

# Портативный терагерцевый квантово-каскадный лазер

Артур ЛЕММИНГ  
Петр ШОСТАКОВСКИЙ

**В статье изложено решение задачи создания портативного лазерного излучателя терагерцевого диапазона частот с охлаждением чипа квантово-каскадного лазера до температуры 170 К. Приведены результаты испытаний, исследований.**

Терагерцевый (ТГц) диапазон частот электромагнитного излучения расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами. Он устраняет разрыв между микроволновым и инфракрасным (ИК) диапазонами и занимает интервал частот  $3 \times 10^{11}$ – $3 \times 10^{12}$  Гц (диапазон длин волн 1–0,1 мм). ТГц-излучение — не ионизирующее. Волны ТГц-излучения проникают сквозь диэлектрики, такие как бумага или пластик, отражаются от материалов со свободными электронами, например от металлов, и поглощаются молекулами с определенными уровнями вибрации в пределах ТГц-диапазона. Терагерцевая спектроскопия поглощения или отражения, получение изображений биологических и других объектов, ТГц-томография и спектроскопия ТГц-зондирования являются предметами обсуждения на научных конференциях, где поднимаются вопросы о возможности использования данного типа спектроскопии в таких областях, как промышленное производство, фармацевтика, наука. ТГц-диапазон частот (субмиллиметровый диапазон электромагнитных волн) начал активно развиваться с 60–70-х годов XX века, когда стали доступны первые источники и приемники такого излучения.

Приведем ряд привлекательных физических свойств терагерцевого диапазона:

- недостижимая в настоящее время скорость передачи данных на несущей частоте ТГц-диапазона;
- высокая точность радиолокационных исследований;
- относительная безопасность излучения для живых организмов;
- возможность создания приборов, видящих сквозь непрозрачные преграды;
- возможность идентифицировать вещества на расстоянии (взрывчатые вещества, вредные выбросы и др.).

Перечисленные свойства определяют перспективные области применения:

- исследование материалов;
- неразрушающий контроль;
- фармацевтическая промышленность;
- медицинская диагностическая техника;

- производство полупроводников;
- средства обеспечения безопасности;
- средства лазерной спектроскопии.

К недостаткам электромагнитного излучения ТГц-диапазона в первую очередь нужно отнести высокие затухания в атмосфере и зависимость от атмосферных явлений. Это становится ограничением при построении систем связи и радиолокации с дальностью свыше 1 км. Высокое затухание в атмосфере ставит под сомнение возможности спектроскопии на заметных расстояниях (десятки метров).

Однако преимущества ТГц-диапазона заставляют ученых и инженеров проводить исследования, разрабатывать прототипы будущих приборов и устройств.

Известные сегодня источники ТГц-волн вне зависимости от технологии построения обладают низкой энергетической эффективностью преобразования (<1%). Это в сочетании с малым размером самих устройств излучения определяет высокую плотность тока электрического питания и выделяемой тепловой мощности. Так, для получения непрерывного сигнала с мощностью 100 мВт необходимо обеспечить отвод тепла порядка 10 Вт.

Одним из наиболее перспективных направлений развития технологий ТГц-источников стали квантовые каскадные лазеры (ККЛ). Развитию этого направления уделялось большое внимание последние годы, о чем свидетельствует ряд публикаций отечественных и зарубежных авторов [1, 3, 6]. ККЛ по сравнению с другими источниками ТГц-диапазона обладают преимуществами лазерного излучателя — узкой направленностью когерентного излучения. Недостатком такого источника является необходимость охлаждать кристалл ККЛ до криогенных температур для получения когерентного луча узкой направленности. При этом от кристалла необходимо отводить значительное Джоулево тепло. Для решения этой задачи в лабораторных условиях применяются крупногабаритные криогенные установки и дорогостоящие криогенные холодильники Стирлинга (цены начинаются от десятков тысяч долларов).

Построение портативной системы ТГц-излучателя на основе ККЛ стало задачей для международного коллектива, в который вошли инженеры компаний eagleyard Photonics (Германия) и КРИОТЕРМ (Россия). Также в консорциум вошли научные специалисты германских университетов HUB и TU Wien. Проект получил наименование “COMTERA-Compact Cryogenic-Free Portable Terahertz Laser System” («Портативная лазерная система терагерцевого диапазона без криогенного охлаждения»).

Основой для принятия решения о начале работы по созданию портативной системы ТГц-излучателя послужило сотрудничество ученых берлинского университета HUB с инженерами компании КРИОТЕРМ по использованию многокаскадных термоэлектрических модулей (тепловых насосов) общепромышленного применения [4]. Полученные результаты тестирования позволили перейти к обсуждению создания специализированного термоэлектрического теплового насоса (ТТН) для решения задачи отвода тепла и охлаждения чипа ККЛ.

Преимуществом международного консорциума стал прямой доступ к лучшим ноу-хау в области термоэлектрического охлаждения, изготовлению термоэлектрической системы охлаждения на базе новейших достижений компании КРИОТЕРМ [5], изготовлению лазерных чипов ТГц-диапазона (HUB, TUW), а также прямой доступ к передовому опыту сборки системы и в будущем — к международному рынку через существующую маркетинговую сеть.

Сформулированы следующие технические требования к системе:

- диапазон частот: 2–6 ТГц;
- скважность импульсов: 1–10%;
- пиковая мощность: 100 мВт;
- длительность импульсов: 100–500 нс;
- размер корпуса: 100×80×60 мм;
- охлаждение чипа ККЛ до температуры: 170 К.

Ожидаемым результатом кооперативного проекта стала демонстрация сборки ТГц-лазера с охлаждением термоэлектрическим твердотельным тепловым насосом на эф-

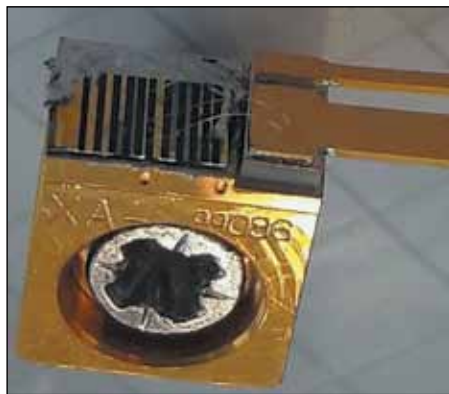


Рис. 1. Квантово-каскадный InGaAs-лазер ТГц-диапазона

фекте Пельтье. Для того чтобы компактный ТГц-лазер стал реальностью, требовалось обеспечить охлаждение тепловыделяющего полупроводникового устройства до температуры ниже  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  с помощью ТТН.

В качестве лазерного источника ТГц-диапазона использован InGaAs квантово-каскадный лазер (ККЛ) (InGaAs-THz-QCL). Для охлаждения был выбран полупроводниковый тепловой насос на эффекте Пельтье, разработанный и изготовленный с применением современных технологий и инноваций. Это позволило сделать большой шаг вперед по снижению габаритов системы охлаждения ККЛ, перейти к его портативной конструкции.

В процессе выполнения проекта кристаллы ККЛ (рис. 1) были произведены TU Wien на современном оборудовании эпитаксии InGaAs, подробная информация о конструкции THz QCL описана в [2]. Инженеры берлинского университета Гумбольдта снабдили чипы ККЛ проводниками.

Геометрические размеры чипа ККЛ, а также ширина волновода имеют прямое влияние на потребляемую мощность и потери тепла. Одной из промежуточных задач стал баланс между потерей тепла и выходной мощностью лазера.

Для снижения тепловыделения были применены материалы с трудновыполнимыми ограничениями:

- устойчивость материалов к воздействию широкого интервала температур от комнатной до 170 К;
- хорошая теплопроводность компонентов, а также их соединений;
- совместимость коэффициентов теплового расширения элементов конструкции;
- специальные материалы соединений элементов конструкции, обеспечивающие компенсацию различающихся коэффициентов теплового расширения элементов;
- сведение к минимуму тепловых потерь конструкции.

В результате оценок и предварительных расчетов тепловых потерь выяснилось, что суммарный тепловой поток от ТТН невозможно отвести в окружающую среду с по-

мощью непосредственного воздушного охлаждения. Более эффективное охлаждение кристалла ККЛ и отведение тепла от ТТН требовали применения компактного жидкостного охлаждения, способного поддерживать температуру основания корпуса конструкции на уровне комнатной.

Наибольшую часть объема устройства COMTERA занимает ТТН, разработанный специально для данного проекта компанией КРИОТЕРМ. Минимизация размеров и оптимизация соотношений сторон теплового насоса позволили спроектировать и создать корпус с минимальными размерами и следующими особенностями:

- для снижения тепловых потерь и предотвращения конденсации влаги корпус выполнен с возможностью вакуумирования;
- применены вакуумные электрические вводы для подключения лазера, ТТН, датчиков;
- предусмотрена возможность многократного применения корпуса с заменой датчиков, лазера, ТТН, окна;
- подобраны и протестированы материалы, которые обеспечивают длительную устойчивую работу устройства без постоянного функционирования вакуумного насоса.

Отдельно следует остановиться на создании новейшего ТТН, обеспечившего успех проекта. Перед началом работы был проведен анализ доступных ТТН на мировом рынке, показавший отсутствие подобных решений в промышленном выпуске. Разработка новой конструкции ТТН была выполнена с учетом требований достижения температуры 170 К при работающем ККЛ. Были рассмотрены различные варианты конструкции, отличающиеся числом каскадов охладителя, холодильной мощностью каждого каскада, техническими возможностями отвода тепла с горячей стороны ТТН. Отдельной задачей, определявшей успех разработки, стало создание специального термоэлектрического вещества, имеющего максимальную эф-

фективность на низких температурах, при которых эксплуатируются верхние каскады ТТН. Специальные конструкторские решения разработаны для компенсации различных по величине тепловых коэффициентов расширения элементов конструкции ТТН (термоэлектрических элементов, керамических подложек, токопроводящих элементов, припоев и др.).

В результате проведенных работ создан пятикаскадный ТТН, получивший обозначение ТВ-5-(198-95-43-20-10)-1.4-1.2 [7] с габаритными размерами: высота 36 мм, основание  $89 \times 81$  мм. На базе конструктивной модификации данного ТТН создана сборка на основании (рис. 2). Была разработана и согласована участниками соответствующая требованиям конструкция устройства COMTERA (рис. 3), что позволило перейти к заключительному этапу. Компактность и мобильность системы COMTERA являются инновациями, достигнутыми в ходе реализации проекта.

Перед началом изготовления для достижения устойчивой работы при температурах, необходимых для функционирования ККЛ, все компоненты конструкции потребовали независимого тестирования при температуре 170 К в пределах регламентов спецификации. Необходимость испытания отдельных компонентов конструкции на криогенном испытательном стенде во время сборки усложнили работы, однако это позволило приблизиться к требуемому результату по надежности (долговечности).

На первых образцах была получена разность температур порядка 100 К. Поставленная цель охладить чип ККЛ до 170 К была достигнута только после принятия ряда мер:

- улучшения тепловой изоляции корпуса;
- оптимизации потока рабочей жидкости через охладитель ТТН;
- повышения эффективности охлаждения рабочей жидкости.

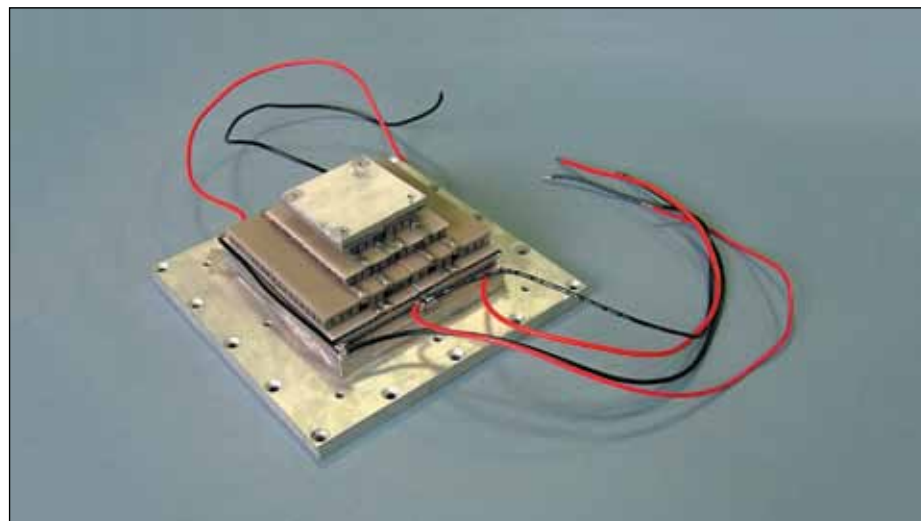


Рис. 2. Пятикаскадный термоэлектрический тепловой насос

Указанные меры позволили достичь отличного результата. Первые испытания оптимизированной конструкции показали возможность достижения низких температур охлаждения чипа ККЛ до  $-96,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 4).

Дальнейшие работы были направлены на оптимизацию крепления чипа ККЛ, повышение эффективности теплопередачи от него к ТТН, снижение потерь из-за натекания тепла к чипу через элементы конструкции. Это позволило достичь важного снижения температуры чипа еще на 3 К.

Оптимизация параметров элементов системы тестирования, включая блоки питания, измерительные приборы, режимы работы ТТН, позволили устойчиво воспроизводить охлаждение чипа до заданной температуры 170 К ( $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Были проведены длительные испытания на устойчивость непрерывной работы (свыше 60 ч). Авторам статьи неизвестны подобные результаты термоэлектрического охлаждения электронного устройства в значительном по размерам корпусе с пассивной тепловой нагрузкой.

В подготовленном в феврале 2019 года заключительном отчете компании eagleyard Photonics приведены результаты по обнаружению и идентификации различных газов.

Описывается работа ТГц QCL ( $F = 3,9\text{ ТГц}$ ) при  $T = -102\text{ }^{\circ}\text{C}$ , охлаждаемого пятикаскадным ТТН (элементом Пельтье), в корпусе Eagleyard Photonics COMTERA и демонстрируется обнаружение различных газов (аммиак, метанол, этанол, изопропанол, ацетон и водяные пары).

Характеристики ККЛ измерялись в импульсном режиме с предварительной выдержкой чипа ККЛ при самой низкой температуре ТТН 170 К (без тепловой нагрузки). Скважность сигнала изменялась от 2 до 10%. Длительность импульса поддерживалась постоянной, равной 250 нс. При скажности 2% повышение температуры теплоотвода в процессе эксплуатации было незначительным, (в пределах 1 К, то есть температура теплоотвода в процессе эксплуатации была почти постоянной, равной 171 К). При большей скажности сигнала температура радиатора значительно возрастала. Максимальная

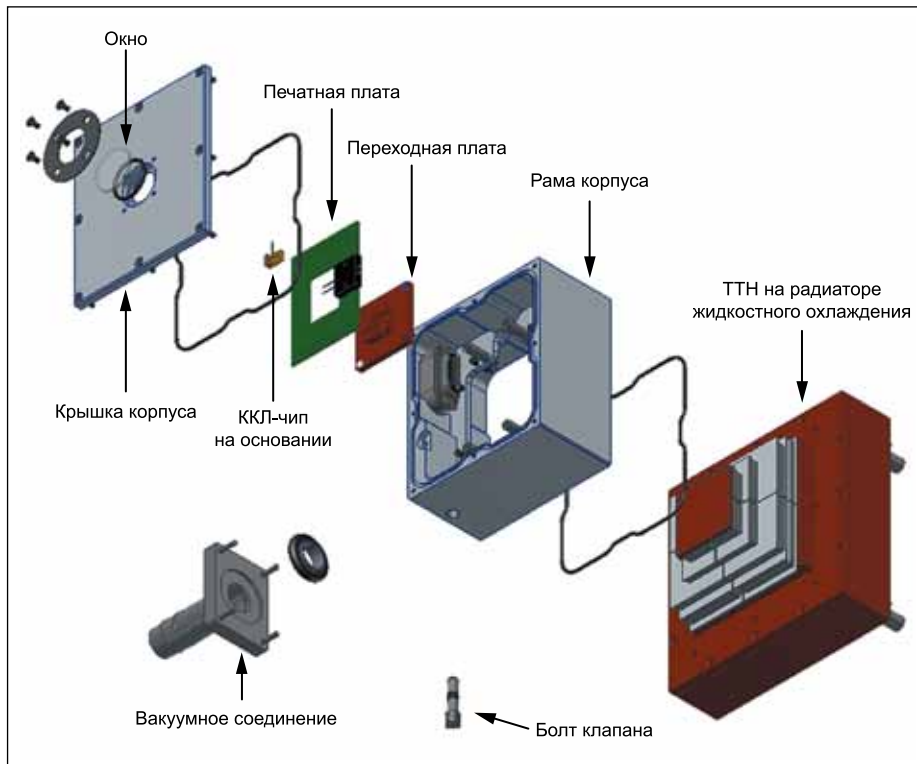


Рис. 3. Основные элементы конструкции устройства COMTERA

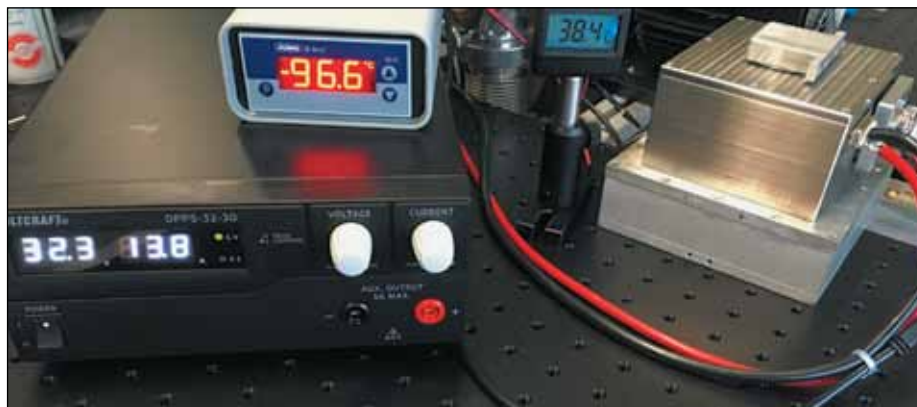


Рис. 4. Устройство COMTERA в процессе испытаний

импульсная мощность составила 5 мВт при 171 К и при токе питания 2 А.

При скажности сигнала 2% проведена демонстрация абсорбции различных газов ТГц-излучения. ■

### Литература

1. Khabibullin R. A., Shchavruk N. V., Pavlov A. Yu., Klochkov A. N., Ponomarev D. S., Glinskiy I. A., Maltsev P. P. Terahertz Quantum-Cascade Laser Based on the Resonant-Phonon Depopulation Scheme // *Fundamental and Applied Problems of Terahertz Devices and Technologies*. 2017. May.
2. Kainz M. et al. High-Power Growth-Robust InGaAs/InAlAs Terahertz Quantum Cascade Lasers Brandstetter // *ACS Photonics*. 2018. No. 5.
3. Zederbauer T. M., Kainz M. A., Krall M., Schönhuber S., Detz H., Schrenk W., Andrews A. M.,

Strasser G., Unterrainer K. InAs Based Terahertz Quantum Cascade Lasers // *Appl. Phys. Lett.* 2016. No. 108.

4. Иоффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Иорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. АН СССР, 1956.
5. Шостаковский П. Г. Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы KRYOTHERM // *Компоненты и технологии*. 2010. № 8, 9.
6. 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., Алферов Ж. И. Генерация терагерцового излучения в многослойных квантово-каскадных гетероструктурах // *Письма в ЖТФ*. 2017. Т. 43. Вып. 7.
7. [www.kryotherm.ru](http://www.kryotherm.ru)