

Оптический журнал

Лазерная физика и техника
Laser physics and technique

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-01-33-38

УДК 535-15; 537.862

Минимальное число каскадов в терагерцовом квантово-каскадном лазере на основе GaAs/AlGaAs с волноводом металл-металл

АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ ДУБИНОВ

Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

sanya@ipmras.ru <https://orcid.org/0000-0002-0900-8928>

Аннотация

Предмет исследования. Коэффициент поглощения волновода металл-металл терагерцово-каскадного лазера на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs. **Цель работы.** Теоретическое исследование возможности существенного уменьшения числа каскадов (толщины активной области) в терагерцовых квантово-каскадных лазерах на основе двух ранее реализованных конструкций каскадов с гетероструктурами GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами, обладающими значительными коэффициентами усиления, с волноводом металл-металл. **Метод.** Коэффициент поглощения волновода металл-металл вычислялся численно методом матриц переноса из уравнений Максвелла. **Основные результаты.** Определена зависимость коэффициента поглощения волновода металл-металл терагерцового квантово-каскадного лазера от числа его каскадов. Показано, что в случае лазера с коэффициентом усиления 200 см^{-1} при температуре 100 К для генерации достаточно всего 5 каскадов при общей толщине волновода 428 нм. **Практическая значимость.** Расчеты показывают, что существует возможность значительно уменьшения толщины активной области и числа каскадов в терагерцовом квантово-каскадном лазере, что должно способствовать упрощению его создания и более широкому использованию.

Ключевые слова: коэффициент поглощения, волновод, квантово-каскадный лазер, терагерц

Благодарность: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-19-00436.

Ссылка для цитирования: Дубинов А.А. Минимальное число каскадов в терагерцовом квантово-каскадном лазере на основе GaAs/AlGaAs с волноводом металл-металл // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 1. С. 33–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-33-38>

Коды OCIS: 140.3070, 140.5965, 140.3410

The minimum number of stages in a terahertz GaAs/AlGaAs quantum-cascade laser with a waveguide of metal-to-metal

ALEXANDER A. DUBINOV

Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
sanya@ipmras.ru <https://orcid.org/0000-0002-0900-8928>

Abstract

Subject of study. Absorption coefficient of a metal-to-metal waveguide of a terahertz quantum cascade laser based on heterostructures GaAs/AlGaAs. **Aim of study.** Theoretical study of the possibility of significantly reducing the number of cascades (thickness of the active region) in terahertz quantum cascade lasers based on two previously implemented cascade designs with GaAs/AlGaAs heterostructures with significant gains and a metal-to-metal waveguide. **Method.** The absorption coefficient of the metal-to-metal waveguide was calculated numerically by the method of transfer matrices from Maxwell's equations. **Main results.** The cascade number dependence of the absorption coefficient of a metal-metal waveguide of a terahertz quantum-cascade laser is determined. Only 5 stages are sufficient for generation with a total waveguide thickness of 428 nm for a laser with a gain of 200 cm^{-1} at a temperature of 100 K. **Practical significance.** Calculations show that it is possible to significantly reduce the active region thickness and the number of stages in a terahertz quantum-cascade laser, which should facilitate the simplification of its creation and wider use.

Keywords: absorption coefficient, quantum-cascade laser, active region thickness

Acknowledgment: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant № 23-19-00436.

For citation: Dubinov A.A. The minimum number of stages in a terahertz GaAs/AlGaAs quantum-cascade laser with a waveguide of metal-to-metal [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 1. P. 33–38. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-01-33-38>

OCIS codes: 140.3070, 140.5965, 140.3410

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовые квантово-каскадные лазеры (ТГц ККЛ) на основе структур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами (КЯ) являются наиболее распространенными среди полупроводниковых источников терагерцового излучения [1]. Такие источники необходимы в спектроскопии и анализе сложных соединений, мониторинге окружающей среды, для фундаментальных исследований и проч. [2–4]. За два десятка лет своего существования ТГц ККЛ достигли значительного прогресса как по рабочим температурам, так и по мощности [5, 6]. Однако обычно толщина активной области (АО) ТГц ККЛ составляет около 10 мкм и включает в себя порядка тысячи нанометровых полупроводниковых слоев точно контролируемой толщины и состава, что препятствует широкому применению ТГц ККЛ. Учитывая типичную скорость роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии порядка 1 мкм/ч [7], время роста структур ТГц ККЛ превышает 10 ч.

С другой стороны, использование волновода металл-металл в ТГц ККЛ на основе GaAs позволяет существенно уменьшить необходимую для генерации толщину АО. Например, ранее удалось уменьшить толщину АО не оптимизированного для этой цели лазера с частотой 3,5 ТГц на основе каскада из трех КЯ GaAs/Al_{0,15}Ga_{0,85}As с резонансно-фононной схемой депопуляции нижнего лазерного уровня до 1,75 мкм [8], что в 50 раз меньше длины волны излучения лазера в вакууме. Активная область состояла только из 37 каскадов толщиной 43,7 нм каждый. Кроме того, благодаря меньшему рассеянию тепла и меньшему термическому сопротивлению более тонкая АО ТГц ККЛ позволяет при непрерывном режиме генерации увеличить рабочую температуру лазера, как было показано в работе [9]. К сожалению, уменьшение толщины АО приводит к резкому увеличению потерь [10]. Чтобы их компенсировать, необходима АО с большим коэффициентом усиления, например,

на основе гетероструктур HgCdTe с КЯ [11]. Другим способом может служить использование вместо волновода металл-металл волновода на основе двумерного плазмона [12]. Однако оба предложения к настоящему времени не реализованы: в первом случае из-за сложности роста совершенных гетероструктур HgCdTe с КЯ, во втором — из-за сложности создания АО с огромной подвижностью электронов.

Альтернативный вариант — подобрать более оптимальную с точки зрения значения коэффициента усиления структуру каскада в АО на основе GaAs/AlGaAs. Тогда существует возможность более существенного уменьшения толщины АО и количества каскадов в лазере, что должно способствовать упрощению его создания и более широкому использованию.

Целью настоящей работы является проведение теоретического исследования возможности существенного уменьшения числа каскадов (толщины АО) в ТГц ККЛ на основе двух ранее реализованных конструкций каскадов с гетероструктурами GaAs/AlGaAs с КЯ [5, 13], обладающими значительными коэффициентами усиления, с волноводом металл-металл.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения минимально возможного количества каскадов в ККЛ необходимо вос-

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} \varepsilon_m(\omega), & z < 0, z \geq 2D + N(d_1 + d_2) \\ \varepsilon_s(0, n_k), & 0 \leq z < D, D + N(d_1 + d_2) \leq z < 2D + N(d_1 + d_2), \\ \varepsilon_A(p, n_A), & D \leq z < D + N(d_1 + d_2) \end{cases} \quad (3)$$

где D — толщина контактного слоя, N — число каскадов в ККЛ, n_k и n_A — концентрации свободных электронов в контактных слоях и в АО соответственно. Компонента электрического поля ТМ моды $E_z(z)$ определяется из равенства

$$E_z(z) = -\frac{ck_x}{\omega\varepsilon(z)} H_y(z). \quad (4)$$

На границе слоев выполняются условия непрерывности компонент $H_y(z)$ и $E_z(z)$.

пользоваться выражением для определения порога генерации [14]

$$g\Gamma = \alpha = \alpha_{in} + \alpha_m, \quad (1)$$

где g — коэффициент усиления, α — коэффициент суммарных потерь, состоящих из внутренних потерь в волноводе лазера α_{in} и потерь на зеркалах лазера длиной L с коэффициентом отражения R на зеркале — $\alpha_m = -\ln(R)/L$. Как известно, потери на зеркалах ТГц ККЛ с узким волноводом металл-металл малы [15]. Оценка α_m при $L = 1$ мм и $R \approx 0,9$ [15] дает значение потерь всего лишь около 1 см^{-1} . Поэтому основную роль в суммарных потерях будут определять внутренние потери волновода, которые можно определить из продольной компоненты волнового вектора моды — $\alpha_{in} = 2\text{Im}(k_x)$.

Для численного определения продольной компоненты волнового вектора моды k_x методом матриц переноса решалось уравнение для координатной зависимости напряженности магнитного поля $H_y(z)$, распространяющейся в направлении x в ККЛ моды ТМ₀ (ось z направлена поперек слоев структуры) [14]

$$\varepsilon(z) \frac{d}{dz} \left[\frac{1}{\varepsilon(z)} \frac{dH_y(z)}{dz} \right] + \left(\varepsilon(z) \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 \right) H_y(z) = 0, \quad (2)$$

где ω — частота, c — скорость света в вакууме, а диэлектрическая проницаемость изменяется по координате z следующим образом:

Для расчета зависимости диэлектрической проницаемости АО выбрана следующая аппроксимация (так как толщина одного каскада много меньше длины волны излучения в АО):

$$\varepsilon_A(p, n_A) = \frac{\varepsilon_s(p, 0)d_1 + \varepsilon_s(0, n_A)d_2}{d_1 + d_2}, \quad (5)$$

где d_1 — общая толщина барьера Al _{p} Ga_{1- p} As с долей p алюминия в твердом растворе в одном каскаде и d_2 — общая толщина КЯ GaAs в одном каскаде. Диэлектрические проница-

мости $\epsilon_s (p, n)$ -слоев $\text{Al}_p\text{Ga}_{1-p}\text{As}$ в ТГц диапазоне частот вычислялись по формуле и с параметрами, определенными в работе [16].

Терагерцовую диэлектрическую проницаемость металла можно выразить через формулу Друде

$$\epsilon_m(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (6)$$

где в случае традиционно используемого для ТГц ККЛ в качестве контакта золота из экспериментальной работы [17] определены константы при температуре $T = 100$ К: $\hbar\omega_p = 9,02$ эВ и $\hbar\gamma = 14,3$ мэВ.

Для расчета минимально необходимого количества каскадов в ТГц ККЛ, излучающем на частоте 3,9 ТГц, был выбран дизайн лазера с двумя КЯ в каскаде с резонансно-фононной схемой депопуляции. Наш выбор мотивирован высокими рабочими температурами ТГц ККЛ на основе GaAs/AlGaAs с 2-х ямным дизайном [5]. В этом лазере была следующая последовательность толщин слоев одного каскада: 3,26/7,99/1,9/16,46 (нм), с барьерами $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$ (3,26 и 1,9 нм) и КЯ GaAs. В центральной части КЯ (16,46 нм) был легированый δ -слой с концентрацией электронов $4,5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($n_A = 1,5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Полага-

лось, что сверхрешетка толщиной $N(d_1 + d_2)$ ограничена контактными слоями $n^+ \text{-GaAs}$ с $n_k = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 50 нм каждый. Расчет коэффициента усиления такой структуры, проведенный независимо двумя различными группами [18, 19], показал, что при $T = 100$ К $g \approx 110 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 1 приведены рассчитанные зависимости полных потерь и модового усиления $g\Gamma$ от числа каскадов N в рассматриваемом ККЛ. Из рисунка видно, что с уменьшением числа каскадов потери растут экспоненциально. Это связано с тем, что с уменьшением толщины волновода металл-металл все большая доля электромагнитного поля проникает в пассивные контактные слои и металлические обкладки. Но уже при $N \geq 23$ $g\Gamma \geq \alpha$ их разница увеличивается с числом N . Отсюда можно сделать вывод, что при рассматриваемых параметрах структуры ККЛ для начала генерации достаточно всего 23 каскадов, состоящих из двух КЯ, толщиной 29,61 нм каждый. В этом случае общая толщина волновода такого ККЛ в 98 раз меньше длины волны излучения лазера в вакууме. Пространственное распределение вычисленных $|H_y(z)|$, $|E_z(z)|$ и $\text{Re}(\epsilon(z)^{1/2})$ в волноводе рассматриваемого ККЛ с $N = 23$ представлено на рис. 2.

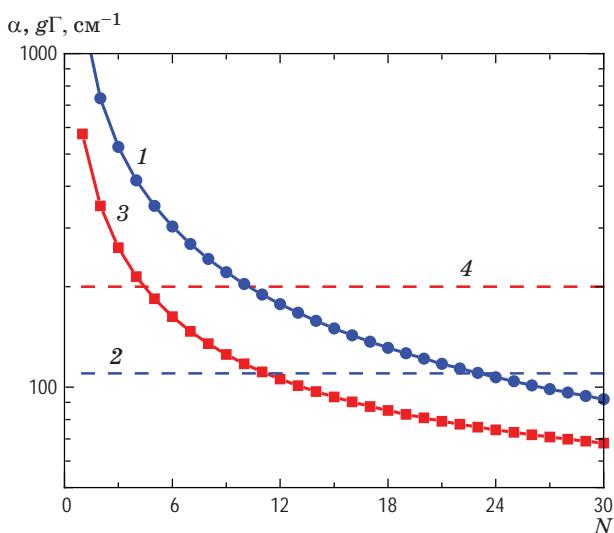


Рис. 1. Зависимости α (1 и 3) и $g\Gamma$ (2 и 4) от числа каскадов N в ККЛ разных дизайнов (1 и 2 [5], 3 и 4 [13])

Fig. 1. Dependences of (1 and 3) α and (2 and 4) $g\Gamma$ on the number of cascades N in quantum cascade lasers of different designs (1 and 2 [5], 3 and 4 [13])

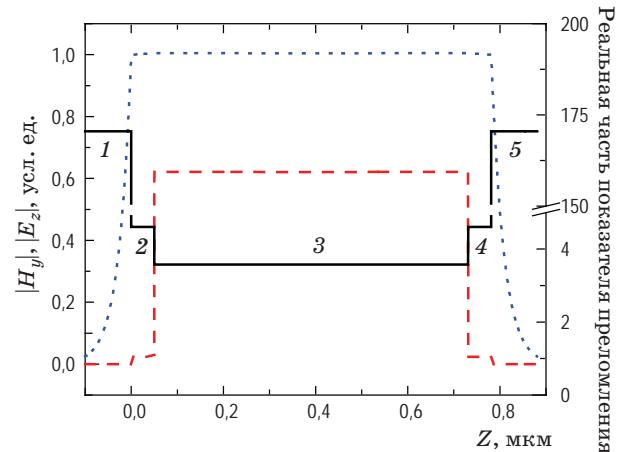


Рис. 2. Пространственное распределение $|H_y|$, $|E_z|$ и $\text{Re}(\epsilon(z)^{1/2})$ в волноводе ККЛ с дизайном каскада из работы [5] с $N = 23$. Слои: (1, 5) Au, (2, 4) n^+ -GaAs, (3) GaAs/AlGaAs

Fig. 2. Spatial distribution of $|H_y|$, $|E_z|$ and $\text{Re}(\epsilon(z)^{1/2})$ in a quantum cascade laser waveguide with a cascade design from [5] with $N = 23$. Layers: (1, 5) Au, (2, 4) n^+ -GaAs, (3) GaAs/AlGaAs

Однако и это еще не предел. Если рассмотреть гипотетический ТГц ККЛ с конструкцией каскада, основанной на оптическом переходе между связанным состоянием и дублетом состояний, туннельно связанным с верхним состоянием каскада извлечения фононов, и работающим на частоте около 3 ТГц, то коэффициент усиления в нем может теоретически достигать 200 см^{-1} при $T = 100 \text{ К}$ [13]. В этом лазере использовалась более длинная последовательность слоев одного каскада: 5,5/11,0/1,8/11,5/3,8/9,4/4,2/18,4 (нм) с барьерами $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ толщиной 5,5, 1,8, 3,8 и 4,2 нм и КЯ GaAs. Квантовая яма толщиной 18,4 нм была легирована с концентрацией электронов $n_A = 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В случае такой АО для генерации уже достаточно всего 5 каскадов, состоящих из четырех КЯ, и толщиной 65,6 нм каждый (см. рис. 1). Общая толщина волновода такого ККЛ всего 428 нм, что в 233 раза меньше длины волны излучения лазера в вакууме.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wen B., Ban D. High-temperature terahertz quantum cascade lasers // Progress in Quantum Electronics. 2021. V. 80. P. 100363. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2021.100363>
2. Leitenstorfer A., Moskalenko A. S., Kampfrath T., et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap // J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. V. 56. P. 223001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acbe4c>
3. Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Черняева М.Б. и др. Применение метода терагерцовой газовой спектроскопии высокого разрешения для анализа состава продуктов термического разложения биологических жидкостей (урин) человека // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 4. С. 80–90. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-04-80-90>
4. Liu J. and Yang S. Температурные корреляции терагерцовых спектров L-аспарagina и L-тироцина [in English] // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 3. С. 10–17. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-03-10-17>
5. Bosco L., Franckie M., Scalari G., et al. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 115. P. 010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>
6. Khalatpour A., Paulsen A. K., Deimert C., et al. High-power portable terahertz laser systems // Nature Photonics. 2021. V. 15. P. 16–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>
7. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R.R., et al. Arsenides-and related III-V materials-based multi-layered structures for terahertz applications: Various designs and growth technology // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2020. V. 66. № 2. P. 100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено теоретическое исследование возможности существенного уменьшения числа каскадов (толщины АО) в ТГц ККЛ посредством моделирования волноводных характеристик лазеров на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs с КЯ [5, 13], обладающих значительными коэффициентами усиления, с волноводом металл-металл при температуре 100 К. Показано, что для работы лазера на основе каскада из двух КЯ [5] достаточно всего 23 каскадов при общей толщине волновода 781 нм, а для лазера на основе каскада из четырех КЯ [13] достаточно 5 каскадов при общей толщине волновода 428 нм, что в 4 раза меньше рекордного значения, достигнутого ранее для ТГц ККЛ [8]. Столь малая толщина в ККЛ достигается за счет подбора конструкции каскада АО с большим коэффициентом усиления. Представленные результаты расчета значительно упростят изготовление ТГц ККЛ для различных применений.

REFERENCES

1. Wen B., Ban D. High-temperature terahertz quantum cascade lasers // Progress in Quantum Electronics. 2021. V. 80. P. 100363. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2021.100363>
2. Leitenstorfer A., Moskalenko A. S., Kampfrath T., et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap // J. Phys. D: Appl. Phys. 2023. V. 56. P. 223001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acbe4c>
3. Vaks V.L., Domracheva E.G., Chernyaeva M.B., et al. Application of a high-resolution terahertz gas spectroscopy method to compositional analysis of thermal decomposition products of human fluids (urine) // Journal of Optical Technology. 2022. V. 89. № 4. P. 243–249. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000243>
4. Liu J. and Yang S. Research on the terahertz temperature correlation of L-asparagine and L-tyrosine // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. № 3. P. 121–126. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000121>
5. Bosco L., Franckie M., Scalari G., et al. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 115. P. 010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>
6. Khalatpour A., Paulsen A.K., Deimert C., et al. High-power portable terahertz laser systems // Nature Photonics. 2021. V. 15. P. 16–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>
7. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R.R., et al. Arsenides-and related III-V materials-based multi-layered structures for terahertz applications: Various designs and growth technology // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2020. V. 66. № 2. P. 100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>

8. Strupiechonski E., Grassani D., Fowler D., et al. Vertical subwavelength mode confinement in terahertz and mid-infrared quantum cascade lasers // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. P. 101101. <https://doi.org/10.1063/1.3560980>
9. Curwen C.A., Addamane S.J., Reno J.L., et al. Thin THz QCL active regions for improved continuous-wave operating temperature // *AIP Advances*. 2021. V. 11. P. 125018. <https://doi.org/10.1063/5.0071953>
10. Chassagneux Y., Wang Q.J., Khanna S.P., et al. Limiting factors to the temperature performance of THz quantum cascade lasers based on the resonant-phonon depopulation scheme // *IEEE Trans. Terahertz Sci. and Technol.* 2012. V. 2. № 1. P. 83–92. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2177176>
11. Dubinov A.A., Ushakov D.V., Afonenko A.A., et al. Thin active region HgCdTe-based quantum cascade laser with quasi-relativistic dispersion law // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. № 19. P. 5048–5051. <https://doi.org/10.1364/OL.470688>
12. Дубинов А.А., Аleshkin В.Я. Модель терагерцового квантово-каскадного лазера на основе двумерного плазмона // *Физика и техника полупроводников*. 2021. Т. 55. № 10. С. 869–871. <https://doi.org/10.21883/FTP.2021.10.51435.34>
13. Amanti M.I., Scalari G., Terazzi R., et al. Bound-to-continuum terahertz quantum cascade laser with a single-quantum-well phonon extraction/injection stage // *New J. Phys.* 2009. V. 11. P. 125022. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/12/125022>
14. Casey H.C., Panich M.B. Heterostructure lasers. Part A. N.Y.: Academic Press, 1978. 286 p.
15. Kohen S., Williams B.S., Hu Q. Electromagnetic modeling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. P. 053106. <https://doi.org/10.1063/1.1855394>
16. Katsidis C.C., Hatzopoulos Z., Pelekanos N.T. Optical properties of $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ heterostructures in the far-infrared // Book of Abstracts of XXIV Panhellenic Conf. Solid State Physics and Materials Science. Heraklion, Crete, Greece. September 21–24, 2008. P. 205–206. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1279.9207>
17. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А. и др. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48. № 11. С. 1005–1008.
18. Wen B., Ban D. Theoretical study of quasi one-well terahertz quantum cascade laser // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 247. <https://doi.org/10.3390/photonics9040247>
19. Rindert V., Önder E., Wacker A. Analysis of high-performing terahertz quantum cascade lasers // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 18. P. L041001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.L041001>
8. Strupiechonski E., Grassani D., Fowler D., et al. Vertical subwavelength mode confinement in terahertz and mid-infrared quantum cascade lasers // *Appl. Phys. Lett.* 2011. V. 98. P. 101101. <https://doi.org/10.1063/1.3560980>
9. Curwen C.A., Addamane S.J., Reno J.L., et al. Thin THz QCL active regions for improved continuous-wave operating temperature // *AIP Advances*. 2021. V. 11. P. 125018. <https://doi.org/10.1063/5.0071953>
10. Chassagneux Y., Wang Q.J., Khanna S.P., et al. Limiting factors to the temperature performance of THz quantum cascade lasers based on the resonant-phonon depopulation scheme // *IEEE Trans. Terahertz Sci. and Technol.* 2012. V. 2. № 1. P. 83–92. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2177176>
11. Dubinov A. A., Ushakov D. V., Afonenko A.A., et al. Thin active region HgCdTe-based quantum cascade laser with quasi-relativistic dispersion law // *Opt. Lett.* 2022. V. 47. № 19. P. 5048–5051. <https://doi.org/10.1364/OL.470688>
12. Dubinov A.A., Aleshkin V.Ya. Model of a terahertz quantum-cascade laser based on two-dimensional plasmons // *Semiconductors*. 2021. V. 55. № 11. P. 828–830. <https://doi.org/10.1134/S1063782621100092>
13. Amanti M.I., Scalari G., Terazzi R., et al. Bound-to-continuum terahertz quantum cascade laser with a single-quantum-well phonon extraction/injection stage // *New J. Phys.* 2009. V. 11. P. 125022. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/12/125022>
14. Casey H.C., Panich M.B. Heterostructure lasers. Part A. N.Y.: Academic Press, 1978. 286 p.
15. Kohen S., Williams B.S., Hu Q. Electromagnetic modeling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97. P. 053106. <https://doi.org/10.1063/1.1855394>
16. Katsidis C.C., Hatzopoulos Z., Pelekanos N.T. Optical properties of $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ heterostructures in the far-infrared // Book of Abstracts of XXIV Panhellenic Conf. Solid State Physics and Materials Science. Heraklion, Crete, Greece. September 21–24, 2008. P. 205–206. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1279.9207>
17. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А. и др. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag // *Квантовая электроника*. 2018. Т. 48. № 11. С. 1005–1008.
18. Wen B., Ban D. Theoretical study of quasi one-well terahertz quantum cascade laser // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 247. <https://doi.org/10.3390/photonics9040247>
19. Rindert V., Önder E., Wacker A. Analysis of high-performing terahertz quantum cascade lasers // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 18. P. L041001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.L041001>

АВТОР

Александр Алексеевич Дубинов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород, 603950, Россия; Scopus ID: 7006063365; <https://orcid.org/0000-0002-0900-8928>; sanya@ipmras.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.2023
Одобрена после рецензирования 11.10.2023
Принята к печати 24.11.2023

AUTHOR

Alexander A. Dubinov — PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute for Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; Scopus ID: 7006063365; <https://orcid.org/0000-0002-0900-8928>; sanya@ipmras.ru

The article was submitted to the editorial office 20.06.2023
Approved after review 11.10.2023
Accepted for publication 24.11.2023