

УДК 535.14; 538.911

ИЗУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТГЦ КВАНТОВЫХ КАСКАДНЫХ ЛАЗЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТОГО ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

В. А. Анфертьев¹, В. Л. Вакс¹, А. И. Реутов², А. Н. Баранов³, R. Teissier³

¹ Институт физики микроструктур РАН, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

² Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского

³ Institute of Electronics and Systems, University of Montpellier, France

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2018 г.

Аннотация. В настоящее время одним из бурно развивающихся направлений ТГц техники является построение и изучение квантовых каскадных лазеров. В работе изучены частотные характеристики импульсных ТГц квантовых каскадных лазеров на основе материалов GaAlAs/GaAs с резонансно-фононным дизайном на основе трех квантовых ям с поверхностно плазмонным волноводом с помощью приемника на диоде Шоттки и открытого оптического резонатора. Определен оптимальный режим питания (длина импульса и ток) для получения одномодового режима. Показано, что с помощью открытого резонатора с известными характеристиками можно оценить частоту лазера (без использования Фурье спектрометра) а также определить скорость, направление и величину перестройки по частоте. Разработанный стенд для измерения параметров лазеров позволяет также изучать многомодовое поведение лазера, в частности, получен режим, где наблюдаются две моды с различными механизмами, скоростями и направлениями перестройки (электронная перестройка, тепловая перестройка). Определение этих важных характеристик необходимо в дальнейшем для использования лазера как для построения импульсного источника с частотной гребенкой, так и для применения образца для целей спектроскопии.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон частот, квантовый каскадный лазер, открытый оптический резонатор, динамическая перестройка.

Abstract. To date, one of the rapidly developing areas of the THz technology is the development and studying of quantum cascade lasers structures. In this paper, we studied the frequency dynamic characteristics of pulsed THz quantum cascade lasers based on GaAlAs / GaAs materials with design based on the three-well resonant phonon scheme with a surface-plasmon waveguide. We use a Schottky receiver and an open optical resonator. The optimal power mode (pulse length and pulse current) for the single mode laser regime has been determined. With using the open resonator with known characteristics we estimated the laser central frequency (without using a Fourier transform spectrometer) and also determine the speed, direction and magnitude of the tuning in frequency. The experimental setup developed also makes it possible to study the multimode behavior of a laser, in particular, a regime has been obtained where two modes with different mechanisms, velocities and directions of tuning are observed (electronic tuning, thermal tuning). The determination of these important characteristics is necessary to use the laser for development the THz frequency comb source or using the sample for spectroscopy purposes.

Key words: terahertz frequency range, quantum cascade laser, open resonator, frequency sweep.

1. Введение

В настоящее время большое значение приобретает анализ многокомпонентных газовых смесей различного происхождения с высокой чувствительностью [1,2]. Среди многообразия аппаратных методов анализа наиболее перспективными оказываются спектроскопические методы, в том числе спектроскопия терагерцового диапазона (ТГц) частот. В этом диапазоне новые возможности для спектроскопии высокого разрешения появились с разработкой и созданием семейства источников когерентного излучения на основе квантовых каскадных лазеров (ККЛ) [3].

Для спектроскопии интерес представляет перестройка ККЛ по частоте, мощность, работа в пределах одной моды, возможность работы в непрерывном режиме генерации. Наиболее подходящими для целей спектроскопии являются

ККЛ, могущие работать в непрерывном режиме. Для них есть возможность введения обратной связи по фазе генерируемых колебаний и стабилизации частоты (фазовая автоподстройка частоты). Однако изготовление лазера, работающего в непрерывном режиме, является трудоемкой задачей и под силу не всем технологическим группам. Кроме того, использование непрерывного ККЛ требует наличия криостата замкнутого цикла, имеющего большую хладопроизводительность.

Импульсные ТГц ККЛ могут быть использованы в ряде задач, однако изучение их частотных характеристик, как правило, затруднено из-за быстрой перестройки по широкому диапазону частот. В работе проведено изучение ТГц квантовых каскадных лазеров в импульсном режиме работы с оценкой несущей частоты и перестройки лазера с помощью оптического резонатора.

2. Описание эксперимента

Используемый в эксперименте ККЛ изготовлен группой А.Н. Баранова (Institute of Electronics and Systems, University of Montpellier, France). ККЛ имеет структуру с периодом, состоящим из трех квантовых ям, с резонансно-фононной схемой, аналогичной той, что использовалась в [4]. Активная зона на основе материалов GaAlAs / GaAs прибора состояла из 300 периодов. Структура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии с помощью установки RIBER 412 на нелегированной (100) подложке GaAs.

Чип ККЛ устанавливается на медном держателе в криостате замкнутого цикла (гелиевый рефрижератор типа Гиффорда-Мак-Магона), минимальная температура без нагрузки около 4 К. На медную охлаждаемую плиту устанавливается держатель с образцом и коллимирующее внеосевое параболическое зеркало, фокусное расстояние которого составляет 50 мм. Зеркало превращает расходящийся пучок ККЛ в параллельный, который выходит из окна криостата. Юстировка зеркала производится по видимому параллельному лучу. Питание образцов ККЛ осуществляется с помощью импульсного источника питания, состоящего из источника регулируемого

напряжения, управляющего импульсного генератора и формирователя импульсов. Последний формирует импульсы заданного источником питания напряжения с длительностью, заданной генератором. Как правило, в подобных работах с импульсными ККЛ используются импульсные источники тока, однако исследуемые образцы имеют большое токопотребление для генерации (5-6А), и создание импульсного источника тока, обеспечивающего на заданных токах требуемое быстродействие, в данном случае является нетривиальной задачей. Излучение лазера принимается на детектор на основе диодов Шоттки. Детектор имеет гораздо меньшую чувствительность, чем традиционно используемые приемники (например, ячейка Голея), порядка десятков В/Ватт, однако имеет достаточное быстродействие (полоса предусилителя детектора порядка 50 МГц) для временного разрешения быстрых изменений мощности генерации ККЛ как вследствие его собственного разогрева, так и вследствие пропускания излучения через резонатор. После детектора стоит усилитель, усилением 30 дБ, полосой 30 МГц. Усиленный сигнал с детектора регистрируется осциллографом, также на осциллограф поступают импульсы напряжения с измерительного токового шунта формирователя импульсов, по которым можно измерять мгновенный импульсный ток через образец. Запуск развертки осциллографа осуществляется сигналом с генератора импульсов.

Между окном криостата замкнутого цикла и детектором помещается оптический резонатор типа Фабри-Перо, состоящий из двух зеркал. Одно зеркало плоское и жестко закрепленное, другое конфокальное и подвижное с помощью микрометрического винта. Возбуждение резонатора осуществляется с помощью делителя луча, расположенного между зеркалами.

В такой конфигурации резонатор работает как режекторный фильтр, т.е. на резонансной частоте уменьшается интенсивность проходящего через делитель луча излучения. Расстояние между основными резонансами частот резонатора (целое число полуволн между зеркалами) составляет около 530 МГц. Однако каждому основному резонансу соответствует ряд собственных мод резонатора,

количество которых зависит от конфигурации резонатора (положение резонатора, положение в резонаторе и наклон делителя луча и т.п.).

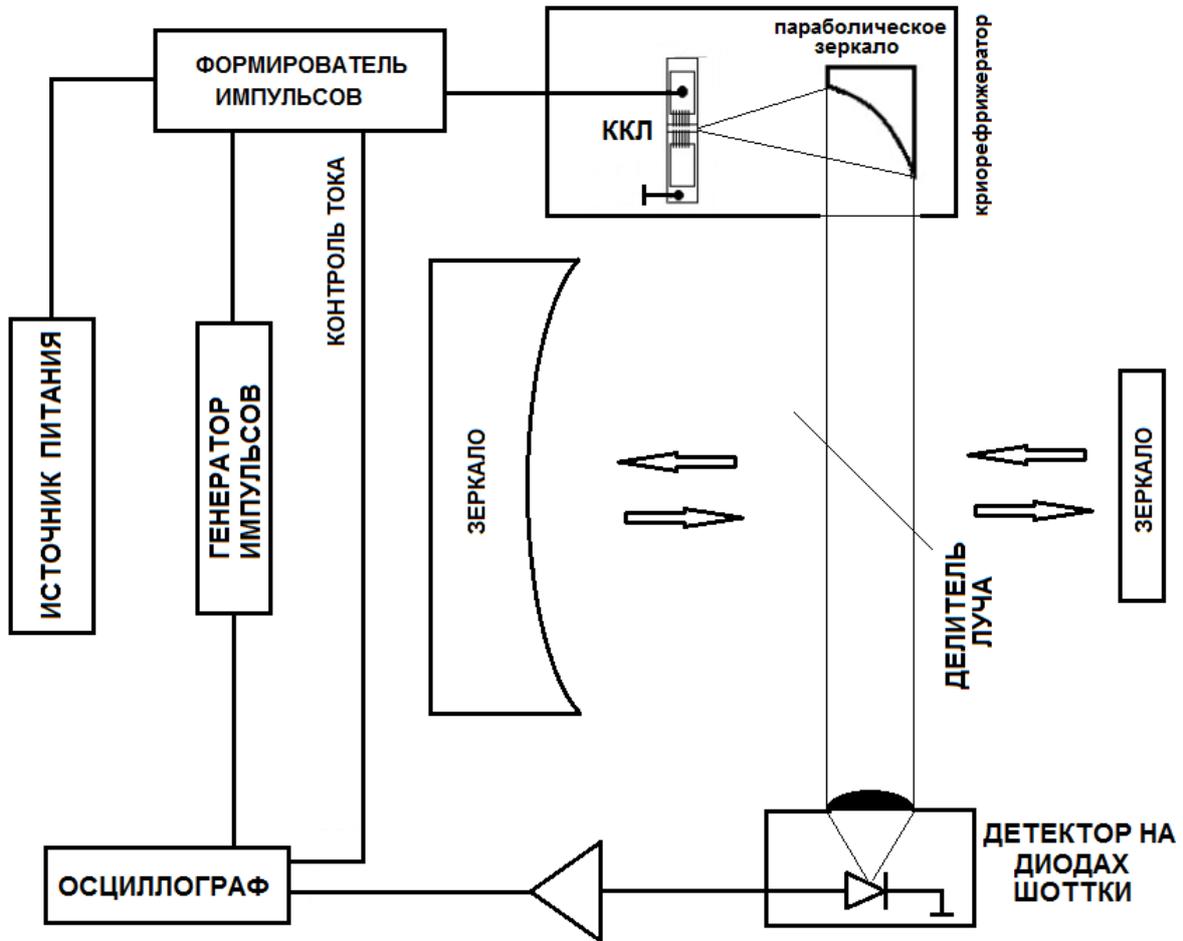


Рис. 1 Блок-схема экспериментальной установки

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

У исследуемых образцов ККЛ не имеется механизмов селекции определенной моды, т.е. это лазер с Фабри-Перо резонатором, зеркалами для которого являются сколы структуры с торцов. Это значит, что в процессе работы в течение импульса при разогреве структуры может меняться не только частота и мощность для одной моды, но и возможно переключение на другую моду (Рис. 2,3). На рис. 2,3 для сравнения сигнала и тока оба графика приведены по максимуму к единице, частота повторения импульсов составляет 10кГц (период 100мкс). Либо же возможна такая ситуация, где от импульса к импульсу возникает то одна, то другая мода излучения ККЛ. Поэтому для

изучения частотной перестройки и частоты генерации ККЛ следует выбирать такие режимы питания, где излучает преимущественно одна мода. Для изучаемых образцов этот режим питания определяется во-первых, напряжением питания до отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ ККЛ и, во-вторых, импульсами питания от 3 до 5 мкс для частоты повторения импульсов 10кГц. Возможным объяснением стабильности работы при удлинённых импульсах питания является меньший дрейф температуры от импульса к импульсу. Однако видно (рис. 2,3), что при питании напряжением ток потребления ККЛ в процессе его разогрева относительно быстро растёт.

В оптимальном режиме ищется такое положение резонатора, в котором у отклика детектора от проходящего через резонатор излучения ККЛ наблюдаются провалы, соответствующие резонансам.

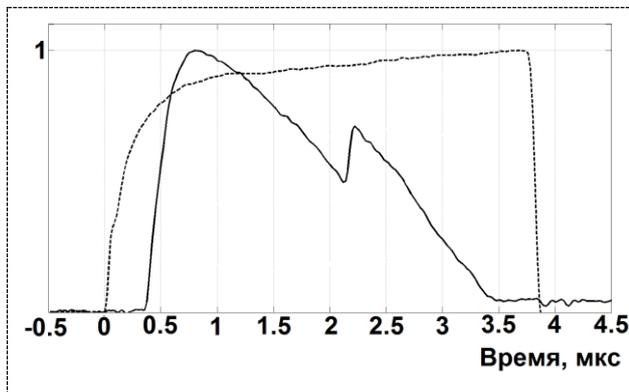


Рис. 2. Сигнал ККЛ (сплошная линия) и ток ККЛ (пунктир). Максимальное значение тока составляет около 6.2А

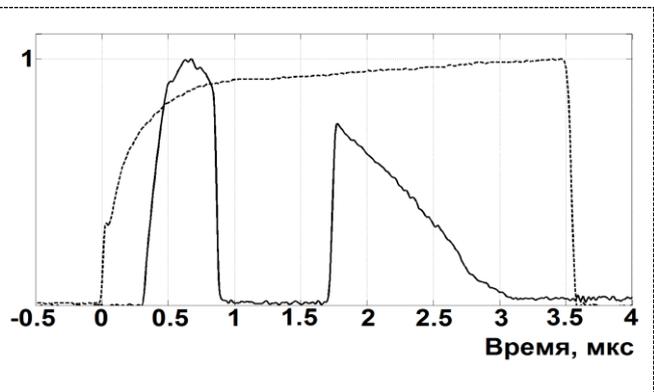


Рис. 3. Сигнал ККЛ (сплошная линия) и ток ККЛ (пунктир). Максимальное значение тока составляет около 6.3А.

Сигналы с детектора, принимаемые от ККЛ, излучение которого проходит через резонатор (и напрямую без него), для разных токов представлены на рис. 4,5. При этом можно оценить перестройку лазера и его центральную частоту следующим образом. Из предварительных измерений на Фурье-спектрометре известно примерное расположение основных мод ККЛ. Для исследуемого образца имеется 6 мод, расположенных от 3.7 до 3.9 ТГц. Далее изменяя расстояние между зеркалами резонатора, определяем смещение зеркала, при котором картинка резонансных откликов (рис. 5,6) повторится.

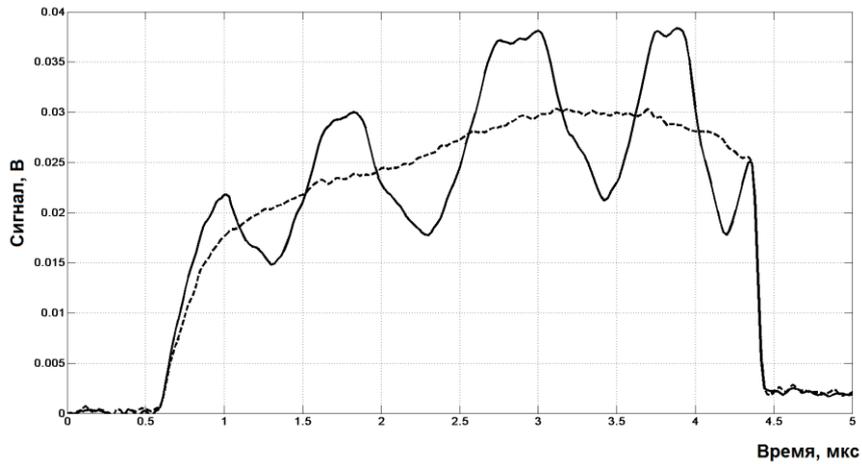


Рис. 4 Сигнал ККЛ без резонатора (пунктир, сигнал ККЛ с резонатором (сплошная). Ток ККЛ 4,9 А.

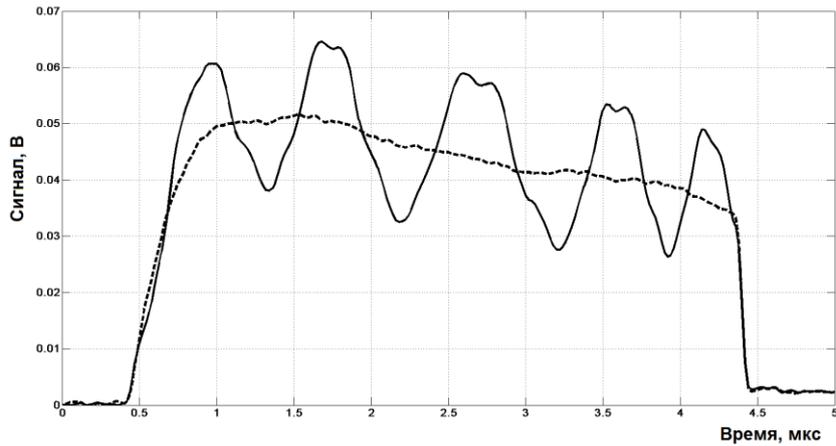


Рис. 5 Сигнал ККЛ без резонатора (пунктир, сигнал ККЛ с резонатором (сплошная). Ток ККЛ 5,4 А.

Если резонатор настроен таким образом, что на любом из зеркал имеется одно «пятно» в поперечном распределении поля, и считая, что ККЛ имеет линейную поляризацию (электрическое поле волны ККЛ параллельно приложенному к структуре внешнему электрическому полю), то можно считать, что между основными резонансными частотами, соответствующими целому числу полуволн между зеркалами, не имеется дополнительных мод. Тогда резонансные частоты даются приближенно следующим выражением:

$$f_m = \frac{mc}{2nd}, \quad (1)$$

где m – число полуволн, укладывающихся на длину резонатора, c – скорость света, d – расстояние между зеркалами, n – показатель преломления среды.

Согласно (1), спектр резонатора эквидистантный. При перемещении зеркала на расстояние $\xi \ll d$, такое что

$$f_{m+1}(d + \xi) = f_m(d), \quad (2)$$

из (2), зная ξ , можно получить число полуволн m , откуда, зная расстояние между зеркалами, можно оценить центральную частоту генерации ККЛ. Получившаяся таким образом частота составила 3.785 ТГц, что не противоречит предварительным измерениям на Фурье спектрометре. Далее, зная количество провалов и расстояние по частоте между ними, можно оценить импульсную перестройку ККЛ. Она составляет порядка 1.6 ГГц за время порядка 3-4 мкс.

Однако далеко не всегда удастся получить отклики только основных резонансов открытого резонатора. В таком случае измерение частоты, описанное выше, дает значения, кратные измеряемой частоте. Для другого положения резонатора (отклик представлен на рис. 6) и описанный метод измерения дает удвоенное значение 3.766 ТГц.

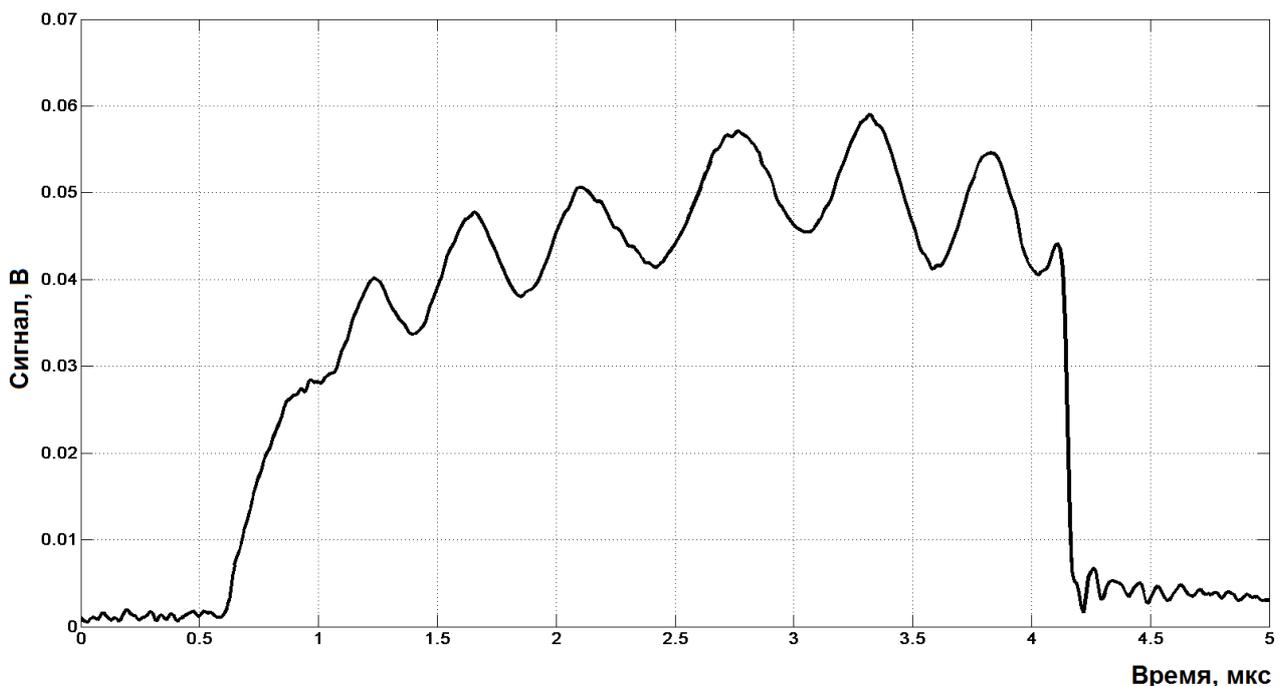


Рис. 6 Сигнал ККЛ с резонатором. Ток ККЛ 4,5 А.

Также в эксперименте удалось определить направление перестройки частоты лазера по направлению движения провалов на осциллограмме при

заданном направлении перемещения зеркала. В одномодовом режиме перестройка происходит со сдвигом частоты вниз.

4. Заключение

Разработанные методики выращивания ККЛ, а также развитые физические принципы создания новых источников излучения на их основе позволят обеспечить прорыв в освоении ранее недоступной области ТГц частотного диапазона. Создание метода спектроскопии высокого разрешения субТГц, ТГц диапазонов позволит существенно расширить возможности аналитической спектроскопии, повысить достоверность анализа, исследовать одновременно вращательные, колебательные и колебательно-вращательные спектры молекул. В работе продемонстрирован метод определения центральной частоты и перестройки ТГц ККЛ с использованием высокодобротного оптического резонатора.

Работа выполнена в рамках выполнения госзадания по теме 0035-2014-0206 и при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 18-52-16017 НЦНИЛ_а) и Программы Президиума РАН №9 «ТГц оптоэлектроника и спинтроника».

Литература

1. Mukhin A.A., Ivanov V.Yu., Travkin V.D., Prokhorov A.S., Volkov A.A., Pimenov A.V., Shuvaev A.M., Loidl A., Terahertz spectroscopy and the magnetoelectric properties of manganite-based multiferroicsю *Physics-Uspekhi*, 2009, Vol. 52, No. 8, pp. 851–856.
2. Vaks V.L., Domracheva E.G., Sobakinskaya E.A., Chernyaeva M.B. Exhaled breath analysis: physical methods, instruments, and medical diagnostics. *Physics – Uspekhi*, 2014, Vol. 57, No. 7, pp. 684-701.
3. Köhler R., Tredicucci A., Beltram F. et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser. *Nature*, 2002, Vol. 417, Issue. 2, p. 156.

4. Kumar S., Hu Q., Reno J.L. 186 K operation of terahertz quantum-cascade lasers based on a diagonal design. *Appl. Phys. Lett.* 2009, Vol. 94, p. 131105.

Для цитирования:

В. А. Анфертьев, В. Л. Вакс, А. И. Реутов, А. Н. Баранов, R. Teissier. Изучение частотных характеристик ТГц квантовых каскадных лазеров с использованием открытого оптического резонатора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/5/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.5