

Квантово-каскадные лазеры терагерцового диапазона в России: современное состояние и перспективы

Р. Хабибуллин, к. ф. - м. н.¹

УДК 621.382 | ВАК 05.27.01

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) терагерцового диапазона (ТГц), не требующие криогенного охлаждения, были впервые продемонстрированы в 2019 году, что в перспективе позволит данным компактным инжекционным твердотельным источникам ТГц-излучения «выйти» из лабораторий и стать ключевым элементом большинства ТГц-систем на рынке. Работа ТГц ККЛ с охлаждением на элементе Пельтье является революционным результатом, который был достигнут благодаря усилиям большого научного сообщества. Несмотря на то, что идея ККЛ впервые была предложена советскими учеными Р. Ф. Казариновым и Р. А. Сурисом, в России долгое время работы по созданию лазеров данного типа не велись. Однако, несмотря на 15-летнюю задержку относительно работ зарубежных групп, в России были созданы ТГц ККЛ, которые демонстрируют конкурентоспособные характеристики по сравнению с аналогичными по дизайну зарубежными образцами. В статье представлены наиболее значимые результаты, полученные в ходе разработки, изготовления и исследования отечественных ТГц ККЛ.

Долгое время терагерцовый диапазон частот в литературе и науке рассматривался как «терагерцовый провал» (terahertz gap), что определялось технологическими и техническими сложностями при создании источников и детекторов ТГц-излучения в данном частотном диапазоне, а также наличием значительного поглощения ТГц-излучения парами воды в атмосфере. В последнее десятилетие наблюдается стремительное освоение ТГц-диапазона, что привело к значительному сужению «терагерцового провала» до диапазона 6–10 ТГц, что соответствует так называемой Reststrahlen band для полупроводников АЗВ5. В первую очередь это связано с развитием подходов и технологий создания квантово-каскадных лазеров (ККЛ), которые работают в среднем инфракрасном и терагерцовом диапазонах [1].

В области высоких частот (10–30 ТГц) ККЛ на основе InAs- / AlSb- и InGaAs- / GaAsSb-гетероструктур [2, 3] продемонстрировали возможность генерации на длинах волн 25 и 28 мкм, что соответствует частотам 12,0 и 10,7 ТГц. На частотах 1–6 ТГц максимальная частота генерации ККЛ на основе GaAs- / AlGaAs-гетероструктуры составила 5,4 ТГц [4]. Однако создание ККЛ на описанных выше материалах в диапазоне 6–10 ТГц невозможно из-за сильного поглощения излучения на оптических фонах.

Несмотря на значительный прогресс терагерцовых ККЛ (далее – ТГц ККЛ) с точки зрения таких характеристик, как рабочая температура и выходная мощность, остается еще много вопросов, касающихся электронного транспорта в сложных квантовых системах, которые являются активной областью данных лазеров. К примеру, разработка более эффективных рабочих схем ТГц ККЛ с подавлением паразитных каналов проводимости привели к росту максимальной рабочей температуры с 50 К в 2002 году [5] до 199,5 К в 2012 году [6]. Долгое время ТГц ККЛ считались криогенными приборами, в которых чип лазера необходимо монтировать на холодную плату заливного криостата или криорефрижератора замкнутого цикла, что значительно ограничивало «малогабаритность» и «энергоэффективность» данных ТГц-источников. Однако продолжение работ по исследованию электронного транспорта и созданию более продуманных дизайнов каскада позволили через семь лет после «предыдущего рекорда» продемонстрировать в 2019 году ТГц ККЛ с максимальной рабочей температурой 210 К и термоэлектрическим охлаждением [7], что, безусловно, является революционным результатом с точки зрения возможности применения данных лазеров. В 2020 году были продемонстрированы ТГц ККЛ с максимальной рабочей температурой 250 К с охлаждением на однокаскадном элементе Пельтье, что позволяет

¹ ИСВЧПЭ РАН, ведущий научный сотрудник, khabibullin@isvch.ru.

создавать компактные ТГц лазерные системы с высокой выходной мощностью [8].

Сегодня ТГц ККЛ демонстрируют феноменальные для данного частотного диапазона выходные мощности. Разностороннее детальное исследование электронного транспорта в ТГц ККЛ и оптимизация дизайнов активной области разрабатываемых лазеров позволили в 2017 году продемонстрировать выходную мощность около 2,4 Вт при 10 К в импульсном режиме (около 1,8 Вт при температуре кипения жидкого азота) [9]. При этом нет никаких сомнений в том, что дальнейшие работы по созданию более продуманных рабочих схем ТГц ККЛ позволят увеличить выходную мощность данных источников.

Однако приведенные рекордные значения были получены на ККЛ с частотами излучения в диапазоне 3–4 ТГц. При изменении частоты от 3 до 1 ТГц выходные мощности и рабочие температуры существенно снижаются, что связано с различными физическими ограничениями. В первую очередь, это связано с тем, что величина энергетического зазора между рабочими уровнями (около 8 мэВ для частоты 2 ТГц) становится сопоставима с энергетическим уширением подзон (единицы мэВ). При этом уменьшается эффективность инжекции электронов на верхний лазерный уровень, что требует поиска новых схем работы ТГц ККЛ, в том числе новых способов инжекции электронов. Со стороны высоких частот (от 3 к 5 ТГц) рабочий диапазон терагерцовых ККЛ ограничен полосой остаточных лучей в GaAs.

В ККЛ инфракрасного диапазона характерные энергии фотонов составляют порядка 100 мэВ, что позволяет создавать относительно тонкие барьерные слои инжектора с энергетическим расщеплением верхнего лазерного уровня и уровня инжектора порядка 10 мэВ. В ТГц ККЛ энергии фотонов составляют порядка 10 мэВ, поэтому для селективной инжекции необходимы меньшие по сравнению с ИК ККЛ энергии расщепления (порядка 1 мэВ) и, соответственно, большие толщины барьерного слоя инжектора. Это приводит к потере когерентности при туннелировании электронов (уменьшается вероятность туннелирования из-за упругих межподзонных механизмов рассеяния – dephasing scatterings) и снижает эффективность электронного транспорта через инжектор. Таким образом, для улучшения характеристик ТГц ККЛ необходимо разрабатывать новые схемы работы лазера с учетом важности когерентности электронного транспорта в GaAs/AlGaAs многослойных гетероструктурах.

До недавнего времени в России не было ни одной научной группы, освоившей изготовление лазеров ТГц-диапазона. С 2015 года по инициативе лауреата Нобелевской премии Ж. И. Алферова в рамках коллаборации Института сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В. Г. Мокерова РАН,

СПб Академического университета РАН и Института физики микроструктур РАН была начата работа по созданию первого отечественного ТГц ККЛ, в ходе которой был продемонстрирован первый ТГц ККЛ, полностью изготовленный в России, с частотой генерации около 3,2 ТГц [10]. Участникам коллаборации удалось освоить расчет конструкции активной области ТГц ККЛ, постростовую технологию изготовления двойного металлического волновода и сборку ТГц ККЛ на теплоотводе.

В результате проделанной работы были предложены конструкции активной области ТГц ККЛ на основе трех и четырех туннельно-связанных квантовых ям с резонансно-фононной схемой депопуляции нижнего лазерного уровня и силой осциллятора диагонального излучающего перехода $f_{21} > 0,4$ [11, 12]. Проведен расчет спектров усиления ТГц ККЛ в зависимости от напряженности приложенного электрического поля и температуры [13]. Для создания ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом была разработана постростовая технология обработки многослойных GaAs-/AlGaAs-гетероструктур [14]. Предложен и апробирован оригинальный способ изготовления воздушных мостов для создания ТГц ККЛ, работающих в непрерывном режиме [15]. Проведено исследование эффективности электрической накачки ТГц ККЛ в зависимости от количества и расположения на лазерном полоске контактных площадок [16]. На основе численного моделирования распределения электрического потенциала в активной области ТГц ККЛ определены необходимые толщины верхней металлизации ТГц ККЛ для минимизации падения напряжения вдоль лазерного полоска в случае неоднородного питания током.

На сегодняшний день изготовлены ТГц ККЛ с частотами генерации 2,3; 3,3; 3,8 и 5,0 ТГц и максимальной рабочей температурой более 100 К [13, 17–19]. Проведено исследование влияния температуры на пороговый ток и выходную мощность изготовленных ТГц ККЛ. Показано, что при увеличении температуры от 40 до 58 К наблюдается незначительное уменьшение мощности излучения на ~30%, что позволяет использовать для охлаждения изготовленных ТГц ККЛ откачку паров азота. Определено, что температурная активация испускания LO-фононов «горячими» электронами на верхнем лазерном уровне является доминирующим механизмом рассеяния в исследуемых ТГц ККЛ.

Совместно с Институтом радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН проведено исследование спектров излучения ТГц ККЛ методом фурье-спектроскопии в зависимости от амплитуды и длительности возбуждающего импульса тока [18]. Обнаружены эффект «перекачки» интенсивности между соседними продольными модами и сдвиг частоты спектральных линий на 3,7 ГГц при увеличении тока на 120 мА. Впервые

* * *

измерены спектры генерации ТГц ККЛ методом Гильберт-спектроскопии с использованием нестационарного эффекта Джозефсона в переходах из высокотемпературных сверхпроводников [20].

Совместно с Московским педагогическим университетом проведено исследование импульсной генерации ККЛ с использованием сверхпроводникового электронно-разогревного болометра SNEB на основе NbN-пленки [19]. В частности, было продемонстрировано, что, благодаря быстрому отклику болометра (~100 пс), появляется возможность регистрировать очень короткие импульсы излучения ККЛ. Варьируя параметры задающего импульса смещения, можно исследовать динамику процессов, происходящих в гетероструктуре, в частности изучать режим появления и затухания генерации в зависимости как от длительности задающего импульса, так и от мгновенного значения его амплитуды. При использовании плавно нарастающего задающего импульса смещения, фактически, появляется возможность исследовать зависимость мощности генерации от напряжения (тока) смещения в режиме «реального времени», анализируя пару импульсов – задающий импульс и импульс, генерируемый сверхпроводниковым болометром, с помощью осциллографа.

Совместно с Белорусским государственным университетом разработана модель расчета вольт-амперных (ВАХ) и мощностных характеристик квантово-каскадных лазеров терагерцового диапазона на основе системы балансных уравнений для локализованных состояний и состояний континуума [21]. Для учета влияния дефазировки на процессы переноса носителей заряда предложен метод модификации собственного базиса уравнения Шредингера путем снижения дипольных моментов туннельно-связанных состояний. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных ВАХ и зависимости интегральной интенсивности излучения от тока для ТГц ККЛ с частотой генерации 2,3 ТГц и найдено хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных значений порогового тока, токового диапазона генерации и максимальной рабочей температуры T_{\max} . Впервые рассчитан спектр модовых потерь в ТГц ККЛ с двойным металлическим волноводом на основе золота, меди и серебра [22–24]. Показано, что использование двойного металлического волновода на основе серебра позволяет уменьшить потери на $2\text{--}4\text{ см}^{-1}$ по сравнению с волноводом на основе золота, что позволит повысить T_{\max} на ~10 К. На данный момент изготовлен ТГц ККЛ с Ag–Ag-волноводом и проводятся измерения характеристик изготовленных лазеров. Совместно с Белорусским государственным университетом и Институтом физики микроструктур РАН впервые теоретически предложены ККЛ на основе HgCdTe, излучающие в полосе остаточных лучей GaAs с частотой генерации 8,3 ТГц [25].


В заключении хотелось бы отметить, что за последние пять лет в России, благодаря интенсивной работе большого коллектива ученых, удалось существенно сократить отставание от ведущих мировых центров в области ТГц ККЛ. Более того, в последние годы отечественные ученые демонстрируют яркие результаты, связанные с созданием более эффективных дизайнов ТГц ККЛ, как на основе традиционной гетеропары GaAs/AlGaAs, так и на основе новых материалов, что дает основание для прорывных работ в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vitiello M. S., Scalari G., Williams B., Natale P. D.** Quantum cascade lasers: 20 years of challenges // *Opt. Express*. 2015. V. 23. No. 4. PP. 5167–5182.
2. **Loghmani Z., Bahriz M., Meguekam A., Teissier R., Baranov A. N.** InAs-based quantum cascade lasers emitting close to 25 μm // *Electron. Lett.* 2019. V. 55. No. 3. PP. 144–146.
3. **Ohtani K., Beck M., Süess M. J., Faist J.** Far-Infrared Quantum Cascade Lasers Operating in the AlAs Phonon Reststrahlen Band // *ACS Photonics*. 2016. V. 3. No. 12. PP. 2280–2284.
4. **Wienold M., Röben B., Lü X., Rozas G., Schrottke L., Biermann K., Grahn H. T.** Frequency dependence of the maximum operating temperature for quantum-cascade lasers up to 5.4 THz // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 107. P. 202101.
5. **Köhler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H. E., Linfield E. H., Davies A. G., Ritchie D. A., Iotti R. C., Rossi F.** Terahertz semiconductor-heterostructure laser // *Nature*. 2002. V. 417. PP. 156–159.
6. **Fatholouloumi 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 // *Opt. Express*. 2012. V. 20. No. 4. PP. 3866–3876.
7. **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. V. 115. P. 010601.
8. **A. Khalatpour, A. K. Paulsen, C. Deimert, Z. R. Wasilewski, Q. Hu.** High-power portable terahertz laser system // *Nature Photonics*. (2020). <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00707-5>.
9. **Li L. H., Chen L., Freeman J. R., Salih M., Dean P., Davies A. G., Linfield E. H.** Multi-Watt high-power THz frequency quantum cascade lasers // *Electron. Lett.* 2017. V. 53, No. 12. PP. 799–800.
10. **Алферов Ж. И., Зубов Ф. И., Цырлин Г. Э., Жүков А. Е., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Пономарев Д. С., Клочков А. Н., Хабибуллин Р. А., Мальцев П. П.**

- Создание первого отечественного квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот // Нано- и микро-системная техника. 2017. Т. 19. № 5. С. 259–265.
11. **Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Y., Klochkov A. N., Ponomarev D. S., Glinskiy I. A., Maltsev P. P., Zhukov A. E., Cirlin G. E., Alferov Z. I.** Terahertz Quantum-Cascade Laser Based on the Resonant-Phonon Depopulation Scheme // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2016. V. 25. No. 03n04. P. 1640022.
 12. **Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Клочков А. Н., Глинский И. А., Зенченко Н. В., Пономарев Д. С., Мальцев П. П., Зайцев А. А., Жуков А. Е., Цырлин Г. Э., Алфёров Ж. И.** Энергетический спектр и тепловые свойства терагерцового квантово-каскадного лазера на основе резонансно-фононного дизайна // ФТП. 2017. Т. 51. В. 4. С. 540–546.
 13. **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 // ФТП. 2018. Т. 52. В. 11. С. 1268–1273.
 14. **Хабибуллин Р. А., Щаврук 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 // ФТП. 2016. Т. 50. В. 10. С. 1395–1400 (2016).
 15. **Хабибуллин Р. А., Щаврук Н. В., Пономарев Д. С., Галиев Р. Р.** Способ изготовления воздушных мостов. Патент на изобретение № 2671287, приоритет изобретения 22 сентября 2017 г.
 16. **Долгов А. К., Глинский И. А., Маремьянин К. В., Пономарев Д. С., Хабибуллин Р. А.** Моделирование эффективности электрической накачки при неоднородном питании током квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона частот // Квантовая электроника. (В печати).
 17. **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 гетероструктур // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 7. С. 86–94.
 18. **Волков О. Ю., Дюжиков И. Н., Логунов М. В., Никитов С. А., Павловский В. В., Щаврук Н. В., Павлов А. Ю., Хабибуллин Р. А.** Исследование спектров терагерцового излучения в многослойных GaAs/AlGaAs гетероструктурах // Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 9. С. 981–985.
 19. **Lobanov Yu.V., Vakhtomin Yu.B., Pentin I.V., Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Smirnov K. V.** Characterization of the THz quantum cascade laser using fast superconducting hot electron bolometer // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 195. P. 04004.
 20. **Volkov O., Pavlovskiy V., Gundareva I., Khabibullin R., Divin Y.** In Situ Hilbert-Transform Spectral Analysis of Pulsed Terahertz Radiation of Quantum Cascade Lasers by High-Tc Josephson Junctions // IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology. 2021. DOI: 10.1109/THZ.2020.3034815.
 21. **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. Т. 49. № 10. С. 913–918.
 22. **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. Т. 48. № 11. С. 1005–1008.
 23. **Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Ponomarev D. S., Ushakov D. V., Afonenko A. A., Volkov O. Yu., Pavlovskiy V. V., Dubinov A. A.** Terahertz quantum cascade lasers with silver- and gold-based waveguides // EPJ Web of Conferences. 2018. V. 195. P. 04002.
 24. **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. 2018. International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2018. P. 1102204.
 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. V. 28. No. 17. PP. 25371–25382 (2020).

ООО
СМП




ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные
**для поверхностного
 монтажа**

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U.FL разъемы и pigtail со SMA



Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780