Непрерывный терагерцовый квантовый каскадный лазер, выращенный методом металлоорганической газофазной эпитаксии

© Р.Х. Жукавин[1], Р.А. Хабибуллин[2,3], Т.А. Багаев[4], А.А. Афоненко[5], Д.В. Ушаков[5], А.В. Иконников[6], Д.И. Курицын[1,7], Д.А. Постнов[1,8], К.А. Ковалевский[1], П.А. Юнин[1,8], А.В. Антонов[1], А.А. Дубинов[1,8], Д.А. Белов[6], Ф.И. Зубов[9], И.А. Глинский[3], И.Е. Рыков[3], И.Е. Мартычев[4], М.А. Ладугин[3], А.А. Мармалюк[3], А.Ю. Павлов[2], Р.Р. Галиев[2], Д.С. Пономарев[2], С.В. Морозов[1,8], В.И. Гавриленко[1,7,8]

[1] Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603087 Нижний Новгород, Россия
[2] НИЦ „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт,
141701 Долгопрудный, Московская область, Россия
[4] АО ≪НИИ „Полюс“ им. М.Ф. Стельмаха≫,
117342 Москва, Россия
[5] Белорусский государственный университет,
220030 Минск, Беларусь
[6] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия
[7] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
[8] Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022 Нижний Новгород, Россия
[9] Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: gavr@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 31 марта 2026 г.
В окончательной редакции 23 апреля 2026 г.
Принята к публикации 3 июля 2026 г.

Методом металлоорганической газофазной эпитаксии выращена структура терагерцового квантового каскадного лазера с резонансно-фононным дизайном. Спроцессированы лазерные структуры с двойным металлическим волноводом, демонстрирующие непрерывную генерацию в диапазоне 4.0–4.7 ТГц при температурах до 50 K.

Ключевые слова: квантовый каскадный лазер, терагерцовый диапазон, металлоорганическая газофазная эпитаксия, непрерывная генерация.

DOI: 10.61011/FTP.2026.03.63583.9317

1. Введение

Более чем за 20 лет после первой демонстрации [1] терагерцовые (ТГц) квантовые каскадные лазеры (ККЛ) приблизились к порогу широкой коммерциализации [2]. ККЛ являются перспективными источниками когерентного излучения ТГц диапазона (1.2–6.0 ТГц [3–5]), который все еще остается одним из наименее освоенных диапазонов электромагнитного спектра. Впечатляющим недавним результатом является рекордно высокая рабочая температура 261 K [6], что позволяет избавиться от дорогостоящего криогенного охлаждения и открыть новые области применения, где портативность является важным свойством. Однако для выхода ТГц ККЛ за пределы лабораторных исследований требуется дополнительное развитие технологии изготовления ТГц ККЛ, отличающейся значительной сложностью и стоимостью. Во многом это обусловлено почти безальтернативным использованием молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) для роста гетероструктур ККЛ [2] в силу чувствительности характеристик к фоновой концентрации примесей, резкости гетерограниц, стабильности роста и резкости профилей легирования [7,8]. Альтернативным методом роста может быть газофазная эпитаксия (Metalorganic chemical vapour deposition, MOCVD), которая широко применяется для промышленного производства полупроводниковых гетероструктур для современной фотоники и электроники [9]. MOCVD уже успешно применялась для роста структур ККЛ среднего ИК-диапазона [10–14], фотоприемников с множественными

квантовыми ямами (КЯ) [15–18]. Известно несколько работ, в которых были продемонстрированы ТГц ККЛ, выращенные методом MOCVD. В работах [19,20] исследовались ККЛ, выращенные в швейцарской группе, давно прекратившей работы в данном направлении, а в работе [21] описан ТГц ККЛ, выращенный в группе авторов настоящей статьи. Отмечалось, что характеристики полученных ККЛ практически не уступали характеристикам лазеров, выращенных методом МПЭ. Однако все MOCVD ТГц ККЛ из указанных выше работ были рассчитаны лишь на работу на частотах в области „sweet-point“ — диапазон 3–4 ТГц, который является наиболее оптимальным с точки зрения характеристик ТГц ККЛ, в частности максимальной рабочей температуры [22], и только в импульсном режиме. В области частот < 3 ТГц рабочие температуры ККЛ снижаются из-за роста поглощения на свободных носителях, в области > 4 ТГц — из-за роста решеточного поглощения при приближении к частоте оптических фононов. В настоящей работе впервые продемонстрирован ККЛ диапазона 4.0–4.7 ТГц, выращенный методом MOCVD, работающий как в импульсном, так и в непрерывном режимах.

2. Методика эксперимента и расчеты

Для создания ККЛ на гетеропаре $GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ был выбран дизайн с четырьмя КЯ в периоде структуры с резонансно-фононным опустошением нижнего лазерного уровня. Детали расчетов электронного транспорта, спектров усиления и генерации представлены в работе [23]. Оптимизация дизайна производилась путем сканирования толщин КЯ и барьеров. На рис. 1 представлена зонная диаграмма активной области с толщинами слоев в каждом периоде структуры **5.08**/15.24/**6.21**/9.32/**3.95**/11.57/**4.23**/8.47 нм (толщины барьеров $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ выделены жирным шрифтом) при напряжении на периоде структуры 60 мВ. Центральная часть широкой КЯ толщиной 4.52 нм полагалась легированной кремнием с концентрацией $1.56 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ (слоевая концентрация $7.07 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$), контактные слои толщиной 50 нм — с концентрацией $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. В каждом периоде структуры электроны инжектируются с уровня инжектора i на верхний лазерный уровень u, далее с испусканием фотона переходят на нижний лазерный уровень l, туннельно-связанный с экстракторами e и ep, с которых электроны переходят на уровень инжектора следующего периода i'' с испусканием оптического фонона. Как было показано в работе [24], при высоких частотах ~ 5 ТГц уровень ep, находящийся в одной КЯ с инжектором следующего каскада i'', становится паразитным из-за возрастания вероятности поглощения на переходе $(i'' \to ep)$. Для преодоления этого эффекта вводится „промежуточная“ КЯ с уровнем экстрактора e, отстоящим от уровня инжектора, следующего периода i'' на энергию продольного оптического фонона (~ 37 мэВ в GaAs), а паразитный уровень ep смещается вверх от резонанса так, чтобы расстояние по энергии между уровнями ep и i'' составляло 42 мэВ. Смещение уровня ep вверх от резонанса позволяет существенно уменьшить поглощение на паразитном переходе, а введение дополнительной КЯ также позволяет уменьшить уширение нижнего лазерного уровня l.

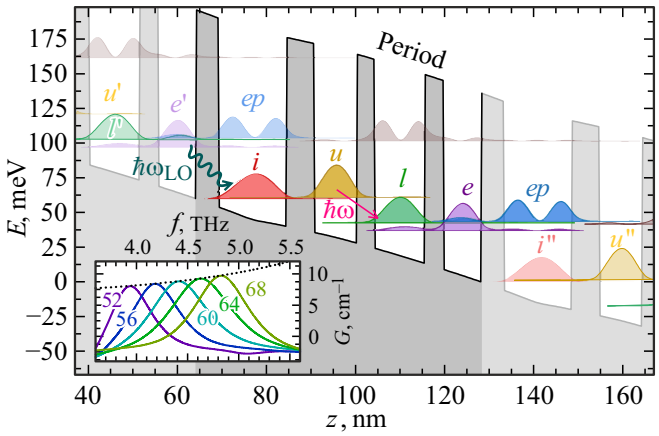

Рис. 1. Зонная диаграмма и квадраты модулей волновых функций электронов исследуемого ККЛ при напряжении на периоде структуры 60 мВ при температуре $T = 40$ K. На вставке — рассчитанные спектры усиления (сплошные линии) и волноводных потерь (пунктир) в режиме генерации при различных напряжениях (в мВ) на периоде структуры.

На вставке к рис. 1 сплошными линиями показаны расчетные спектры усиления в режиме генерации при различных напряжениях на периоде структуры. Пунктиром показана частотная зависимость суммарных (безызлучательных и излучательных [25]) потерь в двойном металлическом волноводе с длиной полоска 3 мм и шириной 20 мкм. Видно, что диагональный характер оптического перехода (между уровнями u и l в соседних КЯ) позволяет осуществлять перестройку полосы излучения в широких пределах, изменяя напряжение на структуре.

Рост структуры с толщиной активной области 10 мкм осуществлялся методом MOCVD в реакторе горизонтального типа на полуизолирующей подложке GaAs(100). Диапазон температур роста составлял 650–800 °C при давлении в реакторе 5–10 кПа. В качестве прекурсоров Ga, Al и As использовались триметилгаллий, триметилалюминий и высокочистый арсин. Рост структуры при низком давлении позволил существенно снизить скорости роста по сравнению с режимом роста при обычном (высоком) давлении, которые составляли 98 Å/мин для слоев GaAs и 115 Å/мин для слоев $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$. Это позволило выращивать тонкие слои КЯ и барьеров с хорошим качеством гетерограниц. Общее время эпитаксиального роста составило ~ 14 ч.

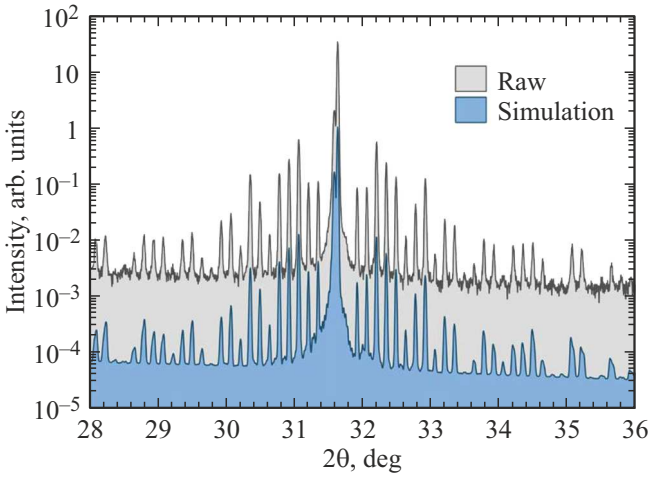

Рис. 2. Измеренная (Raw) и рассчитанная (Simulation) дифрактограммы (XRD) гетероструктуры ККЛ вблизи отражения (002) GaAs ($\lambda = 0.154$ нм). Для наглядности дифрактограммы сдвинуты относительно друг друга.

На рис. 2 представлены измеренная (Raw) и рассчитанная (Simulation) дифрактограммы (XRD) выращенной гетероструктуры ККЛ вблизи отражения (002) GaAs. Измерения проводились на многофункциональном дифрактометре Bruker D8 Discover с монохроматором двукратного отражения Ge (220) на первичном пучке, использовалось Cu $K_\alpha 1$-излучение ($\lambda = 0.154$ нм). Видно много (до 30, ср. с данными работы [19]) сателлитных пиков от выращенной сверхрешетки, что свидетельствует о достаточно высоком качестве структуры. Для подгонки рассчитанной дифрактограммы было зафиксировано соотношение между толщинами слоев в периоде структуры как в ростовой спецификации, варьировался только „шкальный“ фактор общей толщины периода. Наилучший результат подгонки был достигнут при линейном изменении толщины слоев за время роста на 2% при минимальном значении толщины периода 63.72 нм (-0.54% от „ростовых“ значений). Следует отметить, что наилучшая подгонка получилась именно с линейным градиентом периода в процессе роста, а не со случайными его флуктуациями.

Для оценки шероховатости интерфейсов использовался метод малоугловой рентгеновской рефлектометрии (XRR). Записывалась кривая нерезонансного френелевского отражения от границ сред с разными оптическими свойствами. Несмотря на то что для таких структур рефлектометрия гораздо менее информативна, чем дифрактометрия, она позволяет получать оценки ширин интерфейсов. При подгонке использовалась та же модель, что и для дифрактометрии, на поверхность был добавлен окисленный слой, а варьировались толщины периодов и шероховатости интерфейсов. Наилучший результат получился при толщине периода 63.1 нм, что близко к определенному методом XRD минимальному значению 63.72 нм. Скорее всего, это свидетельствует о том, что скорость роста падает в процессе MOCVD, так как рефлектометрия — это поверхностно-чувствительный метод. Шероховатости интерфейсов, определенные из подгонки кривой нерезонансного френелевского отражения, оказались на уровне 0.5–0.6 нм. Отметим, что исходные шероховатости чистых коммерческих подложек арсенида галлия, по данным XRR, обычно составляют ~ 0.3 нм.

Из выращенной структуры выкалывались образцы квадратной формы размером $\sim 1 \times 1$ см, на которых формировался двойной металлический волновод [26]. В результате структура толщиной ~ 10 мкм оказывалась ограниченной двумя металлическими слоями Ti/Au. Затем с помощью литографии формировались лазерные полоски шириной 20 и 30 мкм. После утончения подложки-носителя до толщины ~ 100 мкм выкалывались лазерные чипы длиной ~ 3 мм. Чипы монтировались на медный теплопровод типа F-mount, являющийся нижним контактом к структуре. К верхнему контакту приваривались несколько золотых проволок диаметром 18 мкм равномерно по всей длине полоска.

ККЛ на теплоотводе монтировался на холодный палец в оптическом криостате замкнутого цикла CFA-201 (Cryogenic Instruments LLC, Russia) с выходным окном из ТРХ с минимальной рабочей температурой 8 K и охлаждающей способностью 7.5 Вт при температуре 20 K. Для измерений излучательных (ватт-амперных) характеристик ККЛ излучение заводилось по металлическому световоду в транспортный гелиевый сосуд Дьюара СТГ-40, где регистрировалось примесным фотоприемником Ge : Ga. В непрерывном режиме ККЛ запитывался от источника питания постоянного тока Keithley 2400 (source-meter), позволяющего одновременно измерять выходное напряжение и ток и обеспечивать их непрерывную развертку. Для питания ККЛ в импульсном режиме использовался специально изготовленный электронный ключ, позволяющий получать импульсы заданной длительности, скважности и амплитуды, а также измерять напряжение и ток, проходящий через лазер. При измерениях излучательных характеристик в непрерывном режиме излучение модулировано чоппером на частоте 12 Гц, далее сигнал с фотоприемника Ge : Ga детектировался синхронным детектором (Lock-in amplifier) SR830 и записывался в память компьютера, а в импульсном режиме (длительность импульса 20 мкс, частота повторения 1 кГц) сигнал с фотоприемника Ge : Ga детектировался цифровым осциллографом Tektronix TDS3034B. Спектры излучения ККЛ измерялись при помощи вакуумированного ИК фурье-спектрометра Bruker Vertex 80v со спектральным разрешением 0.1 $см^{-1}$. Излучение фокусировалось на входном окне спектрометра из ТРХ двумя внеосевыми параболическими зеркалами и детектировалось при помощи штатного пироэлектрического приемника спектрометра DLaTGS.

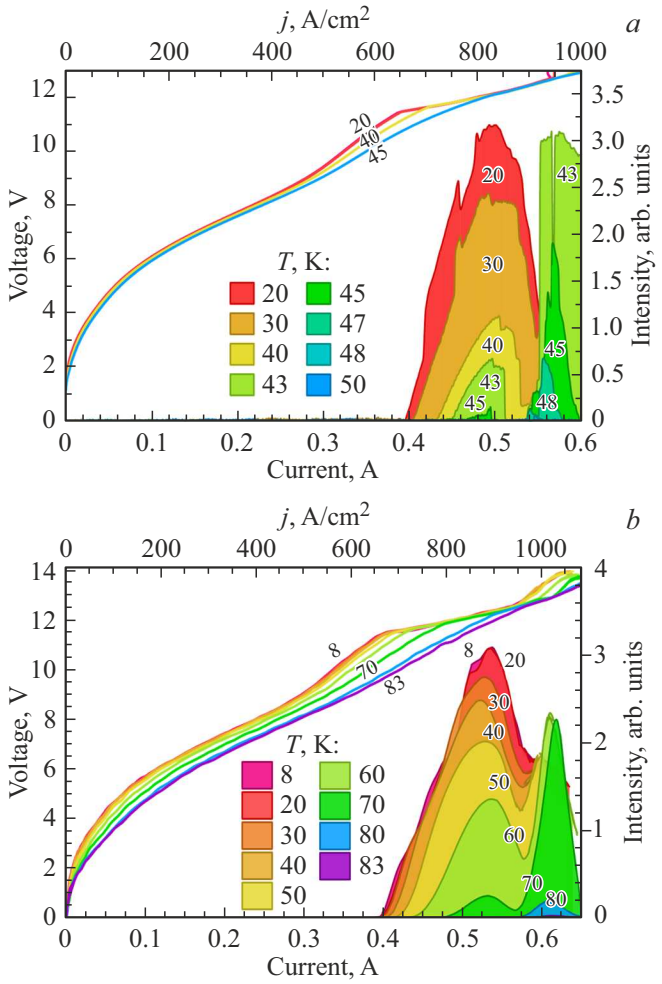

Рис. 3. ВАХ и излучательные характеристики ККЛ с шириной полоска 20 мкм в непрерывном (*a*) и импульсном (*b*) режимах, измеренные при различных температурах.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлены вольт-амперные (ВАХ) и излучательные (ватт-амперные) характеристики ККЛ с шириной полоска 20 мкм, измеренные в непрерывном и импульсном режимах при различных температурах. В обоих случаях возникновение генерации с ростом тока при низких температурах сопровождается выраженным изломом на ВАХ — стимулированное испускание фотонов способствует ускорению токопереноса через структуру лазера. В непрерывном режиме максимальная рабочая температура для ККЛ с шириной полоска 20 мкм составляла 50 K, в импульсном — 83 K. Для ККЛ с шириной полоска 30 мкм в импульсном режиме максимальная рабочая температура была несколько выше — 90 K, что очевидно связано с меньшей долей потерь на боковых гранях лазерного полоска. В отличие от ККЛ с близкой геометрией волновода и пороговым током ~ 100 А/см^2, описанного в нашей работе [27], где различие максимальных рабочих температур в непрерывном и импульсном режимах было невелико (90 и 95 K соответственно), в исследуемом лазере пороговая плотность тока превышала 650 А/см^2, что, очевидно, вызывало заметный перегрев активной области лазера в непрерывном режиме. Отметим немонотонную зависимость интенсивности излучения от тока, что, скорее всего, связано с изменением расстояния между уровнями l и e (рис. 1) при изменении напряжения смещения и сменой нижнего рабочего лазерного уровня, что находит отражение и в спектрах излучения.

На рис. 4 представлены спектры излучения ККЛ с шириной полоска 20 мкм в непрерывном и импульсном режимах. Генерация наблюдается на эквидистантных модах резонатора Фабри–Перо, образованного сколотыми гранями лазерного полоска. Видно, что с ростом тока/напряжения на структуре полоса генерации в целом смещается в область более высоких частот, что естественно для ККЛ с „диагональным“ дизайном, когда оптические переходы идут между уровнями в соседних КЯ, расстояние между которыми возрастает с приложенным напряжением. Как видно из рис. 4, спектр генерации исследуемого ККЛ состоит из двух областей: до 140 см$^{-1}$ и выше 142 см$^{-1}$, причем в высокочастотной области генерация возникает только при токе 600 мА. „Переключение“ между этими двумя областями спектра с ростом тока соответствует переходу через минимум интегральной интенсивности излучения между 500 и 600 мА на рис. 3, что подтверждает высказанное выше предположение о смене нижнего рабочего уровня лазерного перехода.

На рис. 5 представлены спектры излучения ККЛ с шириной полоска 20 мкм в непрерывном режиме при максимальном токе 620 мА и различных температурах. Видно, что с ростом температуры спектр излучения обужается при одновременном росте амплитуды отдельных мод. При температурах 41–42 K, близких к максимальной

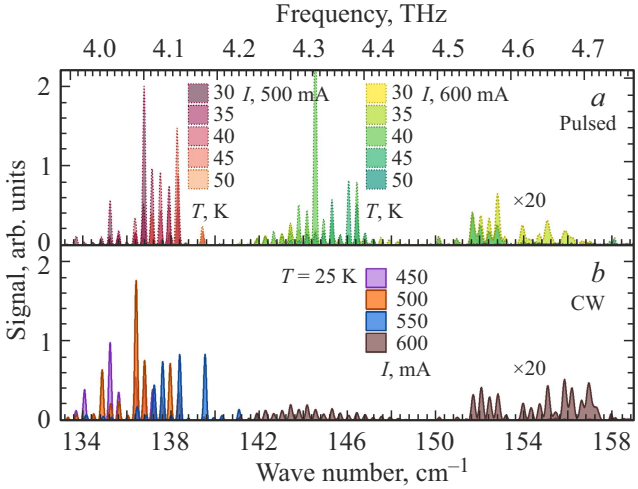

Рис. 4. Спектры излучения ККЛ с шириной полоска 20 мкм в импульсном (*a*) и непрерывном (*b*) режимах при различных токах и температурах.

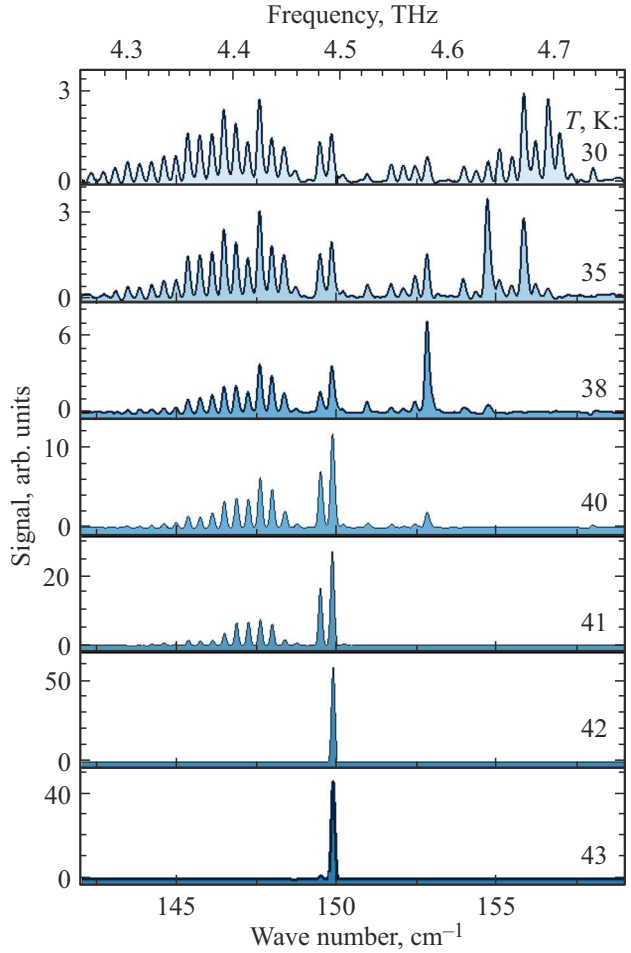

Рис. 5. Спектры излучения ККЛ с шириной полоска 20 мкм в непрерывном режиме при токе 620 мА и различных температурах.

ной рабочей (50 K), спектр излучения становится практически одномодовым, что может представлять интерес для спектроскопических приложений.

4. Заключение

Таким образом, в работе впервые продемонстрирован непрерывный ТГц ККЛ, выращенный методом металлоорганической газофазной эпитаксии. Полоса излучения лазера с резонансно-фононным дизайном на основе гетеропары $GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ с 4 квантовыми ямами в периоде структуры перестраивается током в диапазоне 4.0–4.7 ТГц. Максимальные рабочие температуры составили 50 и 90 K в непрерывном и импульсном режимах соответственно.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 21-72-30020-П, https://rscf.ru/project/21-72-30020 / (исследование ВАХ и интегральных излучательных характеристик ККЛ) и № 25-49-10010, https://rscf.ru/project/25-49-10010/ (исследование спектров излучения ККЛ). Расчет зонного дизайна был выполнен при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Ф26РНФ-052. Изготовление ККЛ проведено при финансовой поддержке государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“. Измерения спектров излучения ККЛ выполнены с использованием оборудования ЦКП ИФМ РАН „Физика и технология микро- и наноструктур“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H.E. Beere, E.H. Linfield, A.G. Davies, D.A. Ritchie, R.C. Iotti, F. Ross. Nature, **417**, 156 (2002).
[2] M.S. Vitiello, A. Tredicucci. Adv. Phys.: X, **6** (1), 1893809 (2021). DOI: 10.1080/23746149.2021.1893809
[3] M.S. Vitiello, G. Scalari, B. Williams, P. De Natale. Opt. Express, **23** (4), 5167 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.005167
[4] G. Liang, T. Liu, Q.J. Wang. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **23** (4), 1200118 (2017). DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2625982
[5] M. Shahili, S.J. Addamane, A.D. Kim, C.A. Curwen, J.H. Kawamura, B.S. Williams. Nanophotonics, **13** (10), 1735 (2024). DOI: 10.1515/nanoph-2023-0726
[6] A. Khalatpour, M.C. Tam, S.J. Addamane, J. Reno, Z. Wasilewski, Q. Hu. Appl. Phys. Lett., **122**, 161101 (2023). DOI: 10.1063/5.0144705
[7] L.H. Li, J.X. Zhu, L. Chen, A.G. Davies, E.H. Linfield. Opt. Express, **23** (3), 2720 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.002720
[8] N. Stanojević, A. Demić, N. Vuković, P. Dean, Z. Ikonić, D. Indjin, J. Radovanović. Sci. Rep., **14** (1), 5641 (2024). DOI: 10.1038/s41598-024-55700-7
[9] S. Irving, P. Capper (eds). *Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE): Growth, Materials Properties, and Applications* (Wiley, 2020). ISBN 9781119313014
[10] R. Green, J. Roberts, A. Krysa, L. Wilson, J. Cockburn, D. Revin, E. Zibik, D. Carder, R. Airey. Physica E, **21** (2–4), 863 (2004). DOI: 10.1016/j.physe.2003.11.133
[11] M. Troccoli, L. Diehl, D.P. Bour, S.W. Corzine, N. Yu, C.Y. Wang, M.A. Belkin, G. Hofler, R. Lewick, G. Wysocki, F.K. Tittel, F. Capasso. J. Lightwave Technol., **26** (21), 3534 (2008). DOI: 10.1109/JLT.2008.925056
[12] И.И. Засавицкий, Д.А. Пашкеев, А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, Г.Т. Микаелян. Квант. электрон., **40** (2), 95 (2010).
[13] C.A. Wang, D.R. Calawa, A.K. Goyal, S. Menzel, F. Capasso. ECS Trans., **41** (6), 139 (2011).
[14] C.A. Wang, B. Schwarz, D.F. Siriani, L.J. Missaggia, M.K. Connors, T.S. Mansuripur, D.R. Calawa, D. McNulty, M. Nickerson, J.P. Donnelly, K. Creedon, F. Capasso. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **23** (6), 1200413 (2017). DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2677899
[15] В.Б. Куликов, Г.Х. Аветисян, Л.М. Василевская, И.Д. Залевский, И.В. Будкин, А.А. Падалица. ФТП, **38** (2), 218 (2004).

[16] J.H. Zhao, X.H. Tang, T. Mei, B.L. Zhang, G.Sh. Huang. J. Cryst. Growth, **268** (3–4), 432 (2004). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2004.04.068
[17] Y. Paltiel, A. Zussman, N. Snapi, A. Sher, G. Jung, K. Cohen, E. Benory, E. Weiss. Infr. Phys. Technol., **47**, 37 (2005). DOI: 10.1016/j.infrared.2005.02.009
[18] M. Graf, E. Dupont, H. Luo, S. Haffouz, Z.R. Wasilewski, A.J. Spring Thorpe, D. Ban, H.C. Liu. Infr. Phys. Technol., **52**, 289 (2009). DOI: 10.1016/j.infrared.2009.05.034
[19] L. Sirigu, A. Rudra, E. Kapon, M.I. Amanti, G. Scalari, J. Faist. Appl. Phys. Lett., **92**, 181111 (2008). DOI: 10.1063/1.2924294
[20] M.I. Amanti, G. Scalari, R. Terazzi, M. Fischer, M. Beck, J. Faist, A. Rudra, P. Gallo, E. Kapon. New J. Phys., **11**, 125022 (2009). DOI: 10.1088/1367-2630/11/12/125022
[21] Т.А. Багаев, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.И. Данилов, Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Зайцев, К.В. Маремьянин, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко, Р.Р. Галиев, А.Ю. Павлов, С.С. Пушкарев, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин. Письма ЖТФ, **48** (10), 16 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.10.52550.19162
[22] B. Wen, D. Ban. Prog. Quant. Electron., **80**, 100363 (2021). DOI: 10.1016/j.pquantelec.2021.100363
[23] Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов, В.И. Гавриленко, О.Ю. Волков, Н.В. Щаврук, Д.С. Пономарев, Р.А. Хабибуллин. Квант. электрон., **49** (10), 913 (2019).
[24] D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, An.A. Afonenko, R.A. Khabibullin, M.A. Fadeev, V.I. Gavrilenko, A.A. Dubinov. J. Appl. Phys., **135**, 133108 (2024). DOI: 10.1063/5.0198236
[25] S. Kohen, B.S. Williams, Q. Hu. J. Appl. Phys., **97**, 053106 (2005). DOI: 10.1063/1.1855394
[26] Р.А. Хабибуллин, Н.В. Щаврук, А.Ю. Павлов, Д.С. Пономарев, К.Н. Томош, Р.Р. Галиев, П.П. Мальцев, А.Е. Жуков, Г.Э. Цырлин, Ф.И. Зубов, Ж.И. Алфёров. ФТП, **50** (10), 1395 (2016).
[27] R.A. Khabibullin, D.V. Ushakov, A.A. Afonenko, A.Yu. 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.Kh. 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: 10.1063/5.0230491

Редактор Г.А. Оганесян

A continuous terahertz quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition

R.Kh. Zhukavin[1], R.A. Khabibullin[2,3], T.A. Bagaev[4], A.A. Afonenko[5], D.V. Ushakov[5], A.V. Ikonnikov[6], D.I. Kuritsyn[1,7], D.A. Postnov[1,8], K.A. Kovalevskii[1], P.A. Yunin[1,8], A.V. Antonov[1], A.A. Dubinov[1,8], D.A. Belov[6], F.I. Zubov[9], I.A. Glinskii[3], I.E. Rykov[3], I.E. Martychev[4], M.A. Ladugin[3], A.A. Marmalyuk[3], A.Yu. Pavlov[2], R.R. Galiev[2], D.S. Ponomarev[2], S.V. Morozov[1,8], V.I. Gavrilenko[1,7,8]

[1] Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603087 Nizhny Novgorod, Russia
[2] NRC „Kurchatov Institute“, 123182 Moscow, Russia
[3] Moscow Institute of Physics and Technology, 141701 Dolgoprudny, Moscow District, Russia
[4] POLYUS Research Institute of M.F. Stelmakh, JSC, 117342 Moscow, Russia
[5] Belorussian State University, 220030 Minsk, Belarus
[6] Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Russia
[7] Ioffe Institute, 194021 St. Petersburg, Russia
[8] Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603022 Nizhny Novgorod, Russia
[9] Alferov University, 194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A terahertz quantum cascade laser structure with a resonant-phonon design was grown using metal-organic chemical vapor deposition technique. The resulting laser structures, featuring a double metal waveguide, demonstrate continuous generation in the 4.0–4.7 THz range at temperatures up to 50 K.