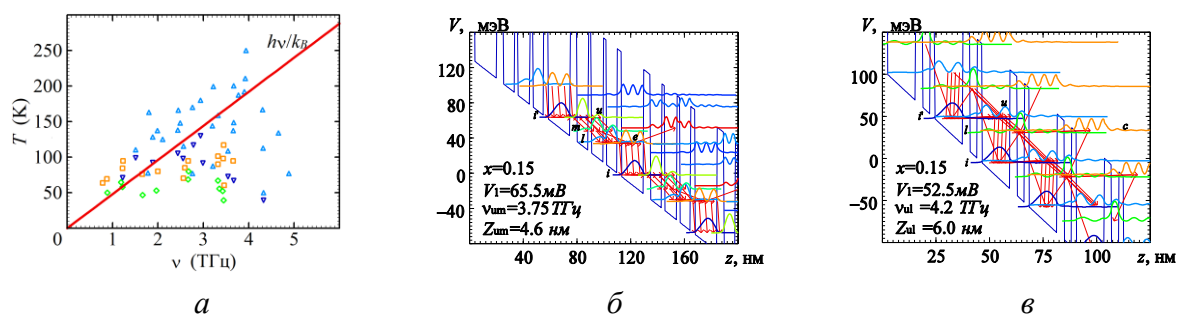


УДК 535.015, 535-15

Д. В. Ушаков¹, А. А. Афоненко¹, В.И. Гавриленко², Р.А. Хабибуллин³**Прогресс GaAs/AlGaAs квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона**¹ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, ushakovdv@bsu.by*² *Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, 607680 Нижний Новгород, Россия*³ *Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, 117105 Москва, Россия*

Терагерцовый (ТГц, $\nu \sim 0.1\text{--}10$ ТГц, $\lambda \sim 300\text{--}30$ мкм) диапазон частот остается недостаточно развитым в значительной степени из-за отсутствия лазерных источников излучения. На ТГц частотах многие молекулы и твердые тела имеют резонансные спектральные характеристики, что делает технологию ТГц диапазона важной как для науки, так и для коммерческих приложений, связанных со спектроскопией и визуализацией. Некоторые потенциально важные приложения включают дистанционное зондирование атмосферы Земли, астрономические исследования физики образования планет, звезд и галактик. Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) [1–6], возможно, являются единственными твердотельными источниками ТГц излучения, которые могут обеспечивать средние уровни оптической мощности. ККЛ ТГц диапазона стали свидетелями быстрого развития с момента их первой демонстрации в 2002 году с диапазоном частот от 1.2 до 5.4 ТГц [1–6]. Рабочие температуры ТГц ККЛ непрерывно улучшались от 50 К до 250 К за счет оптимизации как активной области и числа квантовых ям (КЯ), так и за счет уменьшения потерь в двойном оптическом волноводе. На рисунке 1*а* суммированы достигнутые рабочие температуры терагерцовых ККЛ с различными дизайнами. В 2012 г. [4] в структуре на основе GaAs/AlGaAs с 3-я КЯ в одном каскаде достигнута рабочая температура ~ 200 К в импульсном режиме. В 2019 г. [5] за счет усовершенствования методов моделирования ТГц ККЛ разработан ТГц ККЛ на 2-х КЯ, работающих при термоэлектрическом охлаждении при 210.5 [5]. Уже через год [6] за счет улучшения технологии роста, увеличения молевого состава барьерных слоев и оптимизации утечек из КЯ продемонстрирована рекордная генерация в области 250 К на частоте 3.94 ТГц.



(*а*) Прогресс достигнутых рабочих температур ККЛ ТГц диапазона для структур с фоновым резонансом в импульсном (треугольники) и непрерывном (перевернутые треугольники) режимах, а также (*б*, *в*) диаграммы зоны проводимости и квадраты модулей волновых функций электронов для оптимизированных ТГц ККЛ

В работе на основе решения уравнения Шредингера с учетом дефазировки квантовых состояний, а также системы замкнутых балансных уравнений [7–9], проведено исследование зонных дизайнов ТГц ККЛ с активной областью на основе GaAs/Al_xGa_{1-x}As. Предложены два новых дизайна лазерных переходов для увеличения выходной мощности и рабочей температуры ТГц ККЛ. Для увеличения выходной мощности предложен дизайн с двухфотонной схемой лазерных переходов и рабочей частотой около 3.8 ТГц (Рис. 1 б), что обуславливает приблизительно в 2 раза более медленное падение нелинейного коэффициента усиления с ростом плотности фотонов. Для увеличения рабочих температур предлагается использовать слабо локализованные электронные состояния с волновыми функциями, простирающимися на два и более периода структуры (Рис. 1 в). Показано, что в таких структурах сильно увеличивается матричный элемент дипольных переходов, а нижний лазерный уровень имеет больший энергетический зазор с инжектором, менее заселен и более температурно стабилен по сравнению с традиционными дизайнами. При этом расчетное значение максимальной рабочей температуры составляет около 250 К на частоте 4.2 ТГц.

- [1] Kohler, R. Terahertz semiconductor-heterostructure laser/ R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram et al. // Nature. – 2002. – Vol. 417. – P. 156–159.
- [2] Williams, B. S. Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode / B. S. Williams, S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno // Opt. Express. – 2005. – V. 13, No. 9. – P. 3331–3339.
- [3] Kumar, S. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design/ S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 94. – P. 131105(1–3).
- [4] Fathololoumi, S. Terahertz quantum cascade lasers operating up to 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling / S. Fathololoumi, E. Dupont, C. W. I. Chan et al. // Optics Express. – 2012. – Vol. 20. – P. 3866–3876.
- [5] Bosco, M. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K / L. Bosco, M. Franckie, G. Scalari et al. // Appl. Phys. Lett. – 2019. – Vol. 115, No. 1. – P. 010601(1–5).
- [6] Khalatpour, A. High-power portable terahertz laser systems/ A. Khalatpour, A.K. Paulsen, C. Deimert et al. // Nature Photon. – 2021. – Vol. 15. – P. 16–20.
- [7] Ушаков, Д.В. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций со сниженными дипольными моментами туннельно-связанных состояний / Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов и др. // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, № 10. – С. 913–918.
- [8] Ushakov, D. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method / D. Ushakov, A. Afonenko, R. Khabibullin, D. Ponomarev, V. Aleshkin, S. Morozov, and A. Dubinov // Opt. Express. – 2020. – V. 28, No. 17. – P. 25371–25382.
- [9] Ушаков, Д.В. Новые дизайны лазерных переходов в ТГц квантово-каскадных лазерах/ Д.В. Ушаков, А.А. Афоненко, Д.С. Пономарев и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2022. – Т. 65, № 5–6. – С. 505–515.