

09

## Перестраиваемый инфракрасный квантово-каскадный лазер спектрального диапазона 9.6–12.5 $\mu\text{m}$

© Д.Р. Анфимов, И.С. Голяк, П.П. Демкин, Е.Н. Задорожный, И.Б. Винтайкин, А.Н. Морозов, И.Л. Фуфурин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
105005 Москва, Россия  
e-mail: dimananfimov97@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 января 2024 г.

В окончательной редакции 26 января 2024 г.

Принято к публикации 26 января 2024 г.

Представлен перестраиваемый импульсный квантово-каскадный лазер спектрального диапазона 9.6–12.5  $\mu\text{m}$ , излучающий с максимальной мощностью в импульсе 199.8 mW и максимальной средней мощностью 7.57 mW, с шагом перестройки  $2\text{ cm}^{-1}$  и шириной спектральной линии  $2\text{ cm}^{-1}$ . Описана принципиальная схема квантово-каскадного лазера, основные составные элементы и их технические характеристики. Описана экспериментальная установка, предназначенная для газовой абсорбционной инфракрасной спектроскопии, состоящая из квантово-каскадного лазера, многоходовой кюветы Эрриота с длиной оптического пути 76 м и двух кадмий-ртуть-теллурических фотоприемников с термоэлектрическим охлаждением. Приведены результаты измерения спектров пропускания смеси ацетона в азоте с массовой концентрацией 100 ppm.

**Ключевые слова:** квантово-каскадный лазер, кювета Эрриота, схема Литтрова, газовая абсорбционная спектроскопия, сверхрешетка, квантовая яма.

DOI: 10.61011/JTF.2024.03.57388.19-24

### Введение

Квантово-каскадный лазер (ККЛ) представляет собой униполярный лазер, излучающий преимущественно в инфракрасном (ИК) или терагерцовом диапазоне за счет перехода электрона между энергетическими уровнями в квантовых ямах в зоне проводимости внутри активной области [1]. Активная область представляет собой полупроводниковую гетероструктуру (сверхрешетку), в которой чередуются между собой потенциальные барьеры, например из InAlAs, и квантовые ямы, например из InGaAs [2,3]. Современные методы выращивания гетероструктур, такие, как молекулярно-лучевая эпитаксия, позволяют создавать произвольные структуры для конкретного применения [4].

ККЛ обладают высокой средней мощностью излучения при комнатной температуре; широким диапазоном перестройки (более  $900\text{ cm}^{-1}$ ) с шагом перестройки не более  $1\text{ cm}^{-1}$ , высокой энергоэффективностью (КПД  $> 10\%$ ), компактностью, надежностью, стабильностью [5]. Все перечисленные свойства позволяют использовать ККЛ в компактных устройствах. Существуют различные конструкции резонатора ККЛ, такие, как ККЛ Фабри–Перо, которые являются многомодовыми и в то же время имеют более высокую мощность выходного излучения [6], ККЛ с распределенной обратной связью (DFB) для возможности работы в одномодовом режиме [7] и ККЛ с внешним резонатором (ЕС) [8], где селекция длины волны, как правило, осуществляется при помощи внешней дифракционной решетки (конфигурация Литтрова).

ККЛ могут быть применены при создании технических средств для решения широкого спектра прикладных задач в области спектроскопии, безопасности, экологии и биомедицины [9]. Активное применение ККЛ с широким диапазоном перестройки представлено компанией Block Engineering. Данная компания представляет на рынке устройства, состоящие из нескольких ККЛ „mini-QCL“, покрывающих различные спектральные диапазоны, которые представляют собой компактные модули размером в 1 кубический дюйм и весом 75 g. Ширина диапазона перестройки составляет более  $1100\text{ cm}^{-1}$  со средней выходной мощностью от 0.5 до 15 mW [10].

В источниках [11,12] представлены результаты по идентификации различных химических и взрывчатых соединений [13] с помощью спектроскопии диффузного рассеяния. Вещество расположено на различных подложках как естественных, так и искусственных, в твердом или жидком состоянии. Излучение лазера в диапазоне 5–12  $\mu\text{m}$  падает на вещество. При помощи собирающих линз излучение, рассеянное веществом и подложкой, собирается на кадмий-ртуть-теллурическом (КРТ) фотоприемнике, охлаждаемом каскадом элементов Пельтье. Затем происходит идентификация веществ по спектру рассеяния [14,15].

В работах [16–19] представлены результаты обнаружения следовых количеств различных химических веществ, в том числе и взрывчатых, с использованием ККЛ с внешним резонатором в диапазоне 7.7–11.8  $\mu\text{m}$ . Излучение перемещается по плоскости, и с помощью ИК камеры с пространственным разрешением 70  $\mu\text{m}$

снимается гиперкуб размером  $128 \times 128$  пикселей и глубиной 130 длин волн. Благодаря высокоскоростной камере гиперкуб снимается за 0.1 s. На расстоянии 5 m были обнаружены  $100 \mu\text{g}$  кофеина [16],  $100 \mu\text{g}$  сахара на расстоянии 25 m и следовые количества пентаэритриттетранитрата на расстоянии 0.1 m [19]. Пределы обнаружения [17] для пентаэритриттетранитрата составили 6 ng на пиксель. В работе [18] представлены математические методы моделирования гиперкубов, которые могут быть использованы для отработки алгоритмов идентификации. В работах [10,20] представлены результаты идентификации биологических объектов на различных поверхностях, что демонстрирует возможность создания прибора биологической защиты на основе ККЛ.

С помощью спектроскопии диффузного рассеяния проводятся исследования биологических тканей. Это может помочь как в развитии неинвазивных методов анализа раковых клеток внутри организма человека [21,22], так и для исследования поражений кожи [23].

Также существует множество работ по исследованию глюкозы в крови человека *in-vivo* с помощью ККЛ [24]. Для этой цели используются различные конфигурации ККЛ. С помощью лазера с распределенной обратной связью на волновом числе  $1031 \text{ cm}^{-1}$  с мощностью 1 mW и длительностью импульса 50 ns методом волоконной лазерной спектроскопии было получено стандартное отклонение концентрации глюкозы в  $17.5 \text{ mg/dl}$  по сравнению с измерениями глюкозы *in vitro* [25]. С использованием лазера с внешним резонатором в диапазоне  $890\text{--}2020 \text{ cm}^{-1}$  с пиковой мощностью 500 mW и длительностью импульса 400 ns была получена ошибка измерения в  $20 \text{ mg/dl}$  [26].

Одним из распространенных методов исследования белковых реакций на атомном уровне является инфракрасная спектроскопия. Появление ККЛ позволяет осуществлять быстрый мониторинг реакции в микросекундной временной области, чего нельзя было достичь с помощью фурье-спектрометров [27]. Также ККЛ обладают более высокой плотностью мощности, что позволяет исследовать широкие белковые слои [28].

Особый интерес представляют мощные лазеры (мощностью от 1 W). Существуют разработки ККЛ на длине волны около  $8 \mu\text{m}$ , представленные в работах [29,30], а также на длине волны около  $8.5 \mu\text{m}$  [31].

В настоящее время одним из самых эффективных методов идентификации газов вдоль протяженных трасс являются фурье-спектрометры с использованием инфракрасной подсветки, которые могут быть применены как средства обеспечения безопасности на объектах с большим количеством людей или на производствах [32,33]. В качестве альтернативы в работе [34] представлены результаты по идентификации фреона, распыленного на трассе протяженностью 310 и 562 m с помощью ККЛ. В отличие от широкополосных глобальных лазерных лучей имеет малую расходимость, что позволяет с помощью

системы отражателей реализовать абсолютно произвольное движение луча внутри какого-либо объекта для повышения качества мониторинга химической загрязненности по сравнению с фурье-спектрометрами.

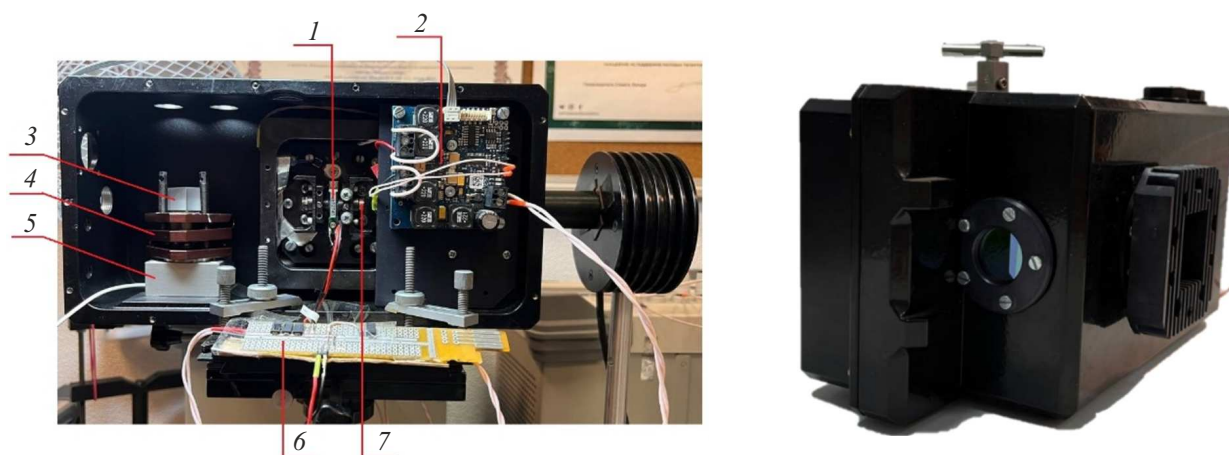
ККЛ позволяют идентифицировать малое количество вещества (единицы ppb) в широком спектральном диапазоне, от которого зависит количество идентифицируемых веществ. Например, в работе [35] представлены результаты идентификации 22 ppm ацетона и 60 ppm этанола в кювете размером 32.4 cm и протяженностью оптического пути 54.36 m. В работе [36] в газовой кювете с длиной оптического пути 76 m с помощью методов машинного и глубокого обучения были идентифицированы 80 ppb ацетона и 100–120 ppb этанола и метанола. Также представлены результаты по идентификации многокомпонентных смесей. Подобного рода установки могут быть использованы в задачах экологии для локального определения концентрации парниковых газов, таких, как CO, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O и SO<sub>2</sub> [37–39]. ККЛ также применяются для идентификации микропластика в воде [40].

В работе [41] представлены результаты по измерению концентрации ацетона в выдыхаемом воздухе у пациентов с диабетом 1-го типа. Концентрации данного вещества крайне малы (десятки ppb), но в экспериментальных установках с использованием многоходовой кюветы [42,43] представляется возможным определение различных заболеваний благодаря широкому спектру излучения ККЛ и применению современных методов обработки сигналов [44–46].

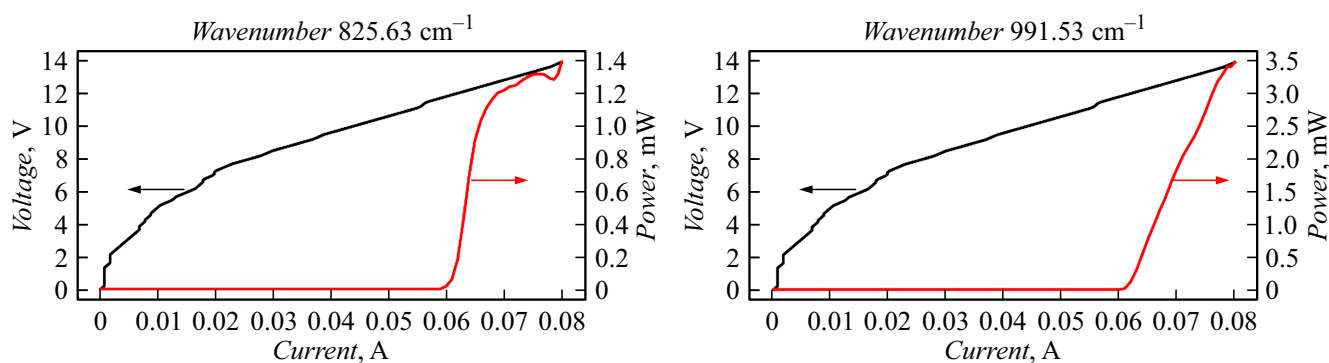
В настоящей работе представлена схема и технические характеристики разработанного ККЛ в диапазоне от 9.6 до  $12.5 \mu\text{m}$  на основе схемы с внешним резонатором (схема Литтрова), что позволяет добиться широкого диапазона перестройки. Представлены результаты использования ККЛ в экспериментальной установке для лазерной ИК абсорбционной спектроскопии газовых смесей.

## 1. Конструкция ИК ККЛ

На рис. 1 представлен внешний вид разработанного перестраиваемого ККЛ. Внутри корпуса ККЛ располагается чип ККЛ с собственным теплоотводом (Alpes Lasers, Швейцария), излучающий в диапазоне  $9.6\text{--}12.5 \mu\text{m}$  1. Внешний резонатор содержит в себе две асферические линзы 7, расположенные по обе стороны волновода, с показателем преломления  $2.604 \pm 0.003$  и эффективным фокусным расстоянием  $1.87 \pm 0.01 \text{ mm}$ . Внешний резонатор построен по схеме Литтрова с применением дифракционной решетки 3, рабочий диапазон которой от 9 до  $11 \mu\text{m}$ . Отражающая дифракционная решетка имеет 150 штрихов на mm и дисперсию  $4.2 \text{ nm/mrad}$  (Thorlabs, США). Дифракционная решетка расположена на наклонной платформе 4, закрепленной на поворотном двигателе с оптическим энкодером 5.



**Рис. 1.** Внешний вид ККЛ. 1 — чип ККЛ; 2 — термоэлектрический контроллер для управления элементом Пельтье; 3 — дифракционная решетка; 4 — наклонная платформа; 5 — поворотный двигатель; 6 — плата управления чипом ККЛ; 7 — асферическая линза.

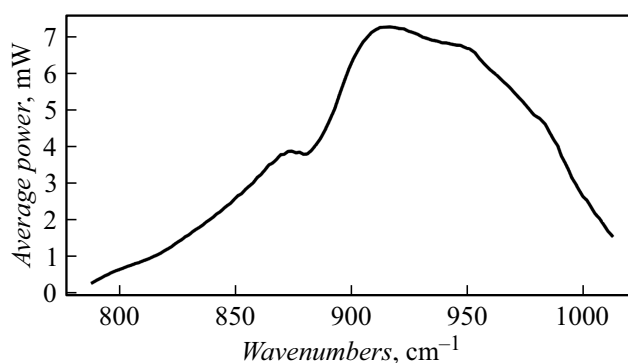


**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика (черный) и средняя выходная мощность (красный) ККЛ для волновых чисел 825.63 и 991.53  $\text{cm}^{-1}$ .

Разрешение энкодера — 109  $\mu\text{rad}$ , что позволяет с точностью 0.017% позиционировать дифракционную решетку с минимальным углом поворота в 125  $\mu\text{rad}$ . Чип ККЛ поддерживается при постоянной температуре 18°C с применением элемента Пельтье и термоэлектрического контроллера 2, который позволяет поддерживать температуру с максимальным отклонением 0.001 К. Импульсное напряжение 14 V с длительностью импульса 300 ns и скважностью 5% на чипе лазера поддерживается с помощью полевого MOSFET транзистора 6. Управление термоэлектрическим контроллером и генерация импульсов осуществляется с помощью микроконтроллера STM32H743.

В таблице представлены характеристики разработанного ККЛ. Максимальная мощность импульса была рассчитана с учетом формы импульса.

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики (для импульсного напряжения на чипе ККЛ) и зависимость средней мощности излучения от тока для разработанного ККЛ на двух различных волновых



**Рис. 3.** Спектр выходной средней мощности ККЛ. Напряжение 14 V, температура 18°C.

числах. На рис. 3 представлен спектр средней мощности ККЛ.

На рис. 4 представлена спектральная форма импульса, измеренная на фурье-спектрометре Thorlabs OSA207C со спектральным разрешением 0.25  $\text{cm}^{-1}$ , и электри-

## Основные технические характеристики ККЛ

Характеристика	Единица	Значение
Диапазон перестройки	$\mu\text{m}$	9.6–12.5
Максимальная средняя мощность излучения	mW	7.57
Максимальная мощность импульса	mW	199.8
Длительность импульса выходящего излучения	ns	278
Частота повторения импульсов	kHz	175.4
Расстояние между соседними пиками	$\text{cm}^{-1}$	$1.705 \pm 1.085$
Ширина пика интенсивности, не более	$\text{cm}^{-1}$	2
Расходимость луча, не более	mrad	5
Форма пучка на расстоянии 530 mm	mm	Эллипс $3.5 \times 5$
Потребляемая мощность устройства от сети 220 V 50 Hz	W	50
Габаритные размеры длина $\times$ ширина $\times$ высота	mm	$130 \times 150 \times 250$
Масса	kg	6
КПД чипа ККЛ	%	12.6

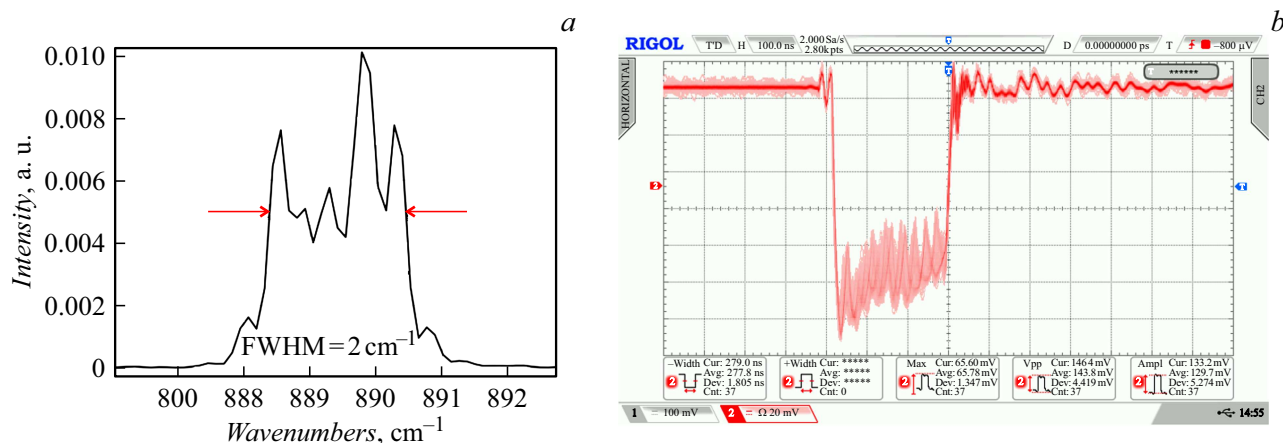


Рис. 4. *a* — спектральная форма импульса ККЛ на волновом числе  $889 \text{ cm}^{-1}$ . Ширина спектра равна  $2 \text{ cm}^{-1}$ ; *b* — форма импульса излучения ККЛ на КРТ фотоприемном устройстве.

ческая форма импульса, измеренная с помощью КРТ фотоприемного устройства, охлаждаемого каскадом элементов Пельтье.

В качестве фотоприемного устройства (ФПУ) используется фотодетектор PVM1-4TE-10.6 (VIGO Photonics, Польша), который состоит из следующих элементов:

- КРТ Фотодиод с активной площадью  $2 \times 2 \text{ mm}$  и линзой;
- NTC терморезистор фирмы Murata типа NCP03XM222E05RL;
- термоэлектрический контроллер (ТЕС) с 4 ступенями охлаждения, обеспечивающими температуру 198 K.

ТЕС ФПУ предназначен для установки и поддержания температуры фотодиода на заданном уровне. Он включает в себя: управляемый понижающий импульсный

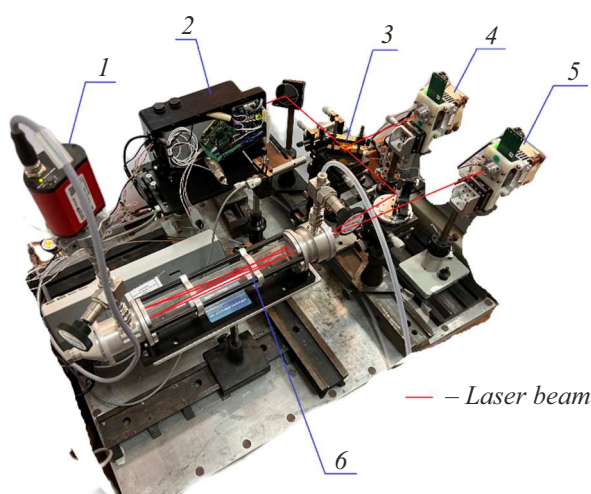
преобразователь, систему автоматического регулирования и систему мониторинга температуры, напряжения ошибки и энергетических параметров — напряжения, тока и мощности на входе и выходе контроллера. Данные передаются в блок управления и обработки через интерфейс  $I^2C$ .

В состав усилителя ФПУ входят: трансимпедансный усилитель, который преобразует ток фотодиода в напряжение (относительно земли); дифференциальный усилитель, преобразующий синфазный сигнал трансимпедансного усилителя в дифференциальный; модулятор, изменяющий полярность входного сигнала на противоположную; интегратор дифференциальный, со сбросом; 24-битный АЦП последовательного приближения с дифференциальным входом; компаратор, срабатываю-

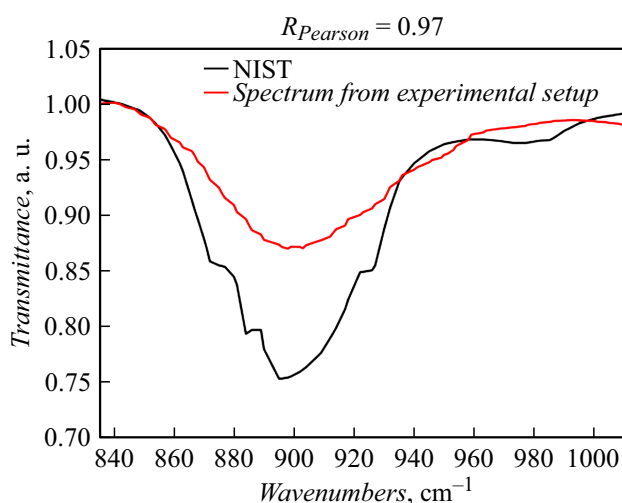
щий на фронте и спаде входного сигнала, что позволит блоку управления определить временные параметры импульсов. Усилитель детектора соединяется с блоком управления и обработки через высокоскоростной интерфейс LVDS.

## 2. Применение ККЛ

На рис. 5 представлена экспериментальная установка для лазерной ИК абсорбционной спектроскопии газовых смесей, в том числе выдыхаемого человеком воздуха. В многоходовую кювету Эрриота 6 с длиной оптического пути 76 м поступает газовая смесь с помощью насоса 1. Излучение от ККЛ 2, попадая на светодели-



**Рис. 5.** Экспериментальная установка для исследования газовых смесей. 1 — насос, 2 — ККЛ, 3 — светоделительная пластина, 4 — опорное фотоприемное устройство, 5 — сигнальное фотоприемное устройство, 6 — многоходовая кювета Эрриота.



**Рис. 6.** Спектр пропускания 100 ppm ацетона в кювете Эрриота и ацетона из базы данных NIST. Коэффициент корреляции равен 0.97.

тель 3, разделяется, и часть излучения падает на опорное фотоприемное устройство 4, а другая часть проходит через кювету и падает на сигнальное фотоприемное устройство 5.

В работе [46] представлены основные характеристики приведенной выше экспериментальной установки, а также расчет предельных обнаруживаемых концентраций для различных химических веществ. Так, для ацетона предел обнаружения составляет 25 ppb, для этанола — 52 ppb, для метанола — 15 ppb. В настоящей работе для проверки работоспособности разработанного ККЛ зарегистрирован спектр пропускания смеси ацетона в азоте с концентрацией 100 ppm. На рис. 6 красным цветом представлен спектр, полученный на экспериментальной установке, а черным цветом изображена спектральная линия ацетона из международной базы данных NIST [47]. Коэффициент корреляции Пирсона экспериментального и эталонного спектров составил 0.97.

## Заключение

В работе описан ККЛ среднего ИК диапазона на основе схемы Литтрова с внешним резонатором. Представлены технические характеристики разработанного лазера, описана конструкция, приведены вольт-амперные характеристики, а также спектральные характеристики лазера. Разработанный лазер имеет диапазон перестройки 9.6–12.5  $\mu\text{m}$ , максимальную пиковую мощность 199.8 mW и максимальную среднюю мощность 7.57 mW, шаг перестройки 2  $\text{cm}^{-1}$ , спектральную ширину лазерной линии 2  $\text{cm}^{-1}$ , что позволяет с его помощью решать задачи абсорбционной спектроскопии и спектроскопии диффузного рассеяния света.

В работе представлен спектр пропускания ацетона с концентрацией 100 ppm, полученный на описанной в работе экспериментальной установке, состоящей из ККЛ, многоходовой кюветы Эрриота с длиной оптического пути 76 м и двух КРТ фотоприемников с термоэлектрическим охлаждением. Установка может быть использована для анализа многокомпонентных газовых смесей, а также для исследования выдыхаемого человеком воздуха на наличие веществ-биомаркеров определенных заболеваний. Проведено сравнение полученного спектра пропускания со спектром из международной базы данных ИК спектров NIST. Коэффициент корреляции между спектрами составил 0.97.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства „Приоритет-2030“, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 13 мая 2021 г. № 729.

## Конфликт интересов

Автору заявляют, что у них нет конфликта интересов.



## Список литературы

- [1] Р.Ф. Казаринов, Р.А. Сурис. ФТП, **5**, 797 (1971). [R.F. Kazarinov, R.A. Suris. Sov. Phys. Semicond., **5**, 707 (1971).]
- [2] C. Gmachl, F. Capasso, D.L. Sivco, A.Y. Cho. Rep. Prog. Phys., **64**, 1533 (2001). DOI: 10.1088/0034-4885/64/11/204
- [3] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sivco, C. Sirtori, A.L. Hutchinson, A.Y. Cho. Science, **264**, 553 (1994). DOI: 10.1126/science.264.5158.553
- [4] F. Capasso. Science, **235**, 172 (1987). DOI: 10.1126/science.235.4785.172
- [5] Л.А. Скворцов. *Применение квантово-каскадных лазеров: состояние и перспективы* (Техносфера, М., 2020)
- [6] S. Slivken, A. Evans, J. David, M. Razeghi. Appl. Phys. Lett., **81**, 4321 (2002). DOI: 10.1063/1.1526462
- [7] J. Faist, C. Gmachl, F. Capasso, C. Sirtori, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **70**, 2670 (1997). DOI: 10.1063/1.119208
- [8] R. Maulini, M. Beck, J. Faist, E. Gini. Appl. Phys. Lett., **84**, 1659 (2004). DOI: 10.1063/1.1667609
- [9] A. Mendizabal, P.G. Loges. *Proc. SPIE, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment and Environmental Applications XXIII* (San Francisco, California, United States, 2023), v. 12372, p. 123720H. DOI: 10.1117/12.2655234
- [10] P. Kotidis, E.R. Deutsch, A. Goyal. *Proc. SPIE, Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII* (Baltimore, United States, 2015), v. 9467, p. 94672S-1. DOI: 10.1117/12.2178169
- [11] I.L. Fufurin, A.S. Tabalina, A.N. Morozov, I.S. Golyak, S.I. Svetlichnyi, D.R. Anfimov, I.V. Kochikov. Opt. Eng., **59**(6), 061621 (2020). DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061621
- [12] И.С. Голяк, А.Н. Морозов, С.И. Светличный, А.С. Табалина, И.Л. Фуфурин. Хим. физика, **38**(7), 3 (2019). DOI: 10.1134/S0207401X19070057 [I.S. Golyak, A.N. Morozov, S.I. Svetlichnyi, A.S. Tabalina, I.L. Fufurin. Russ. J. Phys. Chem. B, **13**, 557 (2019). DOI: 10.1134/S1990793119040055]
- [13] J.R. Castro-Suarez, M. Hidalgo-Santiago, S.P. Hernández-Rivera. Appl. Spectr., **69**(9), 1023 (2015). DOI: 10.1366/14-07626
- [14] Д.Р. Anfimov, И.С. Голяк, О.А. Небритова, И.Л. Фуфурин. Хим. физика, **41**(10), 1 (2022). DOI: 10.31857/S0207401X22100028 [D.R. Anfimov, I.S. Golyak, O.A. Nebritova, I.L. Fufurin. Russ. J. Phys. Chem. B, **16**(5), 834 (2022). DOI: 10.1134/S1990793122050165]
- [15] Д.А. Самсонов, А.С. Табалина, И.Л. Фуфурин. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки, **4**, 103 (2018). DOI: 10.18698/1812-3368-2018-4-103-114
- [16] D.B. Kelley, D. Wood, A.K. Goyal, P. Kotidis. *Proc. SPIE, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIX* (Orlando, United States, 2018), v. 10629, p. 1062909. DOI: 10.1117/12.2304387
- [17] D. Wood, D.B. Kelley, A.K. Goyal, P. Kotidis. *Proc. SPIE, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XIX* (Orlando, United States, 2018), v. 10629, p. 1062915. DOI: 10.1117/12.2304453
- [18] T. Myers, D. Wood, A.K. Goyal, D. Kelley, P. Kotidis, G. Raz, C. Murphy, C. Georgan. *Proc. SPIE, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XXIII* (Anaheim, United States, 2017), v. 10198, p. 101980C. DOI: 10.1117/12.2262548
- [19] A.K. Goyal, D. Wood, V. Lee, J. Rollag, P. Schwarz, L. Zhu, G. Santora. Opt. Eng., **59**(9), 092003 (2020). DOI: 10.1117/1.OE.59.9.092003
- [20] A.C. Padilla-Jiménez, W. Ortiz-Rivera, C. Rios-Velazquez, I. Vazquez-Ayala, S.P. Hernández-Rivera. Opt. Eng., **53**(6), 061611 (2014). DOI: 10.1117/1.OE.53.6.061611
- [21] K. Yeh, R. Bhargava. *Proc. SPIE, Biomedical Vibrational Spectroscopy* (San Francisco, United States, 2016), v. 9704, p. 970406. DOI: 10.1117/12.2230003
- [22] L.L. de Boer, T.M. Bydlon, F. van Duijnhoven, M.T.F.D. Vranken Peeters, C.E. Loo, G.A.O. Winter-Warnars, J. Sanders, H.J.C.M. Sterenborg, B.H.W. Hendriks, T.J.M. Ruers. J. Transl. Med., **16**, 367 (2018). DOI: 10.1186/s12967-018-1747-5
- [23] R. Marbach, H.M. Heise. Appl. Opt., **34**(4), 610 (1995). DOI: 10.1364/AO.34.000610
- [24] S. Rassel, C. Xu, S. Zhang, D. Ban. Analyst, **145**(7), 2441 (2020). DOI: 10.1039/C9AN02354B
- [25] C. Vrancić, N. Kröger, N. Gretz, S. Neudecker, A. Pucci, W. Petrich. Anal. Chem., **86**, 10511 (2014). DOI: 10.1021/ac5028808
- [26] J. Haas, E. Vargas Catalán, P. Piron, M. Karlsson, B. Mizaikoff. Analyst, **143**, 5112 (2018). DOI: 10.1039/C8AN00919H
- [27] M.J. Norahan, R. Horvath, N. Woitzik, P. Jouy, F. Eigenmann, K. Gerwert, C. Kötting. Anal. Chem., **93**, 6779 (2021). DOI: 10.1021/acs.analchem.1c00666
- [28] A. Schwaighofer, B. Lendl. *Vibrational Spectroscopy in Protein Research*. Chapter 3. (Academic Press, Toronto–London–NY, 2020), DOI: 10.1016/B978-0-12-818610-7.00003-7
- [29] V.V. Dudelev, D.A. Mikhailov, A.V. Babichev, A.D. Andreev, S.N. Losev, E.A. Kognovitskaya, Yu.K. Bobretsova, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhin, A.G. Gladyshev, D.V. Denisov, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, V.I. Kuchinskii, A.Yu. Egorov, G.S. Sokolovskii. Quant. Electron., **50**(2), 141 (2020). DOI: 10.1070/QEL17168
- [30] А.В. Бабичев, В.В. Дюделев, А.Г. Гладышев, Д.А. Михайлов, А.С. Курочкин, Е.С. Колодезный, В.Е. Бугров, В.Н. Неведомский, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, Д.В. Денисов, А.С. Ионов, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Г.С. Соколовский, А.Ю. Егоров. Письма в ЖТФ, **45**(14), 48 (2019). [A.V. Babichev, V.V. Dudelev, A.G. Gladyshev, D.A. Mikhailov, A.S. Kurochkin, E.S. Kolodeznyi, V.E. Bougrov, V.N. Nevedomskiy, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, D.V. Denisov, A.S. Ionov, S.O. Slipchenko, A.V. Lutetskiy, N.A. Pikhin, G.S. Sokolovskii, A.Yu. Egorov. Tech. Phys. Lett., **45**, 735 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019070174]
- [31] T. Fei, S. Zhai, J. Zhang, N. Zhuo, J. Liu, L. Wang, S. Liu, Z. Jia, K. Li, Y. Sun, K. Guo, F. Liu, Z. Wang. J. Semicond., **42**(11), 112301 (2021). DOI: 10.1088/1674-4926/42/11/112301
- [32] E.R. Deutsch, P. Kotidis, N. Zhu, A.K. Goyal. *Proc. SPIE, Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XI* (Baltimore, United States, 2014), v. 9106, p. 91060A. DOI: 10.1117/12.2058544

- [33] И.В. Кочиков, А.Н. Морозов, С.И. Светличный, И.Л. Фуфурин. *Опт. и спектр.*, **106** (5), 743 (2009). [I.V. Kochikov, A.N. Morozov, I.L. Fufurin, S.I. Svetlichnyi. *Opt. Spectr.*, **106** (5), 666 (2009). DOI: 10.1134/S0030400X09050075]
- [34] A.K. Goyal, P. Kotidis, E.R. Deutsch, N. Zhu, M. Norman, J. Ye, K. Zafiriou, A. Mazurenko. *Proc. SPIE, Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XVI* (Baltimore, United States, 2015), v. 9455, p. 94550L. DOI: 10.1117/12.2177527
- [35] A. Reyes-Reyes, Z. Hou, E. van Mastrigt, R.C. Horsten, J.C. de Jongste, M.W. Pijnenburg, H.P. Urbach, N. Bhattacharya. *Opt. Express*, **22** (15), 18299 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.018299
- [36] И.С. Голяк, Е.Р. Карева, И.Л. Фуфурин, Д.Р. Фуфурин, А.В. Щербакова, О.А. Небритова, П.П. Демкин, А.Н. Морозов. *Компьютерная оптика*, **46** (4), 650 (2022). DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1058
- [37] A. Genner, P. Martín-Mateos, H. Moser, B. Lendl. *Sensors*, **20**, 1850 (2020). DOI: 10.3390/s20071850
- [38] F. Zheng, X. Qiu, L. Shao, S. Feng, T. Cheng, X. He, Q. He, C. Li, R. Kan, C. Fittschen. *Opt. Laser Technol.*, **124**, 105963 (2020). DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105963
- [39] N. Liu, L. Xu, S. Zhou, L. Zhang, J. Li. *Analyst*, **146**, 3841 (2021). DOI: 10.1039/C9AN02354B
- [40] X. Tian, F. Beén, P.S. Bäuerlein. *Environmental Research*, **212** (D), 113569 (2022). DOI: 10.1016/j.envres.2022.113569
- [41] A. Reyes-Reyes, R.C. Horsten, H.P. Urbach, N. Bhattacharya. *Analyt. Chem.*, **87** (1), 507 (2015). DOI: 10.1021/ac504235e
- [42] А.В. Щербакова, Д.Р. Анфимов, И.Л. Фуфурин, И.С. Голяк, И.А. Трапезникова, Е.Р. Карева, А.Н. Морозов. *Опт. и спектр.*, **129** (6), 747 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.06.50986.7k-21 [A.V. Shcherbakova, D.R. Anfimov, I.L. Fufurin, I.S. Golyak, I.A. Trapeznikova, E.R. Kareva, A.N. Morozov. *Opt. Spectr.*, **129** (6), 830 (2021). DOI: 10.1134/S0030400X21060151]
- [43] О.А. Небритова, П.П. Демкин, А.Н. Морозов, П.В. Бережанский, Д.Р. Анфимов, И.Л. Фуфурин. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, **6**, 39 (2023). DOI: 10.18698/1812-3368-2023-6-39-54
- [44] I. Fufurin, P. Berezanskiy, I. Golyak, D. Anfimov, E. Kareva, A. Scherbakova, P. Demkin, O. Nebritova, A. Morozov. *Materials*, **15**, 2984 (2022). DOI: 10.3390/ma15092984
- [45] И.С. Голяк, П.В. Бережанский, А.Ю. Седова, Т.А. Гутьрчик, О.А. Небритова, А.Н. Морозов, Д.Р. Анфимов, И.Б. Винтайкин, А.А. Коноплева, П.П. Демкин, И.Л. Фуфурин. *Опт. и спектр.*, **131** (6), 825 (2023). DOI: 10.21883/OS.2023.06.55917.109-23
- [46] I.L. Fufurin, D.R. Anfimov, E.R. Kareva, A.V. Scherbakova, P.P. Demkin, A.N. Morozov, I.S. Golyak. *Opt. Eng.*, **60** (8), 082016 (2021). DOI: 10.1117/1.OE.60.8.082016
- [47] *NIST Chemistry WebBook*. [Электронный ресурс]. 1996. Дата обновления: 01.2023. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/> (дата обращения: 29.12.2023). DOI: 10.18434/T4D303