE J. Quantum Electron.*, **45**, 554 (2009). DOI: 10.1109/JQE.2009.2013175
- [14] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Д.С. Пономарев, С.С. Пушкарёв, В.И. Гавриленко, Р.А. Хабибуллин, *Изв. вузов. Радиофизика*, **65** (5-6), 505 (2022). DOI: 10.52452/00213462\_2022\_65\_05\_505 [D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, D.S. Ponomarev, S.S. Pushkarev, V.I. Gavrilenko, R.A. Khabibullin, *Radiophys. Quantum Electron.*, **65** (5-6), 461 (2022). DOI: 10.1007/s11141-023-10228-0].

- [15] O. Volkov, V. Pavlovskiy, I. Gundareva, R. Khabibullin, Y. Divin, IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol., **11** (3), 330 (2020). DOI: 10.1109/tthz.2020.3034815
- [16] R.A. Khabibullin, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, A.Y. Pavlov, R.R. Galiev, D.S. Ponomarev, A.P. Vasilyev, A.G. Kuzmenkov, N.A. Maleev, F.I. Zubov, M.V. Maksimov, D.A. Belov, A.V. Ikonnikov, D.I. Kuritsyn, R.K. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.A. Anfertev, V.L. Vaks, A.V. Antonov, A.A. Dubinov, S.V. Morozov, V.I. Gavrilenko, J. Appl. Phys., **136**, 194504 (2024). DOI: 10.1063/5.0230499
- [17] S.N. Mikhailenko, E.V. Karlovets, A.O. Koroleva, A. Campargue, Molecules, **29**, 5508 (2024). DOI: 10.3390/molecules29235508
- [18] M. Haldar, IEEE J. Quantum Electron., **41** (11), 1349 (2005). DOI: 10.1109/jqe.2005.857062
- [19] М.В. Винокуров, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, Р.А. Хабибуллин, Оптика и спектроскопия, в печати.
- [20] H.C. Casey, M.B. Panish, *Heterostructure lasers* (Academic Press, 1978), vol. 1.
- [21] B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, Opt. Lett., **30**, 2909 (2005). DOI: 10.1364/OL.30.002909
- [22] W. Guan, Z. Li, S. Wu, H. Liu, X. Ma, Y. Zhao, C. Wang, B. Liu, Z. Zhang, J. Cao, H. Li, Adv. Photon. Nexus, **2**, 026006 (2023). DOI: 10.1117/1.APN.2.2.026006
- [23] Y. Zeng, B. Qiang, Q.J. Wang, Adv. Opt. Mater., **8**, 1900573 (2020). DOI: 10.1002/adom.201900573
- [24] S. Khanal, L. Gao, L. Zhao, J.L. Reno, S. Kumar, Sci. Rep., **6**, 32978 (2016). DOI: 10.1038/srep32978
- [25] H. Kogelnik, C.V. Shank, J. Appl. Phys., **43** (5), 2327 (1972). DOI: 10.1063/1.1661499