

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 535.015
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Высокотемпературные квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона: оптимизация дизайнов и экспериментальные результаты

Д.В. Ушаков¹,
А.А. Афоненко¹,
И.А. Глинский²,
Р.А. Хабибуллин^{2, 3, @}

¹ Белорусский государственный университет, Минск, 220030 Республика Беларусь

² Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова
Российской академии наук, Москва, 117105 Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург,
194021 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: khabibullin@isvch.ru

Резюме

Цели. Квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона (ТГц ККЛ) являются компактными твердотельными приборами с инжекционной накачкой, которые позволяют генерировать излучение в диапазоне от 1.2 до 5.4 ТГц. В полосе рабочих частот ТГц ККЛ находятся линии поглощения для ряда веществ, актуальных для медико-биологических и экологических приложений. Для широкого применения ТГц ККЛ в данных приложениях необходимо увеличивать рабочую температуру лазеров, что позволит уменьшить размеры и стоимость ТГц ККЛ, а также упростит использование данных ТГц-источников.

Методы. В работе для расчета электронного транспорта в ТГц ККЛ использовалась система балансных уравнений на основе базиса волновых функций с уменьшенными дипольными моментами туннельно-связанных состояний.

Результаты. В результате расчетов предложен оригинальный зонный дизайн с периодом на основе трех GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As квантовых ям (КЯ) и максимумом усиления около 3.3 ТГц. На основе разработанного дизайна был экспериментально изготовлен ТГц ККЛ, что включало рост лазерной структуры методом молекулярно-лучевой эпитаксии, постростовой процессинг для формирования полосковых лазеров с двойным металлическим волноводом и сборку лазеров на теплоотводе. Изготовленные ТГц ККЛ продемонстрировали генерацию вплоть до температуры 125 К, что согласуется с проведенными расчетами. Также в работе проведено исследование зонных дизайнов на основе двух GaAs/Al_xGa_{1-x}As КЯ с различным содержанием алюминия в барьерных слоях ($x = 0.20, 0.25$ и 0.30).

Выводы. Рассчитанные температурные зависимости пикового усиления для двух-КЯ дизайнов с $x > 0.2$ подтверждают возможность создания ТГц ККЛ, работающих при температурах свыше 200 К. Таким образом, в работе предложены двух-КЯ зонные дизайны, которые превосходят по максимальной рабочей температуре существующие рекордные высокотемпературные дизайны ТГц ККЛ.

Ключевые слова: квантово-каскадный лазер, терагерцовый диапазон, квантовая яма, молекулярно-лучевая эпитаксия

• Поступила: 17.11.2021 • Доработана: 28.02.2022 • Принята к опубликованию: 15.04.2022

Для цитирования: Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Глинский И.А., Хабибуллин Р.А. Высокотемпературные квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона: оптимизация дизайнов и экспериментальные результаты. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):45–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

High-temperature terahertz quantum-cascade lasers: design optimization and experimental results

Dmitrii V. Ushakov ¹,
Alexander A. Afonenko ¹,
Igor A. Glinskiy ²,
Rustam A. Khabibullin ^{2, 3, @}

¹ Belarusian State University, Minsk, 220030 Belarus

² Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117105 Russia

³ Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021 Russia

@ Corresponding author, e-mail: khabibullin@isvch.ru

Abstract

Objectives. Terahertz quantum-cascade lasers (THz QCLs) are compact solid-state lasers pumped by electrical injection to generate radiation in the range from 1.2 to 5.4 THz. The THz QCL operating frequency band contains absorption lines for a number of substances that are suitable for biomedical and environmental applications. In order to reduce the size and cost of THz QCLs and simplify the use of THz sources in these applications, it is necessary to increase the operating temperature of lasers.

Methods. To calculate electron transport in THz QCLs, we used a system of balance equations based on wave functions with reduced dipole moments of tunnel-bound states.

Results. As a result of the calculations, an original band design with a period based on three GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As quantum wells (QWs) and a gain maximum at about 3.3 THz was proposed. Based on the developed design, a THz QCL was fabricated, including the growth of a laser structure by molecular beam epitaxy, postgrowth processing to form strip lasers with a double metal waveguide, as well as an assembly of lasers mounted on a heat sink. The developed THz QCLs was capable of lasing at temperatures of up to 125 K as predicted by the performed calculations. We also studied band designs based on two GaAs/Al_xGa_{1-x}As QWs having varying aluminum contents in the barrier layers ($x = 0.20, 0.25, \text{ and } 0.30$).

Conclusions. The calculated temperature dependences of the peak gain for two-QW designs with $x > 0.2$ confirm the possibility of creating THz QCLs operating at temperatures above 200 K. Thus, we have proposed two-QW band designs that outperform existing high-temperature designs in terms of maximum operating temperature.

Keywords: quantum cascade laser, terahertz range, quantum well, molecular beam epitaxy

• Submitted: 17.11.2021 • Revised: 28.02.2022 • Accepted: 15.04.2022

For citation: Ushakov D.V., Afonenko A.A., Glinsky I.A., Khabibullin R.A. High-temperature terahertz quantum-cascade lasers: design optimization and experimental results. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):45–55. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-45-55>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовый диапазон частот (1–10 ТГц) по-прежнему остается одной из самых интригующих областей электромагнитного спектра, как с точки зрения фундаментальной науки, так и для большого числа прикладных задач. Долгое время сдерживающим фактором использования всех преимуществ ТГц-волн в спектроскопии, визуализации и удаленном зондировании оставалось отсутствие компактных твердотельных источников ТГц-излучения с мВт-уровнем средней мощности. Возможность «переноса» схемы работы квантово-каскадных лазеров (ККЛ) среднего инфракрасного (СИ) диапазона в ТГц-область позволило продемонстрировать уникальный источник ТГц-излучения, в котором за счет изменения толщин полупроводниковых слоев можно перестраивать частоту генерации от 1.2 до 5.4 ТГц без использования больших магнитных полей. Однако по сравнению с СИ ККЛ, где продемонстрированы рабочие температуры более 300 К, для работы ТГц ККЛ долгое время требовалось криогенное охлаждение. Задача повышения рабочих температур ТГц ККЛ до температур работы термоэлектрических охладителей на основе эффекта Пельтье является крайне актуальной для того, чтобы ТГц ККЛ смогли «выйти» из лабораторий и начать широко использоваться в медицине, биологии, сельском хозяйстве, экологии, борьбе с терроризмом и беспроводной связи [1–8].

Первые ТГц ККЛ требовали криогенного охлаждения, когда чип лазера необходимо было монтировать на холодную плату заливного криостата или криорефрижератора замкнутого цикла, что значительно ограничивало малогабаритность и энергоэффективность данных ТГц-источников, а также усложняло использование лазеров данного типа вне лабораторий. Оптимизация зонных дизайнов ТГц ККЛ и использование волноводов с низким уровнем потерь привели к росту рабочей температуры данных лазеров. Это позволило использовать для охлаждения ТГц ККЛ компактные электрические криоохладители, работающие по циклу Стирлинга, не требующие криогенных жидкостей и имеющие ресурс более 30 000 часов. Недостатком данного подхода является высокая стоимость криоохладителей Стирлинга (десятки тысяч долларов США), что также ограничивало широкое применение ТГц ККЛ.

Продолжение работ по исследованию электронного транспорта [9] и созданию более продуманных зонных дизайнов активной области ТГц ККЛ в 2019 г. позволило продемонстрировать первые лазеры с максимальной рабочей температурой 210.5 К (–63 °С) и термоэлектрическим охлаждением [10], что, безусловно, является революционным результатом с точки зрения возможности применения данных ТГц-источников. В конце 2020 г. были опубликованы данные о достижении нового рекорда – ТГц ККЛ с максимальной рабочей температурой 250 К (около –23 °С) [11]. Это позволило использовать для охлаждения ТГц ККЛ однокаскадный элемент Пельтье, цена которого не превышает 100 долл. США. При этом необходимо отметить, что в приведенных работах 2019 и 2020 гг. используются схожие зонные дизайны активной области с периодом на основе двух квантовых ям (КЯ), отличающиеся высотой потенциальных барьеров $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ – $x = 0.25$ ([10], 2019 г.) и $x = 0.30$ ([11], 2020 г.). Используемый зонный дизайн и подход к увеличению высоты потенциальных барьеров в первую очередь направлены на подавление паразитных каналов утечки электронов в континуум, поскольку данные паразитные каналы проводимости в активной области негативно сказываются на работе ТГц ККЛ при высоких температурах [12]. При этом увеличение высоты потенциальных барьеров приводит к необходимости уменьшать их толщину для сохранения туннельной прозрачности, что в свою очередь приводит к еще более высоким требованиям к эпитаксиальному росту таких гетероструктур с чрезвычайно тонкими барьерными слоями толщиной в единицы монослоев [13].

Несмотря на то, что работы по созданию ТГц ККЛ в России начались с 10–15-летней задержкой относительно работ зарубежных групп, на сегодняшний день уже продемонстрированы ТГц ККЛ, полностью изготовленные в России, включая рост гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) и постростовой процессинг полосковых лазеров с двойным металлическим волноводом [14, 15]. В данной работе представлены экспериментальные результаты по исследованию ТГц ККЛ на основе оригинального дизайна активной области с периодом, содержащим три КЯ $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$. Также приведены результаты оптимизации зонных дизайнов ТГц ККЛ с периодом на основе двух КЯ $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0.20, 0.25$ и 0.30 для работы при высоких температурах (более 200 К).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТГц ККЛ С ПЕРИОДОМ НА ОСНОВЕ ТРЕХ КЯ GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As

Резонансно-фононный дизайн, в котором происходит последовательное резонансное туннелирование электронов на верхний лазерный уровень, испускание ТГц-фотона и депопуляция нижнего лазерного уровня за счет рассеяния электронов на продольных оптических фононах (longitudinal-optical phonons, LO-фононах), продемонстрировал на сегодняшний день наиболее высокие рабочие температуры ТГц ККЛ. Использование диагональных излучательных переходов позволило существенно снизить скорость безызлучательной рекомбинации «горячих» электронов с верхнего лазерного уровня на нижний из-за температурной активации испускания LO-фононов. Основываясь на выше-сказанном, для оптимизации активной области высокотемпературного ТГц ККЛ был выбран резонансно-фононный дизайн с периодом из трех КЯ GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As и частотой генерации около 3.3 ТГц.

На основе ранее разработанного метода системы балансных уравнений [16, 17] была проведена численная оптимизация дизайна активной области ТГц ККЛ для достижения максимальной рабочей температуры. В ходе оптимизации происходило сканирование толщин всех слоев периода в широком диапазоне (толщин КЯ и барьеров) с шагом, равным половине постоянной кристаллической решетки GaAs. В процедуре отбора оптимальных дизайнов было условие обеспечения максимального усиления на положительной ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ), чтобы в системе не возникали электрические неустойчивости и не образовывались электро-полевые домены. Максимальная рабочая температура дизайна соответствовала точке пересечения температурных зависимостей усиления и потерь в резонаторе, которые были рассчитаны ранее для ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом [16].

В ходе проведенной оптимизации был разработан оригинальный GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As зонный дизайн на основе периода, состоящего из последовательности толщин слоев, начиная с барьера инжектора: 4.23/16.09/3.95/8.75/2.54/8.18 нм (КЯ GaAs выделены жирным шрифтом). Легирование активного модуля донорной примесью Si составляло $3.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При моделировании высота потенциальных барьеров Al_{0.18}Ga_{0.82}As в зоне проводимости полагалась равной $\Delta E_c = 164 \text{ мэВ}$.

Иллюстрация электронного транспорта в разработанном зонном дизайне представлена на рис. 1, где стрелками показано протекание тока через уровни размерного квантования в двух периодах. Количество стрелок между уровнями пропорционально плотности тока. Плотность тока через период соответствует

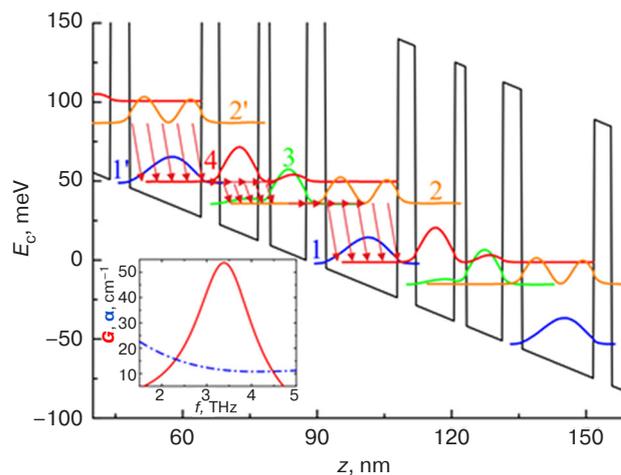


Рис. 1. Профиль энергии дна зоны проводимости E_c , уровни энергии (пронумерованы цифрами) и базисные волновые функции после процедуры локализации (модель сильной связи)

для двух последовательных активных модулей при напряжении $V_1 = 51 \text{ мВ}$ и температуре 77 К

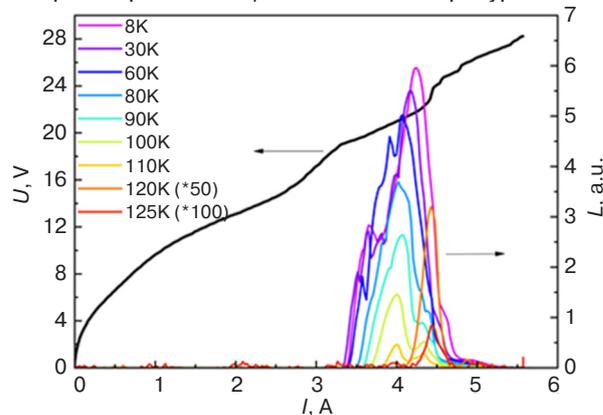


Рис. 2. ВАХ (черная линия) и зависимости

интенсивности интегрального излучения от тока для ККЛ #52111 в диапазоне температур от 8 К до 125 К . Амплитуда интегрального сигнала для температур 120 К и 125 К умножена на 50 и 100 соответственно

пяти стрелкам. При оптимизации были минимизированы паразитные каналы проводимости, которые имеют плотности тока менее одной стрелки (не отображены на рис. 1). Диагональный лазерный переход E_{43} с матричным элементом дипольных переходов $Z_{43} = 3.8 \text{ нм}$ соответствует частоте генерации $3.3\text{--}3.4 \text{ ТГц}$. На вставке рис. 1 приведен спектр усиления разработанного дизайна (красная линия) и спектр потерь в резонаторе (синяя штрихпунктирная линия).

Лазерная структура на основе разработанного зонного дизайна GaAs/Al_{0.18}Ga_{0.82}As была выращена методом МЛЭ на установке Riber Compact 21T в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (группа проф. И.С. Васильевского). При отработке оптимальных ростовых параметров особое внимание уделялось подбору технологических условий роста (температуры подложки, потока мышьяка As₄), точной калибровке скоростей роста соединений

GaAs и AlAs и их стабильности в течение роста структур большой толщины. Время роста одной лазерной структуры составляло более 10 ч без учета роста калибровочных сверхрешеток, которые выращивали до и после роста лазерной структуры. Отклонение толщины периода выращенной структуры от номинального (заданного в дизайне) не превышало 1%.

На основе выращенной лазерной структуры были изготовлены ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом (ДМВ). Процедура изготовления полосковых лазеров с Au–Au ДМВ подробно описана в работах [18, 19]. Выколотые полосковые ТГц ККЛ с резонатором Фабри – Перо были смонтированы в НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха (группа С.М. Сапожникова) на радиаторы C-mount; электрический контакт осуществлялся путем приваривания к верхнему металлу лазерного полоска большого числа золотых проволочек диаметром 30 мкм, распределенных равномерно по всей длине полоска для улучшения электрической инжекции по всей поверхности лазера [20].

Излучательные характеристики изготовленных лазеров измерялись в Институте физики микроструктур Российской академии наук (группа проф. В.И. Гавриленко). Исследования ВАХ и зависимостей интегральной интенсивности излучения от тока накачки и температуры изготовленных ТГц-лазеров проводились в импульсном режиме (длительность импульса 500 нс, частота повторения 100 Гц). Для питания структур использовался специально изготовленный электронный ключ, позволяющий получать импульсы заданной длительности, скважности и амплитуды, а также измерять напряжение и ток, проходящий через лазер. При измерениях ВАХ и интегральных зависимостей излучения от тока/температуры сигнал с детектора подавался на двухканальный строб-интегратор Stanford Research Systems SR250 (Саннивейл, Калифорния, США).

Для определения максимальной рабочей температуры были измерены зависимости интегральной интенсивности излучения от тока накачки. На рис. 2 видно, что увеличение температуры с 8 до 60 К слабо влияет на выходную мощность и на значение порогового тока. При приближении к 100 К интенсивность оптического сигнала начинает резко уменьшаться. При температурах выше 100 К начинает резко расти значение порогового тока, что, скорее всего, связано с активацией паразитных каналов проводимости. Максимальная температура, при которой наблюдалась лазерная генерация, составила около 125–130 К. Нужно отметить, что в качестве волноводной системы для вывода излучения ТГц ККЛ из криостата была использована металлическая трубка, которая обладает своим уровнем потерь в ТГц-диапазоне. Можно предположить, что реальная максимальная рабочая температура ТГц ККЛ выше на 5–10 К, т.е. составляет около 140 К.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗОННОГО ДИЗАЙНА ТГЦ ККЛ НА ОСНОВЕ ДВУХ КВАНТОВЫХ ЯМ GaAs/Al_xGa_{1-x}As С $x = 0.20, 0.25$ И 0.30

Для дальнейшего улучшения высокотемпературных характеристик ТГц ККЛ необходимо разработать новые концепции зонных дизайнов активных областей и снижать потери в резонаторе. Ранее нами были предложены подходы по снижению потерь в ТГц ККЛ, в том числе на основе использования двойного металлического волновода из серебра [21, 22]. Для увеличения максимальной рабочей температуры ТГц ККЛ мы предложили провести исследование зонных дизайнов на основе двух КЯ GaAs/Al_xGa_{1-x}As с разной высотой потенциальных барьеров: $x = 0.20, 0.25$ и 0.30 .

Для расчета характеристик ТГц ККЛ мы использовали метод системы балансных уравнений с базисом волновых функций в приближении сильной связи. Этот базис был получен как суперпозиция собственных состояний уравнения Шредингера для всей активной области ТГц ККЛ путем минимизации пространственного расширения волновых функций туннельно-связанных состояний. Локализованный базис волновых функций в приближении сильной связи более устойчив к влиянию эффекта дефазировки, т.к. вырожденные базисные состояния с $\Delta E \lesssim 3$ мэВ имеют небольшое перекрытие волновых функций и, соответственно, низкую скорость рассеяния. Мы проанализировали зонные дизайны ТГц ККЛ на основе двух КЯ GaAs/Al_xGa_{1-x}As и оптимизировали высоту потенциальных барьеров с различным содержанием алюминия (см. таблицу).

На рис. 3 демонстрируется принцип действия предложенных дизайнов и ток через уровни энергий (красные стрелки). Видно, что существует несколько каналов проводимости между электронными уровнями, включая переход 3–2 между верхним и нижним лазерными уровнями, а также паразитные переходы между уровнями 3 и 1. На рис. 4 приведено сравнение температурных зависимостей максимального усиления на частоте 3.9 ТГц, которые демонстрируют возможность работы при температурах выше 200 К для дизайнов с содержанием $x > 0.2$. Для сравнения

Таблица. Параметры оптимизированных зонных дизайнов активного модуля ТГц ККЛ на основе двух квантовых ям GaAs/Al_xGa_{1-x}As

Дизайн	x	Высота барьера ΔE_c , мэВ	Последовательность слоев в периоде: потенциальный барьер / квантовая яма, нм
Bosco [10]	0.25	212.5	1.98/16.37/3.39/7.91
A	0.20	178.5	2.3/16.4/4.2/7.3
B	0.25	212.5	2.0/17.2/3.4/7.9
C	0.30	244.5	1.7/17.0/3.1/7.9

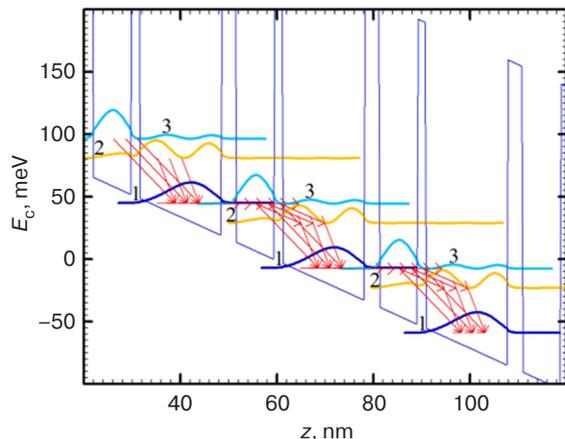


Рис. 3. Зонная диаграмма для дизайна С

приведена расчетная зависимость коэффициента усиления от температуры (синяя линия) для зонного дизайна на основе трех КЯ GaAs/Al_{0.25}Ga_{0.75}As, предложенной в работе [10], с экспериментальной максимальной рабочей температурой $T_{\text{max}} = 210.5$ К.

Оптимизация дизайнов с усилением, превышающим потери при высоких температурах (210–240 К), была получена путем сканирования толщины активного модуля в диапазоне от 24 до 36 нм. При этом толщина барьерных слоев Al_xGa_{1-x}As варьировалась в диапазоне 1.4–4.0 нм, а квантовых ям

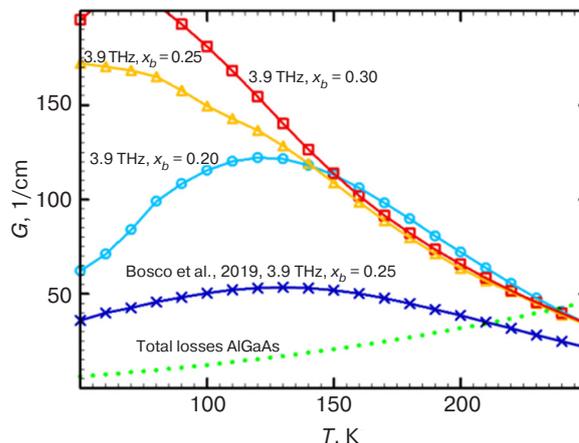
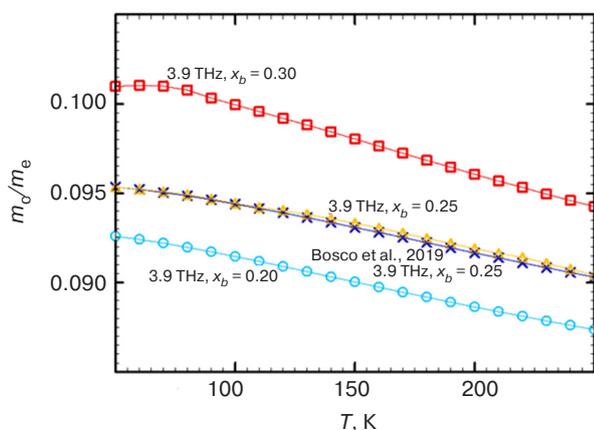
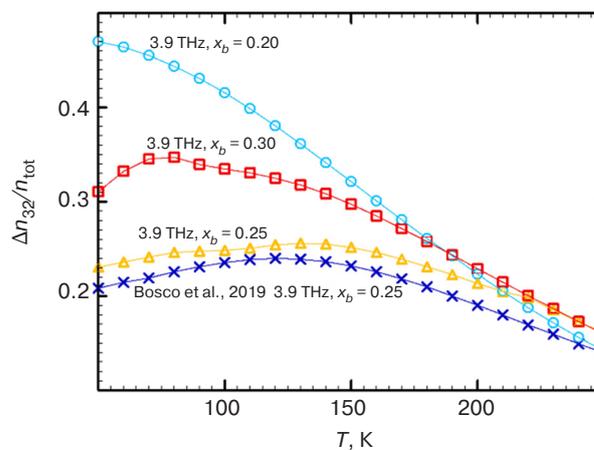


Рис. 4. Температурные зависимости максимальной усиления G для конструкции GaAs/Al_xGa_{1-x}As с различным содержанием Al в барьерах

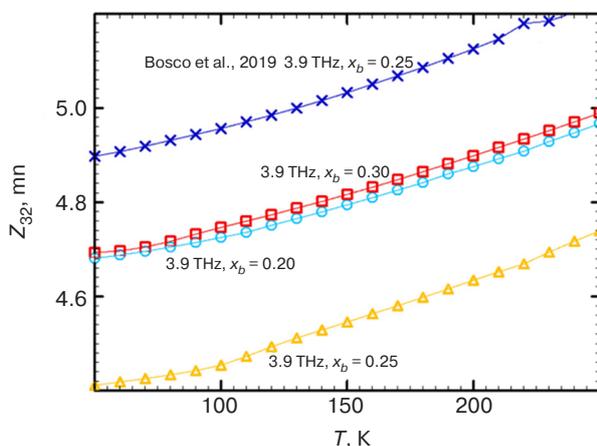
GaAs – в диапазоне 6.3–20.0 нм с шагом, равным половине постоянной решетки GaAs. Параметры оптимизированных конструкций активных модулей при различном составе барьерных слоев (содержания x) представлены в таблице. В последовательности слоев периода квантовые ямы GaAs выделены жирным шрифтом. Центральная часть широкой КЯ GaAs легирована кремнием с концентрацией слоев $4.5 \cdot 10^{10}$ см⁻², как в работе [3].



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Температурные зависимости эффективной массы электронов m_e (а), инверсии населенности $\Delta n_{32}, n_{\text{tot}}$ – полная концентрация электронов в периоде (б) и матричных элементов дипольных переходов Z_{32} (в) для оптимизированного дизайна А ($x_b = 0.20$), В ($x_b = 0.25$) и С ($x_b = 0.30$)

Основными факторами, влияющими на усиление в ККЛ, являются: эффективная масса электронов m_c , инверсия населенностей n_{32} лазерных уровней и матричные элементы дипольных переходов Z_{32} [23–25]. Таким образом, коэффициент усиления активного модуля ККЛ можно представить как произведение данных параметров $G \sim m_c^{-3/2} n_{32} Z_{32}^2$. Это означает, что для эффективного усиления в ККЛ требуется малая эффективная масса электрона, большая инверсия населенностей и дипольные матричные элементы переходов. Температурные зависимости этих значений для оптимизированных активных модулей, по сравнению с дизайном Bosco [3], показаны на рис. 5. Следует отметить, что эффективная масса электронов увеличивается в дизайнах с более высокими потенциальными барьерами (с более высоким содержанием алюминия в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) из-за эффекта непараболичности, как показано на рис. 5а. В то же время m_c уменьшается при повышенных температурах для всех исследуемых дизайнов. В оптимизированных дизайнах В и С (рис. 5б) инверсия населенности больше при температурах выше 200 К. Как видно из рис. 5в, матричные элементы дипольных переходов данных дизайнов увеличиваются с увеличением температуры от 50 до 250 К: с 4.9 до 5.2 (дизайн Bosco 2019), с 4.7 до 5.0 (дизайн А), с 4.4 до 4.7 (дизайн В) и от 4.7 до 5.0 нм (дизайн С). Таким образом, сочетание всех трех факторов для всех оптимизированных дизайнов А ($x_b = 0.20$), В ($x_b = 0.25$) и С ($x_b = 0.30$) позволяет ожидать максимальную рабочую температуру – 238 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен оригинальный зонный дизайн с периодом на основе трех $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ квантовых ям и экспериментально реализован ТГц ККЛ

на основе данного дизайна с максимальной рабочей температурой более 125 К. Были исследованы зонные дизайны на основе двух $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ квантовых ям с различным содержанием алюминия: $x = 0.20, 0.25$ и 0.30 . Рассчитанные температурные зависимости пикового усиления для двух-КЯ дизайнов с $x > 0.2$ подтверждают возможность создания ТГц ККЛ, работающего при температурах свыше 200 К.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РТУ МИРЭА «Инновации в реализации приоритетных направлений развития науки и технологий» (НИЧ 28/21) в рамках теоретических исследований и при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-30020 в рамках изготовления ТГц ККЛ.

Вклад авторов

Д.В. Ушаков – численная оптимизация зонных дизайнов ТГц ККЛ.

А.А. Афоненко – численная оптимизация зонных дизайнов ТГц ККЛ.

И.А. Глинский – расчет потерь в резонаторе ТГц ККЛ.

Р.А. Хабибуллин – изготовление и измерение излучательных характеристик ТГц ККЛ.

Authors' contributions

D.V. Ushakov – numerical optimization of THz QCL designs.

A.A. Afonenko – numerical optimization of THz QCL designs.

I.A. Glinskiy – calculation of losses in the THz QCL resonator.

R.A. Khabibullin – fabrication and measurement of the emission characteristics of THz QCLs.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sampaolo A., Yu C., Wei T., Zifarelli A., Giglio M., Patimisco P., Zhu H., Zhu H., He L., Wu H., Dong L., Xu G., Spagnolo V. H_2S quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor employing a liquid-nitrogen-cooled THz quantum cascade laser operating in pulsed mode. *Photoacoustics*. 2021;21:100219. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100219>
2. Consolino L., Nafa M., De Regis M., Cappelli F., Garrasi K., Mezzapesa F.P., Li L., Davies A.G., Linfield E.H., Vitiello M.S., Bartalini S., De Natale P. Quantum cascade laser based hybrid dual comb spectrometer. *Commun. Phys.* 2020;3(1):69. <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0344-0>
3. Irimajiri Y., Morohashi I., Kawakami A. Multifrequency heterodyne detection of molecules using a hot electron bolometer mixer pumped by two phase-locked THz-quantum cascade lasers. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(5):474–479. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2990358>

REFERENCES

1. Sampaolo A., Yu C., Wei T., Zifarelli A., Giglio M., Patimisco P., Zhu H., Zhu H., He L., Wu H., Dong L., Xu G., Spagnolo V. H_2S quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor employing a liquid-nitrogen-cooled THz quantum cascade laser operating in pulsed mode. *Photoacoustics*. 2021;21:100219. <https://doi.org/10.1016/j.pacs.2020.100219>
2. Consolino L., Nafa M., De Regis M., Cappelli F., Garrasi K., Mezzapesa F.P., Li L., Davies A.G., Linfield E.H., Vitiello M.S., Bartalini S., De Natale P. Quantum cascade laser based hybrid dual comb spectrometer. *Commun. Phys.* 2020;3(1):69. <https://doi.org/10.1038/s42005-020-0344-0>
3. Irimajiri Y., Morohashi I., Kawakami A. Multifrequency heterodyne detection of molecules using a hot electron bolometer mixer pumped by two phase-locked THz-quantum cascade lasers. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(5):474–479. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2020.2990358>

4. Jin Y., Reno J.L., Kumar S. Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode. *Optica*. 2020;7(6):708–715. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.390852>
5. Rakić A.D., Taimre T., Bertling K., Lim Y.L., Dean P., Valavanis A., Indjin D. Sensing and imaging using laser feedback interferometry with quantum cascade lasers. *Appl. Phys. Rev.* 2019;6(2):021320. <https://doi.org/10.1063/1.5094674>
6. Dunn A., Poyser C., Dean P., Demić A., Valavanis A., Indjin D., Salih M., Kundu I., Li L., Akimov A., Davies A.G., Linfield E., Cunningham J., Kent A. High-speed modulation of a terahertz quantum cascade laser by coherent acoustic phonon pulses. *Nat. Commun.* 2020;11:835. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14662-w>
7. Hagelschuer T., Richter H., Wienold M., Lü X., Röben B., Schrottke L., Biermann K., Grahn H., Hübers H. A compact 4.75-THz source based on a quantum-cascade laser with a back-facet mirror. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2019;9(6):606–612. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2935337>
8. Schrottke L., Ropcke J., Grahn H.T., Lu X., Röben B., Drude P., Biermann K., Hagelschuer T., Wienold M., Hübers H.-W., Hannemann M., Hubertus van Helden J.-P. High-performance GaAs/AlAs terahertz quantum-cascade lasers for spectroscopic applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(2):133–140. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2957456>
9. Franckić M., Bosco L., Beck M., Bonzon C., Mavrona E., Scalari G., Wacker A., Faist J. Two-well quantum cascade laser optimization by non-equilibrium Green's function modelling. *Appl. Phys. Lett.* 2018;112:021104. <https://doi.org/10.1063/1.5004640>
10. Bosco L., Franckić M., Scalari G., Beck M., Wacker A., Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K. *Appl. Phys. Lett.* 2019;115:010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>
11. Khalatpour A., Paulsen A.K., Deimert C., Wasilewski Z.R., Hu Q. High-power portable terahertz laser systems. *Nat. Photonics*. 2021;15:16–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>
12. Kainz M.A., Schönhuber S., Andrews A.M., Detz H., Limbacher B., Strasser G., Unterrainer K. Barrier height tuning of THz quantum cascade lasers for high temperature operation. *ACS Photonics*. 2018;5(11):4687–4693. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01280>
13. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: various designs and growth technology. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2020;66(2):100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>
14. Хабибуллин Р.А., Шаврук Н.В., Павлов А.Ю., Пономарев Д.С., Томош К.Н., Галиев Р.Р., Мальцев П.П., Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Зубов Ф.И., Алфёров Ж.И. Изготовление терагерцового квантово-каскадного лазера с двойным металлическим волноводом на основе многослойных гетероструктур GaAs/AlGaAs. *Физика и техника полупроводников*. 2016;50(10):1395–1400.
4. Jin Y., Reno J.L., Kumar S. Phase-locked terahertz plasmonic laser array with 2 W output power in a single spectral mode. *Optica*. 2020;7(6):708–715. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.390852>
5. Rakić A.D., Taimre T., Bertling K., Lim Y.L., Dean P., Valavanis A., Indjin D. Sensing and imaging using laser feedback interferometry with quantum cascade lasers. *Appl. Phys. Rev.* 2019;6(2):021320. <https://doi.org/10.1063/1.5094674>
6. Dunn A., Poyser C., Dean P., Demić A., Valavanis A., Indjin D., Salih M., Kundu I., Li L., Akimov A., Davies A.G., Linfield E., Cunningham J., Kent A. High-speed modulation of a terahertz quantum cascade laser by coherent acoustic phonon pulses. *Nat. Commun.* 2020;11:835. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14662-w>
7. Hagelschuer T., Richter H., Wienold M., Lü X., Röben B., Schrottke L., Biermann K., Grahn H., Hübers H. A compact 4.75-THz source based on a quantum-cascade laser with a back-facet mirror. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2019;9(6):606–612. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2935337>
8. Schrottke L., Ropcke J., Grahn H.T., Lu X., Röben B., Drude P., Biermann K., Hagelschuer T., Wienold M., Hübers H.-W., Hannemann M., Hubertus van Helden J.-P. High-performance GaAs/AlAs terahertz quantum-cascade lasers for spectroscopic applications. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2020;10(2):133–140. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2019.2957456>
9. Franckić M., Bosco L., Beck M., Bonzon C., Mavrona E., Scalari G., Wacker A., Faist J. Two-well quantum cascade laser optimization by non-equilibrium Green's function modelling. *Appl. Phys. Lett.* 2018;112:021104. <https://doi.org/10.1063/1.5004640>
10. Bosco L., Franckić M., Scalari G., Beck M., Wacker A., Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K. *Appl. Phys. Lett.* 2019;115:010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>
11. Khalatpour A., Paulsen A.K., Deimert C., Wasilewski Z.R., Hu Q. High-power portable terahertz laser systems. *Nat. Photonics*. 2021;15:16–20. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>
12. Kainz M.A., Schönhuber S., Andrews A.M., Detz H., Limbacher B., Strasser G., Unterrainer K. Barrier height tuning of THz quantum cascade lasers for high temperature operation. *ACS Photonics*. 2018;5(11):4687–4693. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b01280>
13. Yachmenev A.E., Pushkarev S.S., Reznik R., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S. Arsenides-and related III-V materials-based multilayered structures for terahertz applications: various designs and growth technology. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2020;66(2):100485. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2020.100485>
14. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Pavlov A.Yu., Ponomarev D.S., Tomosh K.N., Galiev R.R., Maltsev P.P., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Zubov F.I., Alferov Z.I. Fabrication of terahertz quantum cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures. *Semiconductors*. 2016;50(10):1377–1382. <https://doi.org/10.1134/S1063782616100134>

15. Иконников А.В., Маремьянин К.В., Морозов С.В., Гавриленко В.И., Павлов А.Ю., Щаврук Н.В., Хабибуллин Р.А., Резник Р.Р., Цырлин Г.Э., Зубов Ф.И., Жуков А.Е., Алфёров Ж.И. Генерация терагерцового излучения в многослойных квантово-каскадных гетероструктурах. *Письма в ЖТФ*. 2017;43(7):86–94. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.07.44473.16602>
16. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А., Гавриленко В.И., Васильевский И.С., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А. Спектры модовых потерь в ТГц квантово-каскадных лазерах с двойным металлическим волноводом на основе Au и Ag. *Квантовая электроника*. 2018;48(11):1005–1008. <https://doi.org/10.1070/QEL16806>
17. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А., Гавриленко В.И., Волков О.Ю., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А. Моделирование квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона частот методом балансных уравнений на основе базиса волновых функций с уменьшенными дипольными моментами туннельно-связанных состояний. *Квантовая электроника*. 2019;49(10):913–918. <https://doi.org/10.1070/QEL17068>
18. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Пономарев Д.С., Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Васильевский И.С., Зайцев А.А., Данилов А.И., Волков О.Ю., Павловский В.В., Маремьянин К.В., Гавриленко В.И. Температурная зависимость порогового тока и выходной мощности квантово-каскадного лазера с частотой генерации 3.3 ТГц. *Физика и техника полупроводников*. 2018;52(11):1268–1273. <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.11.46581.03>
19. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Maremyanin K.V., Volkov O.Yu., Pavlovskiy V.V., Dubinov A.A. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance. *Opto-Electronics Review*. 2019;27(4):329. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.11.002>
20. Долгов А.К., Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дюжиков И.Н., Глинский И.А., Пономарев Д.С., Хабибуллин Р.А. Моделирование эффективности электрической накачки квантово-каскадного терагерцового лазера при неоднородном питании током. *Квантовая электроника*. 2021;51(2):164–168. <https://doi.org/10.1070/QEL17431>
21. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Spectra of mode loss in THz quantum cascade laser with double metal waveguide based on Au, Cu and Ag. *Proc. SPIE*. 2018;11066:1106613. <https://doi.org/10.1117/12.2523284>
22. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Volkov O., Pavlovskiy V., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser. *Proc. SPIE*. 2019;11022:1102204. <https://doi.org/10.1117/12.2521774>
23. Хабибуллин Р.А., Щаврук Н.В., Клочков А.Н., Глинский И.А., Зенченко Н.В., Пономарев Д.С., Мальцев П.П., Зайцев А.А., Зубов Ф.И., Жуков А.Е., Цырлин Г.Э., Алфёров Ж.И. Энергетический спектр и тепловые свойства терагерцового квантово-каскадного лазера на основе резонансно-фононного дизайна. *Физика и техника полупроводников*. 2017;51(4):540–546. <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.04.44349.8414> [Original Russian Text: Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Pavlov A.Yu., Ponomarev D.S., Tomosh K.N., Galiev R.R., Maltsev P.P., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Zubov F.I., Alferov Z.I. Fabrication of terahertz quantum cascade laser with a double metal waveguide based on multilayer GaAs/AlGaAs heterostructures. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2016;50(10):1395–1400 (in Russ.).]
15. Ikonnikov A.V., Maremyanin K.V., Morozov S.V., Gavrilenko V.I., Pavlov A.Yu., Shchavruk N.V., Khabibullin R.A., Reznik R.R., Cirlin G.E., Zubov F.I., Zhukov A.E., Alferov Zh.I. Generation of terahertz radiation in multilayer quantum-cascade heterostructures. *Tech. Phys. Lett.* 2017;43(7):362–365. <https://doi.org/10.1134/S1063785017040083> [Original Russian Text: Ikonnikov A.V., Maremyanin K.V., Morozov S.V., Gavrilenko V.I., Pavlov A.Yu., Shchavruk N.V., Khabibullin R.A., Reznik R.R., Cirlin G.E., Zubov F.I., Zhukov A.E., Alferov Zh.I. Generation of terahertz radiation in multilayer quantum-cascade heterostructures. *Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2017;43(7):86–94 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.07.44473.16602>
16. Ushakov D.V., Afonenko A.A., Dubinov A.A., Gavrilenko V.I., Vasil'evskii I.S., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Khabibullin R.A. Mode loss spectra in THz quantum-cascade lasers with gold- and silver-based double metal waveguides. *Quantum Electronics*. 2018;48(11):1005–1008. <https://doi.org/10.1070/QEL16806>
17. Ushakov D.V., Afonenko A.A., Dubinov A.A., Gavrilenko V.I., Volkov O.Yu., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Khabibullin R.A. Balance-equation method for simulating terahertz quantum-cascade lasers using a wave-function basis with reduced dipole moments of tunnel-coupled states. *Quantum Electronics*. 2019;49(10):913–918. <https://doi.org/10.1070/QEL17068>
18. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Vasil'evskii I.S., Zaycev A.A., Danilov A.I., Volkov O.Y., Pavlovskiy V.V., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I. Temperature dependences of the threshold current and output power of a quantum-cascade laser emitting at 3.3 THz. *Semiconductors*. 2018;52(11):1380–1385. <https://doi.org/10.1134/S1063782618110118> [Original Russian Text: Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Vasil'evskii I.S., Zaycev A.A., Danilov A.I., Volkov O.Y., Pavlovskiy V.V., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I. Temperature dependences of the threshold current and output power of a quantum-cascade laser emitting at 3.3 THz. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2018;52(11):1268–1273 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTP.2018.11.46581.03>]
19. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Ponomarev D.S., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Maremyanin K.V., Volkov O.Yu., Pavlovskiy V.V., Dubinov A.A. The operation of THz quantum cascade laser in the region of negative differential resistance. *Opto-Electronics Review*. 2019;27(4):329. <https://doi.org/10.1016/j.opelre.2019.11.002>
20. Dolgov A.K., Ponomarev D.S., Khabibullin R.A., Ushakov D.V., Afonenko A.A., Dyuzhikov I.N., Glinskiy I.A. Simulation on the nonuniform electrical pumping efficiency of THz quantum-cascade lasers. *Quantum Electronics*. 2021;51(2):164–168. <https://doi.org/10.1070/QEL17431>

24. Цырлин Г.Э., Резник Р.Р., Жуков А.Е., Хабибуллин Р.А., Маремьянин К.В., Гавриленко В.И., Морозов С.В. Особенности роста наноструктур для терагерцовых квантово-каскадных лазеров и их физические свойства. *Физика и техника полупроводников*. 2020;54(9):902–905. <https://doi.org/10.21883/FTP.2020.09.49829.21>
25. Ushakov D., Afonenko A., Khabibullin R., Ponomarev D., Aleshkin V., Morozov S., Dubinov A. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method. *Opt. Express*. 2020;28(17):25371–25382. <https://doi.org/10.1364/oe.398552>
21. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Spectra of mode loss in THz quantum cascade laser with double metal waveguide based on Au, Cu and Ag. *Proc. SPIE*. 2018;11066:1106613. <https://doi.org/10.1117/12.2523284>
22. Khabibullin R., Ushakov D., Afonenko A., Shchavruk N., Ponomarev D., Volkov O., Pavlovskiy V., Vasil'evskii I., Safonov D., Dubinov A. Silver-based double metal waveguide for terahertz quantum cascade laser. *Proc. SPIE*. 2019;11022:1102204. <https://doi.org/10.1117/12.2521774>
23. Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Klochkov A.N., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S., Maltsev P.P., Zaycev A.A., Zubov F.I., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Alferov Zh.I. Energy spectrum and thermal properties of terahertz quantum-cascade laser based on the resonant-phonon depopulation scheme. *Semiconductors*. 2017;51(4):514–519. <https://doi.org/10.1134/S106378261704008X>
[Original Russian Text: Khabibullin R.A., Shchavruk N.V., Klochkov A.N., Glinskiy I.A., Zenchenko N.V., Ponomarev D.S., Maltsev P.P., Zaycev A.A., Zubov F.I., Zhukov A.E., Cirlin G.E., Alferov Zh.I. Energy spectrum and thermal properties of terahertz quantum-cascade laser based on the resonant-phonon depopulation scheme. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2017;51(4):540–546 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTP.2017.04.44349.8414>]
24. Cirlin G.E., Reznik R.R., Zhykov A.E., Khabibullin R.A., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I., Morozov S.V. Specific growth features of nanostructures for terahertz quantum cascade lasers and their physical properties. *Semiconductors*. 2020;54:1092–1095. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782620090298>
[Original Russian Text: Cirlin G.E., Reznik R.R., Zhykov A.E., Khabibullin R.A., Maremyanin K.V., Gavrilenko V.I., Morozov S.V. Specific growth features of nanostructures for terahertz quantum cascade lasers and their physical properties. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*. 2020;54(9):902–905 (in Russ.). <https://doi.org/10.21883/FTP.2020.09.49829.21>]
25. Ushakov D., Afonenko A., Khabibullin R., Ponomarev D., Aleshkin V., Morozov S., Dubinov A. HgCdTe-based quantum cascade lasers operating in the GaAs phonon Reststrahlen band predicted by the balance equation method. *Opt. Express*. 2020;28(17):25371–25382. <https://doi.org/10.1364/oe.398552>

Об авторах

Ушаков Дмитрий Владимирович, к.ф.-м.н., доцент, декан факультета радиофизики и компьютерных технологий, Белорусский государственный университет (220030, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, д. 4). E-mail: ushakovDVU@gmail.com. Scopus Author ID 6701760232, ResearcherID K-4878-2013, <https://orcid.org/0000-0002-2108-7024>

Афоненко Александр Анатольевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники, Белорусский государственный университет (220030, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, д. 4). E-mail: afonenko@bsu.by. Scopus Author ID 6603664811.

Глинский Игорь Андреевич, младший научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Хабидуллин Рустам Анварович, к.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова Российской академии наук (117105, Россия, Москва, Нагорный пр., д. 7, стр. 5); ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (194021, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26). E-mail: khabibullin@isvch.ru. Scopus Author ID 55018400000, ResearcherID B-6594-2012, <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>

About the authors

Dmitrii V. Ushakov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Dean of the Faculty of Radiophysics and Computer Technologies, Belarusian State University (4, Nezavisimosti pr., Minsk, 220030 Belarus). E-mail: ushakovDVU@gmail.com. Scopus Author ID 6701760232, ResearcherID K-4878-2013, <https://orcid.org/0000-0002-2108-7024>

Alexander A. Afonenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Head of the Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics, Belarusian State University (4, Nezavisimosti pr., Minsk, 220030 Belarus). E-mail: afonenko@bsu.by. Scopus Author ID 6603664811.

Igor A. Glinskiy, Junior Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia). E-mail: glinskiy.igor@yandex.ru. Scopus Author ID 57190616854, ResearcherID I-4334-2015, <https://orcid.org/0000-0002-0477-608X>

Rustam A. Khabibullin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Researcher, V.G. Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics, Russian Academy of Sciences (7/5, Nagorny pr., Moscow, 117105 Russia); Leading Researcher, Ioffe Institute (26, Politekhnicheskaya ul., St. Petersburg, 194021 Russia). E-mail: khabibullin@isvch.ru. Scopus Author ID 55018400000, ResearcherID B-6594-2012, <https://orcid.org/0000-0002-8414-7653>