
ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 543.422.3

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ CO, CO₂ И CH₄ НА ОСНОВЕ
ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЕТА**

© 2024 г. Е. Ю. Ерушин^{a,b,c,*}, Н. Ю. Костюкова^{a,b,c,**},
А. А. Бойко^{a,b,***}, И. Б. Мирошниченко^{a,c}

^aНовосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

^bНовосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

^cИнститут лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б

*e-mail: render2012@yandex.ru

**e-mail: n.duhovnikova@gmail.com

***e-mail: baa.nsk@gmail.com

Поступила в редакцию 20.09.2023 г.

После доработки 29.09.2023 г.

Принята к публикации 12.10.2023 г.

Многокомпонентный газоанализатор имеет широкий спектр применений, таких как наблюдение за окружающей средой, контроль химических реакций и промышленных процессов, обеспечение безопасности, разведка в нефтяной и газовой отраслях, а также применяется в биомедицине. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия является наиболее универсальным методом анализа газовых примесей благодаря своей высокой селективности, чувствительности и быстрому отклику. В данной работе представлена автоматизированная система газового анализа, основанная на комбинированных параметрических генераторах света, с диапазоном перестройки длины волны от 2.5 до 10.8 мкм. Полуширина спектральной линии составляет около $5.5 \pm 0.5 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне от 2.5 до 4.5 мкм и около $2 \pm 0.5 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне от 4.5 до 10.8 мкм. С помощью программного обеспечения, установленного на управляющем компьютере, контроллер выполняет все необходимые операции, включая откачку, анализ и удаление газовых проб в измерительном комплексе. В работе представлены экспериментально записанные спектры поглощения газовых смесей CO, CO₂ и CH₄, полученные с использованием дифференциального оптико-акустического детектора.

DOI: 10.31857/S0032816224030082 EDN: OVIKAF

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день многокомпонентный газовый анализ является важной задачей, находящей применение в экологическом мониторинге [1], обеспечении безопасности на угольных шахтах [2], медицинской диагностике выдыхаемого воздуха [3] и других областях. Чувствительное и селективное обнаружение различных газовых компонентов имеет высокую значимость для понимания процессов

загрязнения воздуха в тропосфере и выявления связей между заболеваниями и их газовыми маркерами. Одними из газовых маркеров для медицины, экологического мониторинга и обеспечения промышленной безопасности являются оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO₂), а также метан (CH₄). Эти газы играют важную роль в составе атмосферы, изменении климата и здоровье человека. Точное и чувствительное обнаружение этих газов в низких концентрациях

имеет важное значение для понимания источников их возникновения, воздействия и стратегий смягчения последствий.

Угарный газ, выделяющийся в результате процессов неполного сгорания топлива, представляет серьезную угрозу для здоровья человека, поскольку он является “тихим убийцей” из-за отсутствия запаха и цвета. Значительное влияние СО на химию атмосферы было признано из-за его тесной связи с деградацией озоносферы и образованием кислотных дождей в результате его реакции с гидроксидом (ОН) и его косвенного влияния на накопление парниковых газов [4, 5]. Также он является особенно важным объектом для наблюдения в системах, работающих на углеводородном топливе, поскольку его концентрацию можно интерпретировать как показатель эффективности сгорания [6].

Углекислый газ, основной парниковый газ, преимущественно связан с антропогенной деятельностью и считается основным фактором глобального потепления. Метан, с другой стороны, является мощным парниковым газом с гораздо более высоким потенциалом глобального потепления, чем углекислый газ.

Потребность в эффективных методах обнаружения указанных соединений обусловлена потенциальной опасностью этих газов даже при низких концентрациях. Хроническое воздействие СО может привести к различным симптомам: от легких головных болей до опасных для жизни состояний, поэтому крайне важно контролировать его уровень в закрытых помещениях и замкнутых пространствах. Повышенный уровень CO_2 в плохо вентилируемых помещениях может оказывать пагубное воздействие на когнитивные функции человека и общую производительность. Кроме того, утечка CH_4 на промышленных объектах, особенно в нефтегазовой отрасли, может привести к образованию взрывоопасных атмосфер, загрязнению окружающей среды и значительным экономическим потерям.

Методы обнаружения этих газов традиционно основывались на различных аналитических методах, таких как газовая хроматография [7], спектрометрия и электрохимические датчики. Хотя эти методы позволили получить ценную информацию о концентрациях СО, CO_2 и CH_4 , они часто требуют сложного и дорогостоящего оборудования и могут оказаться непригодными

для непрерывного мониторинга в режиме реального времени. В отличие от традиционных методов, спектроскопические подходы имеют ряд уникальных преимуществ. Они позволяют одновременно и неинвазивно обнаруживать множество газовых компонентов. Кроме того, некоторые лазерные технологии (например, системы DIAL [8]) позволяют проводить трехмерную геопространственную визуализацию загрязнения воздушной среды.

Одним из наиболее перспективных методов спектроскопии является лазерная оптико-акустическая спектроскопия (LPAS) [9, 10]. Этот метод отличается быстрым откликом, высокой селективностью и чувствительностью, он является наиболее универсальным для анализа состава газов. В отличие от хроматографии, метод LPAS позволяет контролировать состав воздуха в реальном времени. Характерной особенностью метода является то, что отношение сигнал/шум растет пропорционально мощности источника излучения. Единственным принципиальным ограничением на мощность является эффект насыщения поглощения, а предельная чувствительность системы зависит от тепловых флуктуаций в анализируемой среде.

В среднем ИК-диапазоне (от 2.5 до 14 мкм) находятся наиболее интенсивные полосы поглощения разных газов. Типичными источниками излучения в этом диапазоне являются газовые лазеры (например, CO_2 , СО) [11], квантово-каскадные лазеры [12], химические лазеры, твердотельные лазеры и источники, основанные на параметрическом преобразовании частоты. За последние годы особенно популярными стали квантово-каскадные лазеры, которые отличаются очень малой шириной линии и которые способны работать в спектральном диапазоне от 3.5 до 24 мкм. Такие лазеры являются идеальными источниками излучения для обнаружения конкретных газовых смесей. Однако из-за ограниченного диапазона перестройки они не могут быть использованы для обнаружения нескольких газов одновременно. В этом случае можно использовать параметрические преобразователи частоты, включая параметрические генераторы света (ПГС). Они обеспечивают непрерывную перестройку длины волны, что позволяет обнаружить несколько газов одновременно [13, 14].

В данной работе представлен автоматически перестраиваемый комбинированный ПГС

на основе кристалла HgGa_2S_4 и периодически поляризованного кристалла LiNbO_3 с веерной (fan-out) доменной структурой для оптико-акустической спектроскопии.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представлена на рис. 1. В качестве источника накачки используется Nd:YLF-лазер с длиной волны 1.053 мкм (TECH-1053 Advanced) с длительностью импульса около 6 нс. Полуширина линии излучения равняется 227 пм (около 2 см^{-1}). Частота следования импульсов может изменяться от 0.1 до 4 кГц. Оптический изолятор (ОИ) Фарадея используется для устранения обратной связи от оптических элементов. Для плавного регулирования мощности используется аттенюатор, состоящий из полуволновой пластинки ($\lambda/2$) с призмой Глана (Пол). Для согласования режимов лазера накачки и ПГС используется линза L_1 с фокусным расстоянием 300 мм.

Газовым детектором в данном исследовании служила дифференциальная оптико-акустическая ячейка ОАД-90, описанная подробно в работе [15]. Ячейка изготовлена из прочного алюминиевого сплава, она содержит два параллельных акустических резонатора размером $\varnothing 9 \times 90$ мм², которые разделены тонкой перегородкой толщиной 1 мм. Также в ячейке находят-

ся две буферные полости размером $\varnothing 20 \times 8$ мм², которые закрыты фланцами с резиновыми уплотнителями. Обе буферные полости имеют установленные на фланцах окна из ZnSe под углом Брюстера. Газ прокачивается по шлангам, которые крепятся на стенках буферных полостей.

Каждый акустический резонатор дифференциального ОАД-90 оборудован микрофоном, подключенным к дифференциальному усилителю. Динамиком служит пьезоэлектрический излучатель звука, размещенный в одном из резонаторов. Этот излучатель используется для возбуждения внутренних акустических колебаний в ОАД-90 при измерении текущей низшей резонансной частоты. Максимальный отклик оптико-акустического детектора достигается путем модуляции лазера на частоте, соответствующей низшему продольному резонансу, который составляет при комнатной температуре около 1750 Гц при заполнении ячейки воздухом (около 1780 Гц при заполнении азотом).

2.1. ПГС на основе RPLN

В качестве нелинейной среды для ПГС в спектральной области 2.5–4.5 мкм использовался периодически поляризованный кристалл ниобата лития, легированный оксидом магния, с веерной структурой (fan-out MgO: PPLN) размером 50×20×3 мм³. Период структуры плавно меняется вдоль оси *y* в диапазоне $\Lambda = 27.5\text{--}32.5$ мкм. На торцы нелинейного элемента было нанесено просветляющее покрытие с максимумом пропускания на длине волны примерно 1.5 мкм.

Для введения лазерного луча в резонатор было использовано металлическое полностью отражающее зеркало M_2 , которое размещалось на линейной моторизованной подвижке. Линза L_2 с фокусным расстоянием $f = 200$ мм обеспечивала необходимый размер пучка в кристалле: $d_{x,y}$ около 290 мкм (на уровне e^{-2}). В отличие от работ [16, 17], использовалась однопроводная схема параметрической генерации света.

Резонатор образован двумя плоскими ди-хроичными зеркалами M_3 и M_4 , прозрачными для накачки и холостой волны, но полностью отражающими сигнальную волну. Они были расположены в монолитном кубе рядом с торцом MgO: PPLN с зазором около 0.5 мм с каждой стороны. Для фильтрации излучения накачки после резонатора устанавливалось зеркало M_5 , прозрачное для сигнальной и холостой волн.

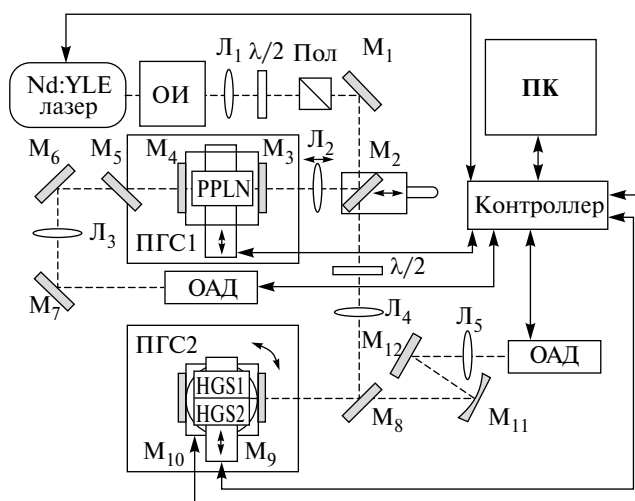


Рис. 1. Экспериментальная установка системы газового анализа: ОИ — оптический изолятор Фарадея, $\lambda/2$ — полуволновая пластинка, Пол — поляризатор, ОАД — оптико-акустический детектор, PPLN — периодически поляризованный кристалл ниобата лития с веерной структурой, HGS — кристалл HgGa_2S_4 , ПК — персональный компьютер.

но отражающее накачку. Нелинейный кристалл термостабилизировался с помощью элемента Пельтье на уровне 40°C . Перестройка длины волны ПГС осуществлялась путем перемещения структуры поперек оси оптического резонатора с помощью линейной моторизованной подвижки с диапазоном перемещения 25 мм и шагом 1.25 мкм. Данные перестройки записываются в калибровочный файл для дальнейших измерений, точность установки заданной длины волны ± 0.1 нм. Полуширина линии излучения ПГС PPLN составила примерно $5.6 \pm 0.2 \text{ см}^{-1}$ при длине волны 3312 нм и примерно $5.5 \pm 0.5 \text{ см}^{-1}$ во всем диапазоне перестройки. Длина волны измерялась с помощью спектрометра High Finesse (LSA IR-I) с разрешением 12 ГГц (около 50 пм).

2.2. ПГС на основе HGS

Для реализации параметрической генерации света в спектральной области 4.5–10.8 мкм использовались два кристалла HgGa_2S_4 (HGS). Оба кристалла ориентированы на второй тип взаимодействия (е-о). Угол среза HGS_1 составляет $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 0$, что соответствует примерно 4.7 мкм на холостой волне при нормальном падении излучения накачки, угол среза HGS_2 составляет $\theta = 47^\circ$, $\varphi = 0$, что обеспечивает генерацию света с длиной волны примерно 7.45 мкм при нормальном угле падения. Кристалл HGS_1 имеет следующие размеры: $5 \times 4.5 \times 11 \text{ мм}^3$, а HGS_2 — $6 \times 4.3 \times 13.7 \text{ мм}^3$. На торцы обоих кристаллов было нанесено просветляющее покрытие с максимумом пропускания на длине волны примерно 1.2 мкм для минимизации оптических потерь в резонаторе.

Для выполнения условия фазового синхронизма устанавливается еще одна полуволновая пластина. Линза L_4 с фокусным расстоянием $f = 400$ мм обеспечивала необходимый размер пучка в кристалле: $d_{x,y}$ около 600 мкм (на уровне e^{-2}). Для ввода пучка накачки в резонатор и вывода излучения ПГС используется дихроичное зеркало M_8 . ПГС₂ представляет собой двухпроходную однорезонансную схему. Оптическая схема ПГС близка к схеме, описанной в работе [18]. Резонатор образован двумя плоскими зеркалами: металлическим зеркалом M_{10} с коэффициентом отражения $R = 97\%$ для всех трех волн (накачки, сигнальной и холостой) и входным/выходным зеркалом M_9 из ZnSe с высоким коэффициентом пропускания излучения накачки ($T = 92\%$ при 1.053 мкм) и холостой

волны ($T = 80\%$ при 4.2–10.8 мкм), а также с высокой отражательной способностью излучения сигнальной волны ($R \sim 95\%$ при 1.17–1.4 мкм). Полная ширина линии на полувысоте (FWHM) излучения ПГС на основе HGS составила $2 \pm 0.5 \text{ см}^{-1}$ во всем диапазоне перестройки.

Перестройка длины волны ПГС осуществляется вращением кристаллов на угол θ с помощью моторизованной поворотной платформы. Переключение между кристаллами, а также регулировка по поперечной оси резонатора осуществлялись с помощью такой же моторизованной линейной подвижки, что и в ПГС PPLN. Данные перестройки также записываются в файл калибровки для дальнейших измерений.

Используя концевые выключатели и оптические датчики, система измерения обеспечивает хорошую точность и повторяемость. Они служат для определения начальной координаты и точного положения относительно нее. Концевые выключатели и оптические датчики от каждой моторизованной подвижки подключены к микроконтроллеру. С помощью компьютера можно программно регулировать диапазоны и скорость движения каретки для каждого из драйверов шаговых двигателей. Для управления всеми элементами измерительного комплекса и сбора данных используется 8–16-битный микроконтроллер (ATX Mega128) с тактовой частотой 32 МГц. Он способен независимо управлять линейными и поворотными моторизованными подвижками (до 4 штук включительно), двумя каналами термостабилизации держателей кристаллов, двумя каналами откачки пробы газа и внешним лазером. Контроллер обеспечивает питание всех подсистем через встроенный блок питания. Структурная схема контроллера ПГС представлена на рис. 2. Управление микроконтроллером осуществляется через интерфейс USB с помощью внешних команд, передаваемых с персонального компьютера (ПК) по фирменному протоколу связи. Программное обеспечение на компьютере позволяет контроллеру выполнять все необходимые операции по откачке, анализу и удалению пробы газа в измерительном комплексе.

Спектры поглощения могут записываться как дискретно, так и непрерывно. Дискретное сканирование происходит по следующему алгоритму. Для определения резонансной частоты смеси динамик возбуждает акустические колебания,



Рис. 2. Структурная схема контроллера ПГС.

регистрируемые микрофонами. Электрические сигналы подаются на входы платы многоканального АЦП. Примечательно, что АЦП измеряет массив данных размером, указанным в программном обеспечении. С помощью быстрого преобразования Фурье осуществляется поиск резонансной частоты в диапазоне, указанном в программном обеспечении. Моторизованные подвижки перемещаются в положение, соответствующее началу рабочего интервала и соответствующее диапазону длин волн, указанному в программе. После этого весь интервал разбивается на определенное количество выборок (указанных в калибровочном файле) и проводятся измерения на каждой из них. Сигнал оптико-акустического детектора обрабатывается методом быстрого преобразования Фурье и усредняется за 0.5 с. В ходе измерений полученные данные отображаются на графиках. Графики с различных акустических ячеек или пироприемника можно просмотреть отдельно на разных вкладках программы. Шаг подвижки для регистрации спектра поглощения рассчитывался путем деления всего диапазона перестройки на половину ширины линии излучения. Так, количество точек для ПГС PPLN составило 650, а для ПГС HGS — 1300.

Регистрация спектров от 2.5 до 4.5 мкм происходит на частоте, соответствующей низшей резонансной моде акустического детектора (примерно 1780 Гц). Из-за плохой теплопроводности кристаллов HGS невозможно работать

на частоте, соответствующей низшей резонансной моде акустического детектора. Необходимо снизить частоту следования импульсов до $f/2$, что влечет за собой снижение средней мощности, а также чувствительности. В дальнейшем планируется установка усилительного каскада для увеличения средней мощности ПГС HGS. Одной из проблем долговременных измерений является сдвиг частоты продольного резонанса из-за нагрева газовой смеси. Такое несоответствие приводит к снижению концентрационной чувствительности. Для решения этой проблемы был применен алгоритм автоматической регулировки частоты следования импульсов в соответствии с частотой продольного резонанса [19].

На рис. 3 представлен экспериментальный спектр поглощения эталонной смеси на основе азота с примесью метана ($N_2 + 954 \text{ ppm CH}_4$), полученный с помощью перестройки ПГС на основе $MgO:PPLN$ в сравнении с теоретической базой данных HITRAN с разрешением 0.1 cm^{-1} [20]. На рис. 4 представлен экспериментальный спектр поглощения эталонной смеси на основе азота с углекислым газом ($N_2 + 1000 \text{ ppm CO}_2$), полученный с помощью перестройки ПГС на основе $MgO:PPLN$ в сравнении с теоретической базой данных HITRAN с разрешением 0.1 cm^{-1} [20] и спектром, полученным с помощью масс-спектрометрии [21]. На рис. 5 представлен экспериментальный спектр поглощения эталонной смеси на основе азота с оксидом углерода

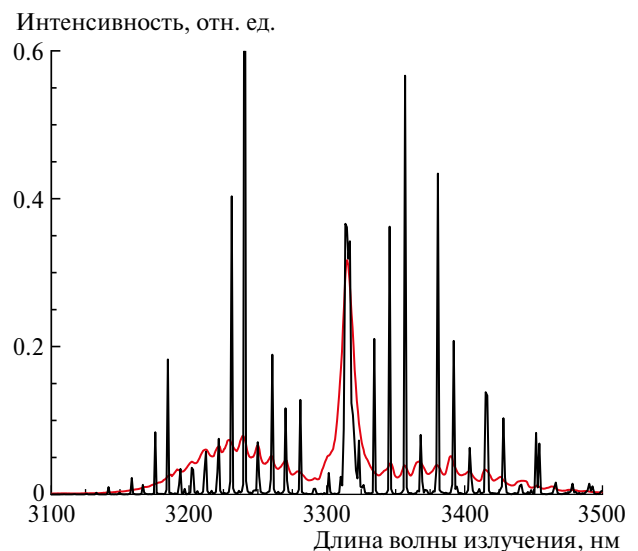


Рис. 3. Экспериментально измеренный спектр поглощения газовой смеси на основе азота с примесью метана ($N_2 + 954 \text{ ppm CH}_4$) (красная кривая) в сравнении с данными базы данных HITRAN (черная кривая).

Интенсивность, отн. ед.

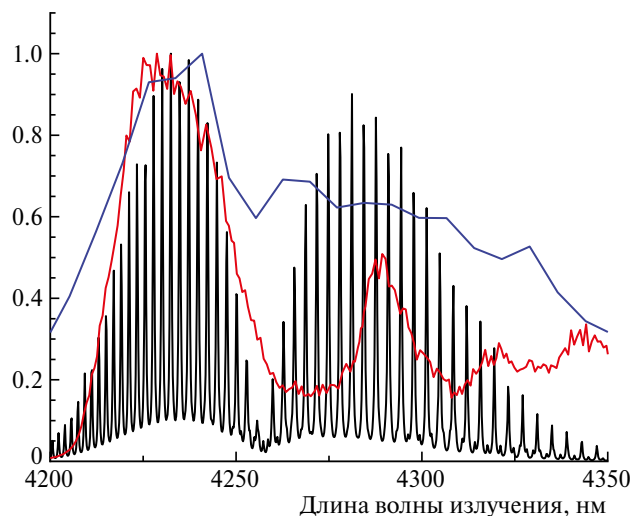


Рис. 4. Экспериментально измеренный спектр поглощения газовой смеси на основе азота с углекислым газом ($N_2 + 1000 \text{ ppm CO}_2$) (красная кривая) в сравнении с данными базы данных HITRAN (черная кривая) и спектром, полученным с помощью масс-спектрометрии (синяя кривая).

Интенсивность, отн. ед.

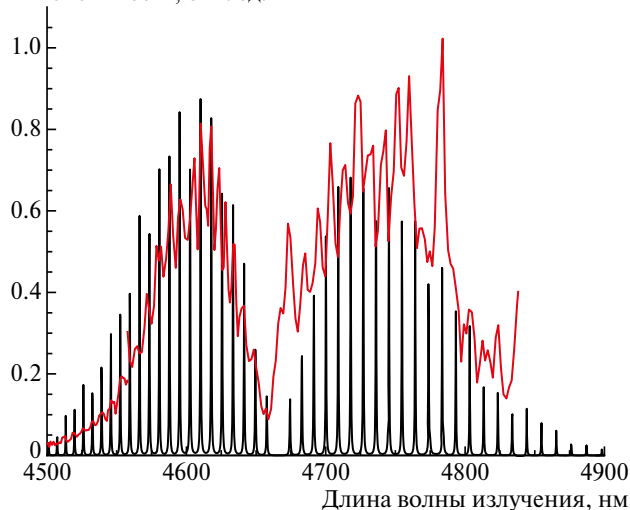


Рис. 5. Экспериментально измеренный спектр поглощения газовой смеси на основе азота с примесью оксида углерода ($N_2 + 152 \text{ ppm CO}$) (красная кривая) в сравнении с данными базы данных HITRAN (черная кривая).

($N_2 + 152 \text{ ppm CO}$), полученный с помощью перестройки ПГС на основе HGS в сравнении с теоретической базой данных HITRAN с разрешением 0.1 cm^{-1} [20]. Зарегистрированные спектры хорошо согласуются с теоретической базой данных.

Продемонстрированная автоматическая система подходит для высокочувствительно-

го обнаружения нескольких газов в среднем ИК-диапазоне для мониторинга окружающей среды и атмосферы, а также в биомедицине.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована широко перестраиваемая автоматическая система для многокомпонентного газового анализа. Ее можно перестраивать в диапазоне от 2.5 до 10.8 мкм. Полуширина линии $MgO:PPLN \text{ OPO}$ составляет примерно $5.5 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ во всем диапазоне перестройки. Полуширина линии $HGS \text{ OPO}$ составляет примерно $2 \pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ во всем диапазоне перестройки. Столь широко перестраиваемый источник может быть использован для различных газоаналитических целей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-72-30006-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kreuzer L.B., Kenyonand N.D., Patel C.K. // Science 1972. V. 177. P. 347.
<https://doi.org/10.1126/science.177.4046.347>
2. Tongyu Liu // Measurement. 2018. № 8. P. 211.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.046>
3. Pereira J., Porto-Figueira P., Cavaco C., Taunk K., Rapole S., Dhakne R., Nagarajaram H., Câmara J.S. // Metabolites. 2015. V. 5. P. 3.
<https://doi.org/10.3390/metabo5010003>
4. Zhou D. K., Smith W. L., Xu Liu, Jun Li, Larar A. M., Mango S. A. // Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 3032.
<https://doi.org/10.1364/AO.44.003032>
5. Logan J.A., Prather M.J., Wofsy S.C., McElroy M.B. // J. Geophys. Res. Atmos. 1981. V. 86. P. 7210.
<https://doi.org/10.1029/JC086iC08p07210>
6. Ren W., Farooq A., Davidson D.F., Hanson R.K. // Appl. Phys. B. 2012. V. 107. P. 849.
<https://doi.org/10.1007/s00340-012-5046-1>
7. Meyer P.L., Sigrist M.W. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. P. 1779.
<https://doi.org/10.1063/1.1141097>
8. Zanzottera E. // Crit. Rev. Anal. Chem. 1990. V. 21. P. 279.
<https://doi.org/10.1080/10408349008051632>
9. Harren F., Mandon J., Cristescu S.M. Encyclopedia of Analytical Chemistry. John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
<https://doi.org/10.1002/9780470027318.a0718.pub3>
10. Haisch C. // Meas. Sci. Technol. 2011. V. 23. P. 012001.
<http://iopscience.iop.org/0957-0233/23/1/012001>

11. *Grant W.B.* // Appl. Opt. 1986. V. 25 P. 709.
<https://doi.org/10.1364/AO.25.000709>
12. *Reyes-Reyes A., Hou Z., van Mastrigt E., Horsten R.C., de Jongste J.C., Pijnenburg M.W., Urbach H.P., Bhattacharya N.* // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 18299.
<https://doi.org/10.1364/OE.22.018299>
13. *Vedenyapin V., Boyko A., Kolker D., Isaenko L., Lobanov S., Kostyukova N., Yelisseyev A., Zondy J.-J., Petrov V.* // Laser Phys. Lett. 2016. V. 13. P. 115401.
<http://dx.doi.org/10.1088/1612-2011/13/11/115401>
14. *Vodopyanov K.L., Maffettone J.P., Zwieback I., Ruderman W.* // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 75. P. 1204.
<https://doi.org/10.1063/1.124642>
15. *Sherstov I.V., Vasiliev V.A., Karapuzikov A.I., Zenov K.G.* // Infrared Phys. Technol. 2020. V. 105. P. 103170.
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103170>
16. *Kolker D.B., Boyko A.A., Dukhovnikova N.Yu., Zenov K.G., Sherstov I.V., Starikova M.K., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Kashtanov D.A., Kuznetsova I.B., Shtyrov M.Yu., Zachariadis S., Karapuzikov A.I., Karapuzikov A.A., Lokonov V.N.* // Instrum. Exp. Techn. 2014. V. 57. P. 50.
<https://doi.org/10.1134/S0020441214010217>
17. *Kolker D.B., Sherstov I.V., Kostyukova N.Yu., Boyko A.A., Zenov K.G., Pustovalova R.V.* // Quantum Electronics. 2017. V. 47. P. 14.
<http://dx.doi.org/10.1070/QEL16238>
18. *Kostyukova N.Yu., Kolker D.B., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Sherstov I.V., Karapuzikov A.A.* // Laser Phys. Lett. 2015. V. 12. P. 095401.
<http://dx.doi.org/10.1088/1612-2011/12/9/095401>
19. *Bednyakova A., Erushin E., Miroshnichenko I., Kostyukova N., Boyko A., Redyuk A.* // Infrared Phys. Technol. 2023. V. 133. P. 104821.
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104821>
20. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al.* // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2013. V. 130. P. 4
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>
21. *Wallace W.E.* // NIST Standard Reference Database Number 69, 2023.
<https://doi.org/10.18434/T4D303>