

09

Коллимирующая оптическая система из полиметилпентена для квантово-каскадного лазера терагерцевого диапазона

© Д.И. Курицын^{1,2}, С.В. Морозов^{1,2}, Л.В. Гавриленко¹, В.И. Гавриленко^{1,2}, А.А. Дубинов¹, В.В. Румянцев¹, Р.А. Хабибуллин³, Г.С. Соколовский²

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

E-mail: dk@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 24 октября 2025 г.

В окончательной редакции 9 декабря 2025 г.

Принято к публикации 9 декабря 2025 г.

Представлены результаты экспериментального исследования собирающей оптической системы (коллиматора) для квантово-каскадного лазера с частотой ~ 4.1 THz, представляющей собой гиперполусферу — полусферическую линзу, приклеенную к пластине-спейсеру, прижатой к торцу квантово-каскадного лазера. Линза и спейсер были изготовлены из полиметилпентена (TPX) — материала с низкой дисперсией в широком диапазоне длин волн, прозрачного как в видимом, так и в терагерцевом диапазоне. Проведен расчет и экспериментально подобрана оптимальная толщина спейсера. Обнаружено увеличение собираемой мощности излучения квантово-каскадного лазера с использованием гиперполусферы в 14 раз.

Ключевые слова: оптика, терагерцевое излучение.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.98765.20542

Терагерцевые (THz) технологии интенсивно развиваются и находят множество практических приложений в области бесконтактного неразрушающего контроля различных сред и материалов [1], мониторинга окружающей среды и диагностики заболеваний [2–4], выявления угроз безопасности [5,6], широкополосной связи [7].

Развитие в области компактных лазерных источников THz-диапазона предъявило новые требования к оптическим системам, использующимся для сбора, коллимации и фокусировки THz-излучения. При субволновых размерах активной области такие лазеры имеют на выходе сильно расходящийся пучок [8–11]. Для sub-THz-излучения в диапазоне 0.3–1 THz могут использоваться микрополоски и их массивы, антенны на базе углеродных нанотрубок, метаповерхностей, а также рупорные антенны и дипольные микрорезонаторные антенны [12]. Для более высоких частот (> 1 THz) ввиду уменьшения длины волны предпочтительнее использовать оптические элементы, которые могут изготавливаться из высокоомного кремния (HR-FZSi), германия, сапфира, а также полиметилпентена (комерческая марка TPX), полипропилена, полиэтилена высокой плотности (HDPE) [13]. Показатель преломления кремния близок к показателю преломления GaAs — основы квантово-каскадного лазера (ККЛ), поэтому в ряде работ для сбора излучения из ККЛ в диапазоне 1–5 THz используются HR-FZSi-линзы [14], но точное позиционирование пары линза–ККЛ затруднено в силу непрозрачности кремния в видимом диапазоне. Однако использование кремниевых линзы и призмы позволяет значительно повысить эффективность вывода THz-излучения из ККЛ

при черенковской генерации [15]. Сапфир также используется для изготовления оптических элементов THz-диапазона. Однако, несмотря на высокую стабильность оптических и механических свойств, прозрачность в видимом диапазоне, сапфир имеет довольно низкое пропускание (при толщине 1 mm менее 0.3 на длине волны 100 μ m [13]) и сильную дисперсию (показатель преломления составляет ~ 1.77 и ~ 1.59 для длин волн 0.6 и 100 μ m соответственно). Полиметилпентен имеет ряд преимуществ по сравнению с HR-FZSi: он прозрачен в видимом диапазоне и обладает более высоким коэффициентом пропускания в диапазоне ~ 4 THz — для пластин толщиной 2 mm ~ 0.52 и ~ 0.8 для HR-FZSi и TPX соответственно [13]. Низкая дисперсия TPX (показатель преломления ~ 1.45 как для видимого, так и для THz-диапазона) дает возможность настройки оптической системы по видимому лазерному источнику.

Цель настоящей работы — экспериментально продемонстрировать возможность формирования пучка THz-излучения из ККЛ и его эффективный сбор при использовании оптических элементов из пластика TPX. Для эксперимента использовался ККЛ (внутренний номер 4111) с двойным металлическим волноводом Ti/Au длиной 875 μ m, шириной 50 μ m, толщиной 10 μ m с частотой основной линии излучения 4.08 THz (рис. 1). Измеренная при помощи калиброванного пироэлектрического приемника THZ5I-BL-BNC (Gentec Electro-Optics, Inc.) мощность излучения ККЛ составляла $\sim 2 \mu$ W.

Структура с двойным металлическим волноводом является эффективным теплоотводом для лазерного чи-

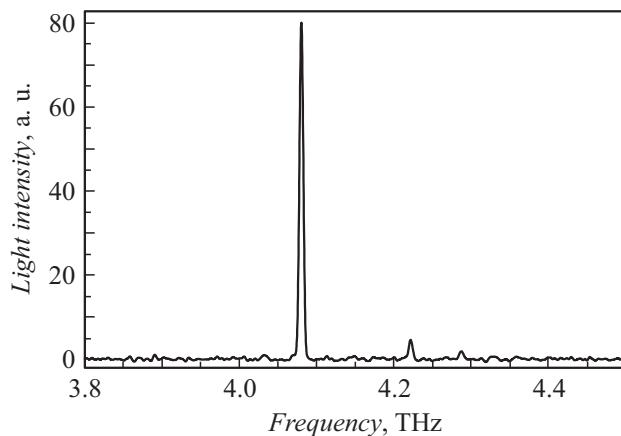


Рис. 1. Спектр излучения ККЛ при $T = 12$ К, $I = 1.2$ А.

па [16] и имеет низкие пороговые токи [14]. Теплоотвод с ККЛ был размещен на столике гелиевого криостата замкнутого цикла. Линзы изготавливались горячим прессованием в алюминиевую матрицу заготовки из пластика TPX при температуре 220 °С. Коллимация излучения ККЛ осуществлялась при помощи гиперполусферы диаметром 6 mm, состоящей из полусферической линзы, приклеенной к пластине-спейсеру, прижатой к торцу активной области ККЛ так, чтобы последний оказался в фокусе гиперполусферы. Являясь конструкционным элементом, служащим для позиционирования и закрепления линзы на определенном расстоянии от торца ККЛ, спейсер позволяет варьировать оптические характеристики гиперполусферической линзы. Толщина спейсера с показателем преломления 1.46 при фокусном расстоянии для полусферической линзы в вакууме

4.5 mm от плоской поверхности составит ~ 3 mm. Другой торец структуры представлял собой скол без каких-либо покрытий. Юстировка линзы относительно торца ККЛ осуществлялась при визуальном наблюдении торца ККЛ сквозь линзу, которая далее приклеивалась к спейсеру. Теплоотвод с ККЛ крепился на столик гелиевого криостата замкнутого цикла с минимальной температурой 12 К. Для наилучшего сбора излучения спейсер и линза, изготовленные из TPX, были расположены максимально близко к ККЛ (рис. 2, a). Для сравнения были также измерены интенсивности излучения без использования линзы, при этом излучение из ККЛ заводилось в промежуточный цилиндрический волновод из полированной нержавеющей стали диаметром 8 mm с окном из HDPE, максимально приближенным к ККЛ внутри криостата. Общий вид установки и схема измерений представлены на рис. 2, b. Для возбуждения ККЛ использовался источник тока на базе MOSFET-ключа с частотой 1 kHz с длительностью импульса от 500 ns до 2 μ s. Излучение ККЛ заводилось в волновод, выполненный из полированной нержавеющей стали диаметром 18 mm с Ge:Ga-приемником, помещенным в жидкий гелий. Длина волновода составляла 1.5 m, при этом его часть (~ 50 cm) находилась в атмосфере. Сигнал с детектора усиливался токовым усилителем и регистрировался цифровым осциллографом.

Были проведены расчеты интенсивности излучения ККЛ в зависимости от толщины спейсера при диаметре полусферической линзы 6 mm. Расчеты проводились в приближении геометрической оптики. Полагалось, что ближний к линзе торец лазера находится на границе материалов ККЛ/TPX на оси линзы и излучает сферическую волну. Построена зависимость интенсивности собранного излучения ККЛ от толщины спейсера для

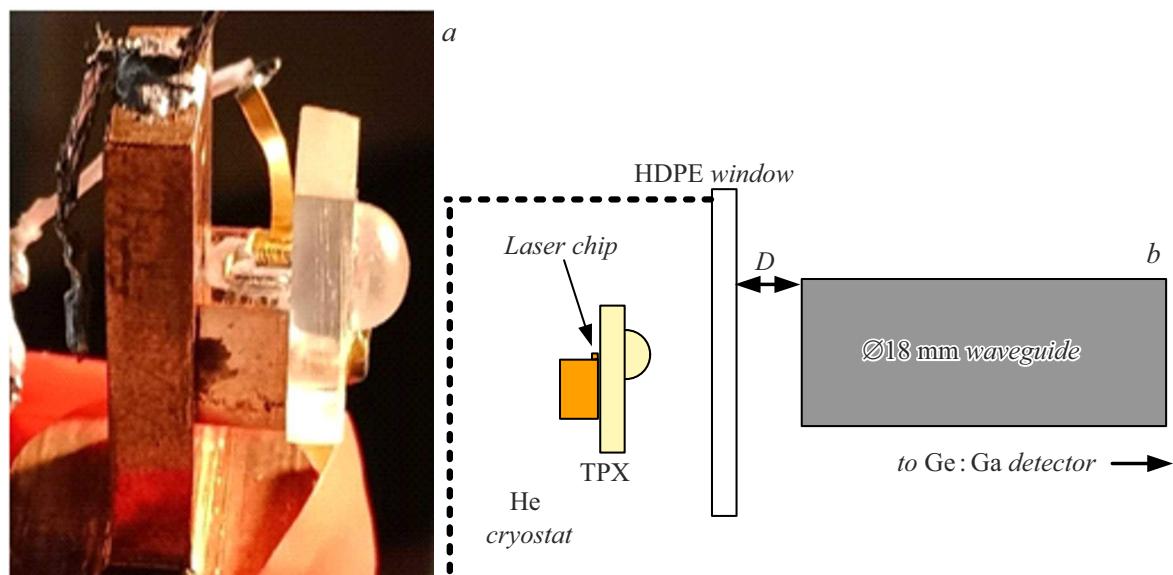


Рис. 2. a — размещенный на медном теплоотводе в криостате замкнутого цикла ККЛ со спейсером и линзой; b — схема установки для сбора излучения от ККЛ с использованием линзы и спейсера TPX. Расстояние D составляет 50 mm.

расстояний от спейсера до волновода $D = 3.5$ и 4 cm (рис. 3).

Экспериментальные результаты при использовании линзы со спейсерами толщиной 2.5 , 3 и 3.4 mm обозначены на рис. 3 квадратами, измеренные интенсивности собранного излучения соотносились как 0.22 , 1 , 0.48 соответственно. Максимум сигнала на рис. 3 при увеличении толщины спейсера соответствует оптимальной коллимации пучка. Различное положение максимумов измеренной и расчетной интенсивности излучения обусловлено малым количеством экспериментальных точек, а также особенностями геометрии эксперимента, трудно учитываемыми при расчетах. Были также измерены распределения интенсивности излучения ККЛ с линзой и спейсером и без них при сканировании диафрагмой диаметром 5 mm по двум координатам в плоскости входной апертуры приемного волновода. Расстояние от торца ККЛ до торца волновода составляло 50 mm . При использовании полусферической линзы диаметром 6 mm в сочетании со спейсером толщиной 3 mm сигнал увеличивался в 14 раз по сравнению с сигналом без линзы и спейсера. Результаты измерений приведены на рис. 4. Несколько максимумов интенсивности излучения соответствует различным лазерным модам, обусловленным геометрией структуры. При определенной настройке оптической системы из совокупности излучаемых мод может быть выбрана одна для формирования параллельного пучка, что невозможно сделать для многих мод, излучаемых под различными углами из ККЛ.

Таким образом, применение оптической собирающей системы, состоящей из пластины спейсера и полусферической линзы, изготовленных из пластика TPX, увеличивает интенсивность падающего на входную апертуру приемника излучения ККЛ, генерирующего на частоте 4.08 THz , в 14 раз. Малая дисперсия материала TPX и прозрачность в видимом диапазоне длин волн позволяют

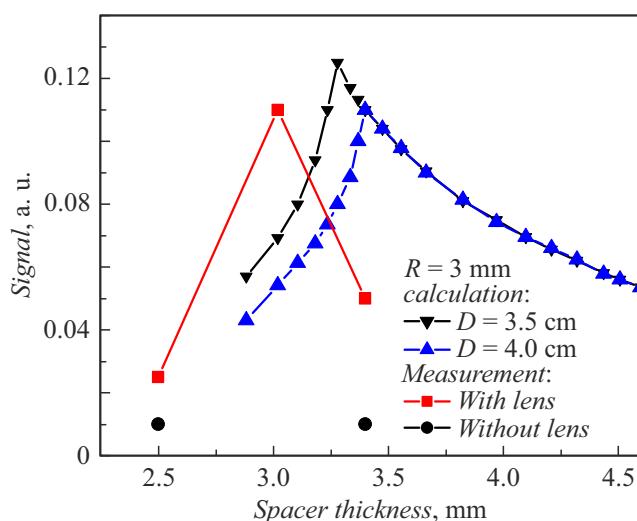


Рис. 3. Зависимость интенсивности собранного излучения ККЛ от толщины спейсера для расстояний от спейсера до волновода $D = 3.5$ и 4 cm .

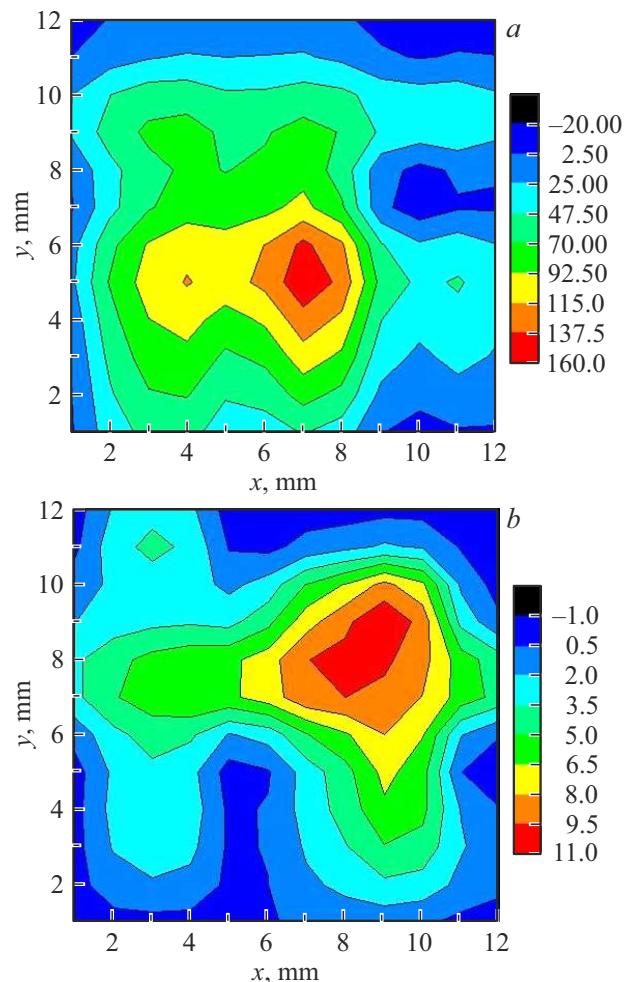


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения ККЛ с линзой и спейсером толщиной 3 mm (a) и без них (b) перед апертурой волновода приемника.

использовать источники видимого диапазона для точной юстировки пары терагерцевый ККЛ—линза, генерирующих в диапазоне от 2.4 до 6.4 THz .

Финансирование работы

Работа поддержана грантом Российского научного фонда 21-72-30020П. Характеризационные измерения спектра излучения ККЛ выполнены в рамках государственного задания ИФМ РАН (124050300055-9/FFUF-2024-0045). Построительные операции изготовления терагерцевого ККЛ проведены при финансовой поддержке в рамках государственного задания НИЦ „Курчатовский институт“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Yahyapour, A. Jahn, K. Dutzi, T. Puppe, P. Leisching, B. Schmauss, N. Vieweg, A. Deninger, *Appl. Sci.*, **9**, 1283 (2019). DOI: 10.3390/app907128
- [2] D. Stanze, A. Deninger, A. Roggenbuck, S. Schindler, M. Schlak, B. Sartorius, *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves*, **32**, 225 (2011). DOI: 10.1007/s10762-010-9751-8
- [3] T. Amini, F. Jahangiri, Z. Ameri, M.A. Hemmatian, *J. Lasers Med. Sci.*, **12**, e92 (2021). DOI: 10.34172/jlms.2021.92
- [4] M. Koch, in *Sensing with terahertz radiation*, ed. by D. Mittleman. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Berlin–Heidelberg, 2003), vol. 85, p. 295–316.
DOI: 10.1007/978-3-540-45601-8_7
- [5] M.C. Kemp, P.F. Taday, B.E. Cole, J.A. Cluff, A.J. Fitzgerald, W.R. Tribe, *Proc. SPIE*, **5070** (2003).
DOI: 10.1117/12.500491
- [6] I. Hosako, N. Sekine, M. Patrashin, S. Saito, K. Fukunaga, Y. Kasai, P. Baron, T. Seta, J. Mendrok, S. Ochiai, H. Yasuda, *Proc. IEEE*, **95** (8), 1611 (2007).
DOI: 10.1109/JPROC.2007.898844
- [7] J. Federici, L. Moeller, *J. Appl. Phys.*, **107** (11), 111101 (2010). DOI: 10.1063/1.3386413
- [8] S. Kohen, B.S. Williams, Q. Hu, *J. Appl. Phys.*, **97** (5), 053106 (2005). DOI: 10.1063/1.1855394
- [9] A.J.L. Adam, I. Kašalynas, J.N. Hovenier, T.O. Klaassen, J.R. Gao, E.E. Orlova, B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno, *Appl. Phys. Lett.*, **88** (15), 151105 (2006).
DOI: 10.1063/1.2194889
- [10] E.E. Orlova, J.N. Hovenier, P.J. de Visser, J.R. Gao, *Phys. Rev. A*, **91**, 051802(R) (2015).
DOI: 10.1103/PhysRevA.91.051802
- [11] E.E. Orlova, J.N. Hovenier, T.O. Klassen, I. Kašalynas, A.J.L. Adam, J.R. Gao, T.M. Klapwijk, B.S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, J.L. Reno, *Phys. Rev. Lett.*, **96** (17), 173904 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.173904
- [12] L. Masini, A. Pitanti, L. Baldacci, M.S. Vitiello, R. Degl’Innocenti, H.E. Beere, D.A. Ritchie, A. Tredicucci, *Light Sci. Appl.*, **6**, e17054 (2017). DOI: 10.1038/lsa.2017.54
- [13] В.Е. Рогалин, И.А. Каплунов, Г.И. Кропотов, *Оптика и спектроскопия*, **125** (6), 851 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.12.46951.190-18 [V.E. Rogalin, I.A. Kaplunov, G.I. Kropotov, *Opt. Spectrosc.*, **125** (6), 1053 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18120172].
- [14] S. Fathololoumi, E. Dupont, C.W.I. Chan, Z.R. Wasilewski, S.R. Laframboise, D. Ban, A. Mátyás, C. Jirauschek, Q. Hu, H.C. Liu, *Opt. Express*, **20** (4), 3866 (2012).
DOI: 10.1364/OE.20.003866
- [15] G.Kh. Kitaeva, D.A. Markov, D.A. Safronenkov, N.V. Starkova, *Photonics*, **10** (4), 450 (2023).
DOI: 10.3390/photonics10040450
- [16] M.S. Vitiello, A. Tredicucci, *Adv. Phys. X*, **6** (1), 1893809 (2021). DOI: 10.1080/23746149.2021.1893809