

УДК: 536.4

ТЕПЛОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО  
КВАНТОВОГО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ  
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ GaAs/AlGaAs

**И.А. Глинский<sup>®</sup>**, заведующий лабораторией, аспирант

**Н.В. Зенченко**, инженер 1 категории

**П.П. Мальцев**, д.т.н., профессор

*Кафедра нанoeлектроники Физико-технологического института МИРЭА,  
Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия*

*<sup>®</sup>Автор для переписки, e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru*

В работе проведено моделирование тепловых процессов терагерцового квантово-каскадного лазера (ТГц-ККЛ) на основе наногетероструктуры GaAs/AlGaAs с двойным металлическим волноводом методом конечных элементов в условиях постоянного и импульсного режимов питания. Получено распределение температуры в ТГц-ККЛ. Проведено моделирование ТГц-ККЛ с термокомпрессионным соединением наногетероструктуры и подложки на основе In–Au, Au–Au и Cu–Cu. Получена зависимость максимальной температуры от ширины активной области ТГц-ККЛ. Исследованы температурные режимы лазера в зависимости от параметров импульсного режима питания.

**Ключевые слова:** источник ТГц-излучения, терагерцовый квантово-каскадный лазер, двойной металлический волновод, тепловое моделирование, метод конечных элементов, тепловое распределение.

THERMAL MODELLING OF TERAHERTZ  
QUANTUM-CASCADE LASER BASED ON  
NANOHETEROSTRUCTURES GaAs/AlGaAs

**I.A. Glinskiy<sup>®</sup>**,

**N.V. Zenchenko**,

**P.P. Maltsev**

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia*

*<sup>®</sup>Corresponding author e-mail: glinskiy.igor@yandex.ru*

This work presents the result of a simulation of thermal processes in a terahertz quantum cascade laser (THz QCL) based on GaAs/AlGaAs nanoheterostructure with a bimetal waveguide. A simplified model of THz QCL was built. Model simplifications of THz QCL were justified. The temperature distribution and maximum temperature values in the active

region were obtained for different duty cycles and for various active region sizes with proportional heat generation change. Different types of bonding of the active region and substrate were simulated. According to the results a conclusion about the optimal duty cycle and frequency for the pulse mode were formulated. The time-to-stationary mode for different pulse width was calculated. The maximum temperature gradient in THz QCL was calculated.

**Keywords:** THz source, terahertz quantum-cascade laser, bimetal waveguide, thermal modelling, finite elements method, heat distribution.

## Введение

Терагерцовое излучение уже много лет привлекает внимание исследователей благодаря его способности проникать через большинство диэлектрических материалов, что в определенной степени подобно свойствам рентгеновского излучения. При этом оно безвредно для человека. Указанное обстоятельство открывает широчайшие возможности для его применения в медицинской диагностике, системах безопасности, экологического мониторинга, контроля качества и других областях науки и техники.

С развитием полупроводниковых технологий стало возможным создание перспективного источника терагерцового излучения – квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот (ТГц-ККЛ).

Принцип действия ТГц-ККЛ основан на излучении квантов света при переходах электронов между уровнями внутри зоны проводимости. Работа ТГц-ККЛ сопровождается большим тепловыделением в активной части устройства, вследствие чего максимальные значения выходной мощности достигаются только при пониженных температурах. Данная проблема ограничивает массовое применение ТГц-ККЛ и стимулирует проведение многочисленных исследований с целью увеличения рабочих температур ТГц-ККЛ.

Первый ТГц-ККЛ работал до температуры 50 К и только в импульсном режиме [1, 2]. Он был основан на сверхрешетке с постепенно изменяющимся периодом [3, 4]. Это позволило получить инверсию населенности для межподзонных переходов с энергией квантов меньше, чем энергия оптического фонона при запрете рассеяния на оптическом фоне при низких температурах. Наибольшие успехи были достигнуты с использованием структур, содержащих в активной зоне две квантовые ямы, с инверсией населенности, основанной на резонансном испускании продольного оптического фонона, что позволяет селективно уменьшать населенность нижнего уровня [5]. Кроме того, использование волновода с металлом по обеим сторонам активной части структуры позволило обеспечить высокое модовое ограничение и получить резонатор с малыми потерями для ТГц-ККЛ. Была также увеличена туннельная прозрачность между состояниями инжектора и верхним излучающим состоянием. Вместе эти достижения позволили получить генерацию лазерного излучения при более высокой температуре. В диапазоне частот 3–4.5 ТГц достигнутая величина выходной мощности превысила 100 мВт, а рабочие температуры достигли 160 К в импульсном и 100 К – в непрерывном режимах [6].

В работе [7] продемонстрирован ТГц-ККЛ, работающий в импульсном режиме с частотой излучения 3.9 ТГц и рабочей температурой 186 К. Значение рабочей температуры достигается за счет увеличения диагональности дизайна данных структур, соответственно, увеличивается время жизни на верхнем рабочем уровне и, как следствие, инверсная

населенность на рабочем переходе. Известен ТГц-ККЛ с частотой излучения 3.22 ТГц, мощностью излучения 80 мкВт и рабочей температурой 199.5 К [8]. Такое значение рабочей температуры лазера является рекордным на сегодняшний день для ТГц-ККЛ без магнитного поля.

Одним из методов исследования тепловых свойств ТГц-ККЛ является моделирование тепловых процессов в устройстве методом конечных элементов. Так, тепловое моделирование ТГц-ККЛ и результаты расчетов [9] показали высокую степень совпадения с экспериментально измеренными значениями температуры. Показано [9–11], что тепловые свойства ТГц-ККЛ существенно зависят от качества термокомпрессионного соединения активного региона лазера с токопроводящей подложкой, а также от используемых материалов волновода.

Целью настоящей работы является оценка тепловых свойств GaAs/AlGaAs ТГц-ККЛ на основе GaAs/AlGaAs с использованием моделирования методом конечных элементов для определения оптимальных режимов его охлаждения и питания.

### 1. Постановка задачи

Основными материалами, которые применяются или считаются перспективными для создания ТГц-ККЛ, являются GaAs/AlGaAs, GaN/AlGaN, GaInAs/AlInGaAs/InP, Si/SiGe, ZnO/ZnMgO, однако чаще всего используют GaAs/AlGaAs [12].

Существует несколько разновидностей волноводов ТГц-ККЛ. Обычно используют двойные металлические (M–M, из золота или меди) и полуизолирующие поверхностные плазмонные (SI–SP) волноводы [12]. На сегодня M–M-волноводы показывают более высокие рабочие температуры. С точки зрения рабочих температур, чем шире активная область, тем больше значение тепловыделения при одинаковой плотности мощности. Поэтому рекордные значения рабочих температур получают при наименьшей ширине активного региона, вплоть до 25 мкм. В то же время ширина активной области практически не влияет на усиление лазера в случае M–M-волновода [13].

На рис. 1 приведена упрощенная структура выбранного для исследования GaAs/AlGaAs ТГц-ККЛ с M–M-волноводом.

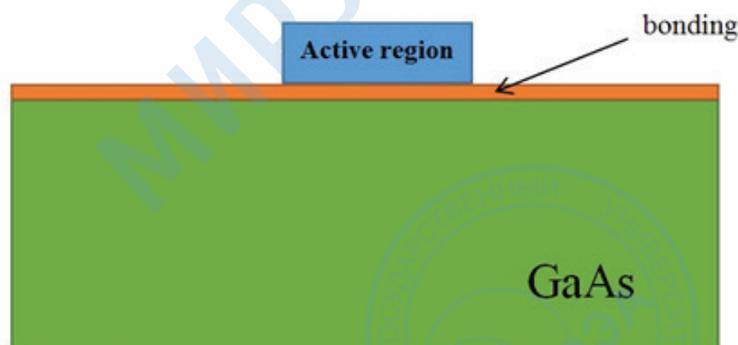


Рис. 1. Структура моделируемого ТГц-ККЛ с M–M-волноводом.

Материал подложки ККЛ –  $n^+$ GaAs, а активная область представляет собой многослойную наногетероструктуру, основу которой составляет  $Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ . Неоднородностью наногетероструктуры можно пренебречь, так как разница в теплопроводности ее слоев минимальна и не повлияет на конечный результат. Верхний слой металлизации также целесообразно не учитывать ввиду небольшой толщины слоя и, как следствие, малого его влияния на тепловые свойства лазерной структуры.

Для термокомпрессионного соединения («bonding») активного региона лазера с токопроводящей подложкой применяют сплавы In–Au, Au–Au и Cu–Cu. Наиболее перспективным является использование Cu в качестве материала для соединения. Например, в [14] показано, что в случае использования *Cu–Cu-bonding* потери в волноводе существенно меньше. Кроме того, значение теплопроводности Cu превышает значение и In, и Au (рис. 2).

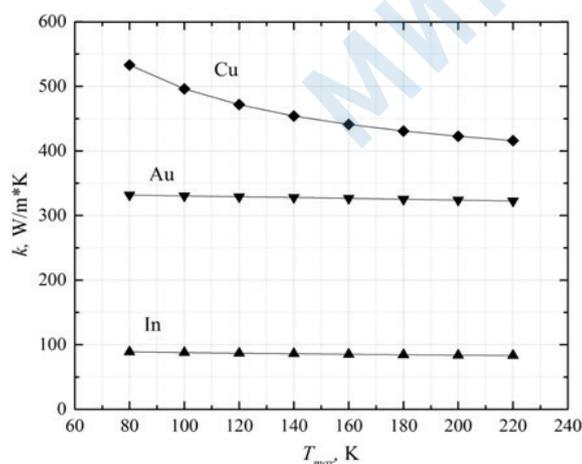


Рис. 2. Теплопроводность In, Au и Cu в зависимости от температуры.

Исследования процессов разогрева лазерной структуры показали возможность контролировать перестройку частоты квантово-каскадных лазеров с помощью температуры. Основная причина перестройки частоты – это изменение эффективного показателя преломления лазерной структуры. Температурная перестройка ККЛ среднего ИК-диапазона за счет изменения эффективного показателя преломления составляет  $\sim 10\text{--}20\text{ см}^{-1}$  [15, 16], причем ее величина ограничена верхней рабочей температурой лазера. Однако температурная перестройка ТГц-лазеров доступна лишь в узком диапазоне частот из-за низких рабочих температур. Разогрев за время импульса генерации также вносит вклад в перестройку частоты лазера. Питание ТГц-ККЛ в импульсном режиме позволит влиять на значения рабочих температур и тем самым осуществлять перестройку частоты ТГц-ККЛ. В то же время в ряде работ отмечено, что влияние смещения частоты в ИК-ККЛ отличается от процессов в ТГц-ККЛ. Поэтому исследование таких процессов в широком температурном диапазоне работы лазера, приводящих к перестройке частоты генерации, остаются актуальными.

Моделирование ТГц-ККЛ на основе GaAs/AlGaAs проведено с целью получения распределения температуры и вычисления максимального нагрева активной области ККЛ в зависимости от ширины активной области и материала термокомпрессионного соединения. Поставлена задача определить оптимальную длительность импульсов и скважность

в импульсном режиме работы для контроля градиента значения температуры.

Расчеты проводили методом конечных элементов – численным методом решения дифференциальных уравнений с частными производными. Его идея заключается в том, что любую непрерывную величину можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, или конечных элементов [17–19].

## 2. Моделирование ТГц-ККЛ

*Стационарное моделирование.* Основными параметрами для расчета тепловых процессов являются теплопроводность, теплоемкость и плотность материалов. Использованы данные по свойствам материалов, приведенные в работах [9, 20–22]. Данные представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Свойства материалов ТГц-ККЛ

Материал	Удельная теплопроводность, Вт/м·К	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж·кг/°С
Al <sub>0.15</sub> Ga <sub>0.85</sub> As	$9.6T^{0.14}$	5290	310
GaAs	$74500T^{-1.30}$	5320	330
Cu	$349 + 14710/T$	8960	385
In	$93.9 - 6.96 \times 10^{-2}T + 9.86 \times 10^{-5}T^2$	7310	233
Au	$337 - T/15.15$	19300	128

Термокомпрессионное соединение на основе In–Au обладает большим количеством дефектов и полостей по сравнению с соединением на основе Au–Au и Cu–Cu. Поэтому теплопроводность сплава существенно меньше тех же значений для чистых материалов. Данный технологический аспект учтен нами при расчетах.

Длина лазерной структуры 1.6 мм. Размеры активной области ККЛ 100×10 мкм, размеры подложки – 500×350 мкм. Между активной областью и подложкой находится термокомпрессионное соединение толщиной 3 мкм.

Температура на нижней поверхности токопроводящей подложки GaAs задана как постоянная величина и составляет 100 К, что соответствует использованию для охлаждения лазерной структуры криостата замкнутого цикла. Конвекция при расчетах не учитывалась, поскольку площадь поверхности ТГц-ККЛ пренебрежимо мала.

Источником тепла является активный регион ТГц-ККЛ. Удельное тепловыделение рассчитано, исходя из значения выделяемой мощности 12 Вт аналогичного ТГц-ККЛ [23] и составляет  $7.55 \times 10^{12}$  Вт/м<sup>3</sup>.

В результате моделирования ТГц-ККЛ с разными вариантами термокомпрессионного соединения выявлено, что более высокой эффективностью теплопереноса обладают соединения на основе Au–Au и Cu–Cu. Температура в случае In–Au достигала значения 186 К, для Au–Au 177 К и для Cu–Cu 176 К, соответственно. На рис. 3 представлено распределение температуры в ТГц-ККЛ с термокомпрессионным соединением на основе In–Au.

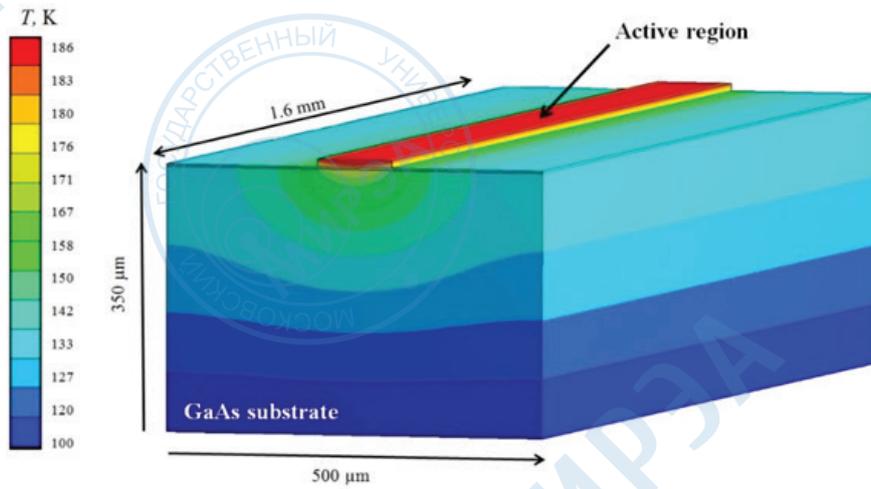


Рис. 3. Распределение температуры в ТГц-ККЛ.

На рис. 4 продемонстрирована зависимость максимальной температуры в ТГц-ККЛ от ширины активной зоны при постоянной плотности мощности.

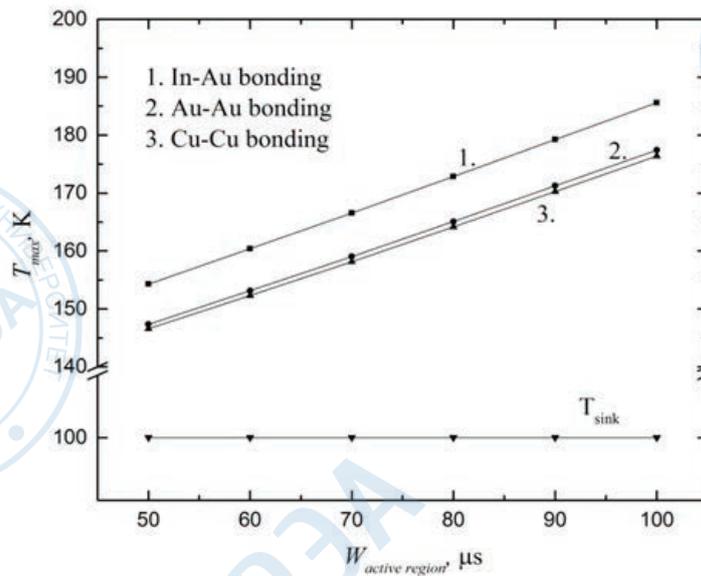


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры в ТГц-ККЛ от ширины активной зоны при постоянной плотности мощности.

Как показал расчет, максимальная температура при увеличении ширины активной зоны при постоянной плотности мощности возрастает линейно.

*Нестационарное моделирование.* Один из возможных способов перестройки частоты ТГц-ККЛ является изменение его рабочей температуры, которую, в свою очередь, можно определять варьированием параметров импульсного питания. Кроме того, одна из особенностей работы с ТГц-ККЛ заключается в том, что наибольшая мощность излучения достигается при охлаждении лазерной структуры до гелиевых температур. Для охлаждения лазеров применяют различные криостаты замкнутого цикла. Мощность охла-

дения криостатов при гелиевых температурах составляет десятые доли Вт. Например, самая мощная установка компании Advanced Research Systems обеспечивает охлаждение на уровне 0.8 Вт при  $T = 4.2$  К [24]. Характерная мгновенная рассеиваемая мощность лазерной структуры – несколько ватт [11]. Поэтому применение криостатов для охлаждения лазеров до  $T = 4.2$  К возможно только при работе в импульсном режиме и выборе соответствующий длительности и скважности импульсов, чтобы средняя рассеиваемая лазерной структурой мощность не превышала мощность охлаждения используемого криостата замкнутого цикла.

Проведено моделирование работы ТГц-ККЛ в импульсном режиме с различными длительностями импульсов и скважностями. Расчет проводили для частот в диапазоне 10–100 кГц. Отметим, что за время 2 мс моделируемый ТГц-ККЛ при частоте 10–100 кГц выходит на стационарный режим работы, и при дальнейшей работе значения максимальной температуры остаются неизменными. Выход температуры на постоянные значения продемонстрирован на рис. 5.

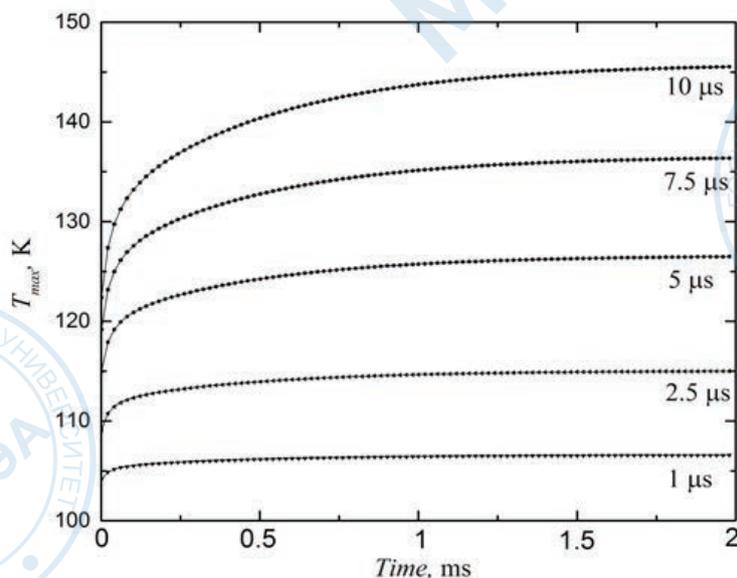


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры от времени работы при частоте 50 кГц и разных длительностях импульса.

На рис. 6 представлена зависимость максимальной температуры в активной области от частоты при разных скважностях.

Из приведенных на рис. 6 зависимостей очевидно, что при высокой скважности (99%) изменение частоты практически не влияет на разогрев активной области, так как даже в случае низких частот промежутки между импульсами слишком большой и активная область успевает остывать. При меньшей скважности максимальная температура существенно увеличивается при питании ТГц-ККЛ на низких частотах.

### Заключение

Выполнено моделирование тепловых процессов ТГц-ККЛ на основе наногетероструктуры GaAs/AlGaAs с двойным металлическим волноводом методом конечных элементов в условиях постоянного и импульсного режимов питания.

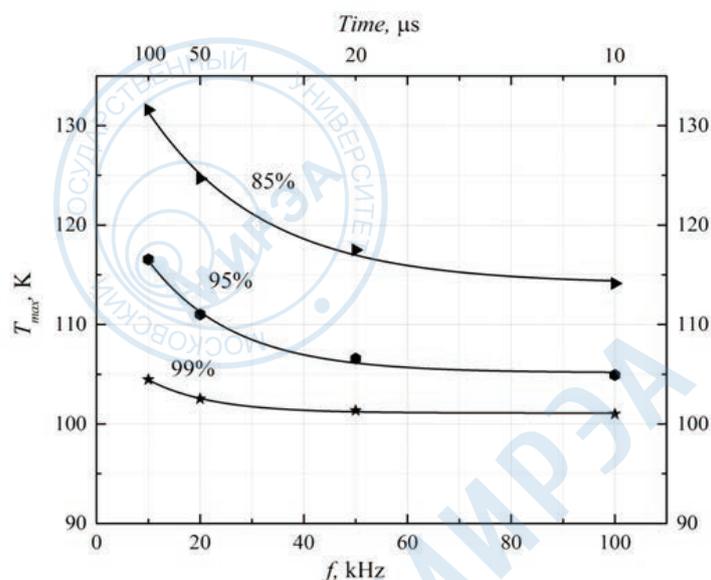


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры от частоты при разной скажности.

Рассчитаны варианты модели ТГц-ККЛ с термокомпрессионным соединением наногетероструктуры с подложкой на основе In–Au, Au–Au и Cu–Cu. Получено распределение температуры в ТГц-ККЛ. Установлено, что более высокой эффективностью теплопереноса обладают соединения на основе Au–Au и Cu–Cu. Градиент температур между соединением на основе In–Au и Cu–Cu составил 10 К. Использование термокомпрессионного соединения наногетероструктуры с подложкой на основе Cu–Cu является наиболее перспективным.

Получена зависимость максимальной температуры от ширины активной области ТГц-ККЛ. Максимальная температура возрастает линейно при увеличении ширины активного региона лазера при постоянной плотности мощности. Изготовление ТГц-ККЛ с М–М-волноводом с меньшей шириной активного региона позволит добиться повышения его рабочих температур.

Исследованы температурные режимы ТГц-ККЛ в зависимости от параметров импульсного режима питания, которые позволяют определить оптимальный импульсный режим питания под конкретную систему охлаждения, необходимый градиент температуры в структуре лазера и тем самым влиять на смещение частоты.

#### Литература:

1. Kohler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H.E. Terahertz semiconductor-heterostructure laser // Nature. 2002. № 417. P. 156–159.
2. Rochat M., Ajili L., Willenberg H., Faist J., Beere H., Davies G., Linfield E., Ritchie D. Low-threshold terahertz quantum-cascade lasers // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 1381–1383.
3. Tredicucci A., Capasso F., Gmachl C., Sivco D.L., Hutchinson A.L., Cho A.Y. High performance interminiband quantum cascade lasers with graded superlattices // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2101–2103.

4. Wanke M., Capasso F., Gmachl C., Tredicucci A. Injectorless quantum-cascade lasers // *Appl. Phys. Lett.* 2001. V. 78. P. 3950–3952.
5. Williams B.S., Callebaut H., Kumar S., Hu Q. 3.4-THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 1015–1017.
6. Williams B.S. Terahertz quantum-cascade lasers // *Nature Photonics.* 2007. № 1. P. 517–525.
7. Kumar S., Hu Q., Reno J.L. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design // *Appl. Phys. Lett.* 2009. № 9. P. 131105.
8. Fathololoumi S., Dupont E., Chan C.W.I., Wasilewski Z.R., Laframboise S.R., Ban D., Matyas A., Jirauschek C., Hu Q., Liu H.C. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling // *Optics Express.* 2012. V. 20 (4). P. 3866–3876.
9. Evans C.A., Indjin D., Ikonc Z., Harrison P., Vitiello M.S., Spagnolo V., Scamarcio G. Thermal modeling of terahertz quantum-cascade lasers: Comparison of optical waveguides // *IEEE J. Quantum Electronics.* 2008. V. 44. № 7. P. 680–685.
10. Kumar S., Williams B.S., Kohen S., Hu Q., Reno J.L. Continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers above liquid-nitrogen temperature // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 2494–2496.
11. Williams B.S., Kumar S., Hu Q., Reno J.L. Operation of terahertz quantum-cascade lasers at 164 K in pulsed mode and at 117 K in continuous-wave mode // *Optics Express.* 2005. V. 13. № 9. P. 3331–3339.
12. Гареев Г.З., Лучинин В.В. Терагерцовые системы и технологии (обзор современного состояния). СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 228 с.
13. Kohen S., Williams B.S., Hu Q. Electromagnetic modeling of terahertz quantum cascade laser waveguides and resonators // *J. Appl. Phys.* 2005. № 97. P. 053106.
14. Belkin M.A., Fan J.A., Hormoz S., Capasso F., Khanna S.P., Lachab M., Davies A.G., Linfield E.H. Terahertz quantum cascade lasers with copper metal-metal waveguides operating up to 178 K // *Optics Express.* 2008. V. 16. № 5. P. 3242–3248.
15. Hugi A., Maulini R., Faist J. External cavity quantum cascade laser // *Semiconductor Science and Technology.* 2010. № 25. P. 083001.
16. Wittmann A., Bonetti Y., Fischer M., Faist J., Blaser S., Gini E. Distributed-feedback quantum-cascade lasers at 9  $\mu\text{m}$  operating in continuous wave up to 423 K // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2009. V. 21. № 12. P. 814–816.
17. Glinskii I.A., Zenchenko N.V. Computer simulation of the heat distribution element for high-power microwave transistors // *Russian Microelectronics.* 2015. V. 44. № 4. P. 236–240.
18. Глинский И.А., Рубан О.А., Алёшин А.Н., Зенченко Н.В., Мельников А.А. Расчет тепловых режимов НЕМТ-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN // *Нано- и микросистемная техника.* 2014. № 11. С. 43–48.
19. Зенченко Н.В., Рубан О.А., Алёшин А.Н., Глинский И.А., Мельников А.А. Моделирование нестационарных тепловых режимов НЕМТ-транзистора // *Нано- и микросистемная техника.* 2014. № 12. С. 3–6.
20. Blakemore J.S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide // *J. Appl. Phys.* 1982. V. 53. № 10. P. R123–R181.

21. Cetas T.C., Swenson C.A., Tilfor C.R. // Phys. Rev. Ser. 2. 1968. V. 174. P. 835.
22. Carlson R.O., Slack G.A., Silverman S.J. Thermal conductivity of GaAs and GaAs<sub>1-z</sub>Pz laser semiconductors // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. № 2. P. 505–507.
23. Williams B.S., Kumar S., Hu Q., Reno J.L. High-power terahertz quantum-cascade lasers // Electronics Letters. 2006. V. 42. № 2. P. 89–91.
24. [http://www.trlsys.ru/products\\_cryo\\_closed.shtml](http://www.trlsys.ru/products_cryo_closed.shtml).