

УДК 520.626

СПЕКТРОГРАФ НА БАЗЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНЕЙКИ ДЛЯ ДЛИННОВОЛНОВОЙ ОБЛАСТИ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

© 2024 г. А. А. Ионин^а, И. О. Киняевский^{а,*}, А. Ю. Козлов^а, Д. В. Синицын^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

*e-mail: kinyaevskiyio@lebedev.ru

Поступила в редакцию 08.02.2024 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

Разработан компактный ИК-спектрограф на базе линейки пироэлектрических датчиков, действующий в области длины волны 10 мкм, что мотивировано различными задачами, требующими оперативного измерения спектральных характеристик многочастотного излучения в этом спектральном диапазоне. Работа спектрометра протестирована с помощью перестраиваемого по длине волны CO₂-лазера. При фиксированном положении дифракционной решетки спектрометр охватывает интервал длин волн примерно 0.6 мкм (диапазон волновых чисел около 50 см⁻¹) со спектральным разрешением примерно 0.02 мкм (что составляет примерно 0.2 см⁻¹), которое позволяет надежно разделить две соседние линии CO₂-лазера.

DOI: 10.31857/S0032816224060101 EDN: EKZJ1P

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие лазерных технологий лидарного зондирования атмосферы необходимо для совершенствования методов мониторинга метеорологического и экологического состояния атмосферы, а также детектирования загрязняющих и опасных газов [1–5]. При этом наибольший интерес представляет ИК-область спектра 2.5–14 мкм, где находятся как области прозрачности атмосферы, так и изолированные интенсивные линии поглощения основных и примесных атмосферных газов [6].

При спектроскопии в лабораторных условиях могут быть использованы различные методы: на основе перестраиваемых полупроводниковых лазеров [4], фурье-спектроскопия [5], спектроскопия на основе фемтосекундных частотных гребенок [7] и др. Эти методы могут давать рекордные точности спектральных измерений [7], однако вследствие небольшой мощности

излучения и других особенностей этих методов они трудно реализуемы в натурных условиях. Поэтому для лидарного зондирования атмосферы предпочтение отдается методу дифференциального поглощения с использованием мощных лазеров [2]. Этот метод основан на зондировании среды излучением с различными длинами волн, с различным поглощением на исследуемых газовых компонентах. Соответственно, в этом методе используются перестраиваемые по длине волны или многоволновые лазерные источники среднего ИК-диапазона, такие как CO-лазер [8], CO₂-лазер [2, 3, 9], или оптические параметрические генераторы [10].

Необходимо отметить, что лазерные лидары — это сложные комплексы, в которых, помимо лазерного источника, огромную роль имеют приемно-передающий блок, система регистрации и обработки сигнала. Для мониторинга атмосферы в реальном масштабе времени измерение сигнала на различных длинах

волн должно происходить одновременно либо с высокой скоростью сканирования по длине волны. В этом случае переход от видимого или ближнего ИК-диапазона в длинноволновую часть среднего ИК-диапазона (8–14 мкм) имеет ряд технических сложностей. Во-первых, обнаружительная способность (предел чувствительности) ИК-приемников падает с длиной волны, и на длине волны около 10 мкм она минимальна вследствие окружающего теплового излучения с температурой черного тела примерно 295 К [1]. Во-вторых, разнообразие и доступность различных фотоприемников среднего ИК-диапазона существенно ограничены, а сами приемники для достижения высокой чувствительности зачастую требуют глубокого охлаждения. В коммерческой доступности отсутствуют ИК-спектрометры, построенные на линейках приемников, которые более предпочтительны для измерения спектра многоволнового излучения в реальном масштабе времени, в том числе и для задач газового анализа.

Поэтому целью настоящей работы было создание компактного ИК-спектрографа на базе линейки пироэлектрических датчиков, охватывающего при фиксированном положении дифракционной решетки интервал длин волн,

соответствующий не менее одной полосе, Р- или R-ветви генерации CO₂-лазера (интервал волновых чисел около 25 см⁻¹) и со спектральным разрешением, позволяющим разделить соседние линии CO₂-лазера ($\Delta\nu \leq 0.2$ см⁻¹). Для тестирования спектрометра был запущен щелевой частотно-селективный CO₂-лазер с перестраиваемой длиной волны в диапазоне 9.2–10.8 мкм.

2. CO₂-ЛАЗЕР

В работе использовался лазерный модуль, конструкция которого подробно описана в работах [11, 12]. Ранее этот модуль использовался в качестве неселективного (многочастотного) CO₂-лазера, работающего в квазинепрерывном режиме с мощностью до 5 Вт [11, 12], спектр которого насчитывал около 10 линий в интервале длин волн 5–5.5 мкм. В работе [13] этот лазерный модуль был перестроен в частотно-селективный CO₂-лазер, работающий в режиме модуляции добротности резонатора. В этом случае он одновременно излучал до пяти спектральных линий в интервале длин волн 9.3–9.6 мкм в одном микросекундном импульсе. В настоящей работе на основе этого модуля был собран частотно-селективный щелевой CO₂-лазер, который

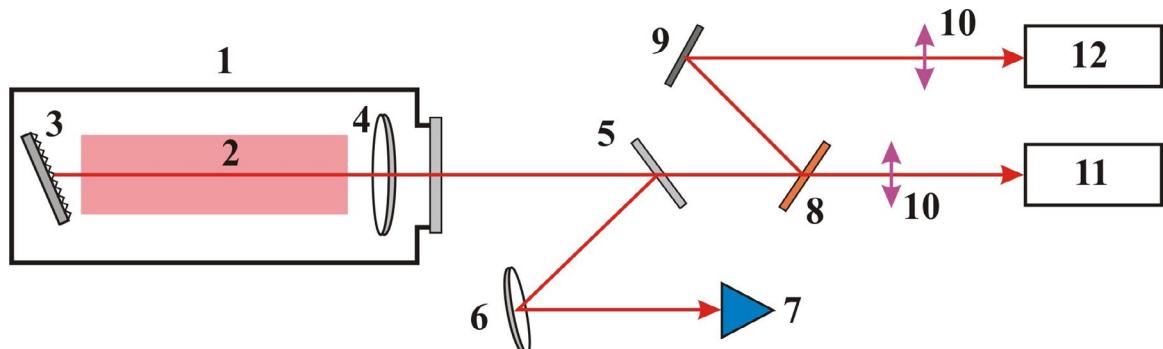


Рис. 1. Оптическая схема экспериментов: 1 — лазерная камера, 2 — активный объем, 3 — дифракционная решетка, 4 — выходное зеркало, 5 — пластина из BaF₂, 6 — фокусирующее зеркало, 7 — калориметр, 8 — пластина из ZnSe, 9 — плоское зеркало, 10 — линзы из BaF₂, 11 — калибранный спектрометр, 12 — спектрограф.

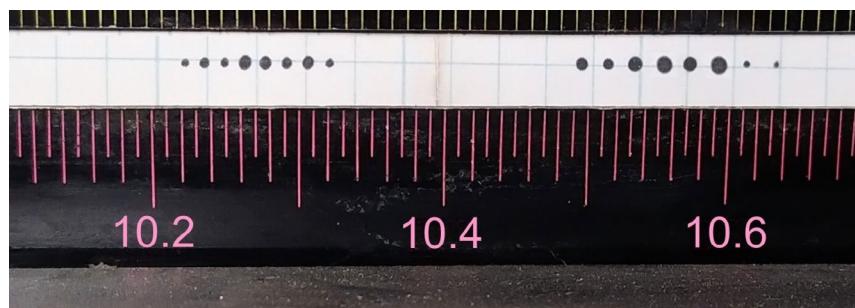


Рис. 2. Отпечаток спектра селективного CO₂-лазера на калиброванном спектрометре.

использовался для тестирования и калибровки спектрографа. В модуле использовались полые латунные электроды с рабочей поверхностью $250 \times 30 \text{ мм}^2$, охлаждаемые водой. Межэлектродный зазор составлял 5 мм.

Лазерный резонатор длиной 300 мм был образован дифракционной решеткой (100 штр/мм) и выходным сферическим зеркалом с радиусом кривизны $R = 2 \text{ м}$ и максимальным отражением примерно 94% в спектральном диапазоне 9.8–10.6 мкм. Перестройка длины волны излучения лазера осуществлялась поворотом дифракционной решетки. Часть вышедшего из резонатора излучения отводилась плоскопараллельной пластинкой из BaF₂ на калориметр Ophir 3A (Ophir Optronics Solutions Ltd., Израиль) для измерения мощности излучения лазера. Основная часть излучения направлялась на калиброванный спектрометр Laser spectrum analyzer Model 16A (Macken Instruments, Inc., США) для контроля спектра излучения лазера. Еще одна часть излучения отводилась плоскопараллельной пластинкой из ZnSe на новый спектрограф.

Для накачки активной среды (смесь Xe:CO₂:N₂:He = 2.5:10:10:30 мбар) использовался ВЧ-генератор с несущей частотой 40 МГц. Генератор работал в режиме с низкочастотной модуляцией выходной мощности с частотой 500 Гц, длительностью импульсов 0.3 мс и амплитудой выходной мощности 500 Вт. Максимальная средняя мощность излучения лазера достигала 200 мВт. Перестроечная характеристика спектра CO₂-лазера была определена с помощью калибровочного спектрометра. Отпечаток спектра селективного CO₂-лазера, записанный на термобумаге калиброванного спектрометра, при его перестройке по длинам волн в пределах полос 10P (длина волны примерно 10.6 мкм) и 10R (длина волны примерно 10.3 мкм) представлен на рис. 2. В этих условиях было зарегистрировано по восемь линий в каждой полосе. Полученная перестроечная характеристика лазера была использована для калибровки нового спектрографа.

3. КОНСТРУКЦИЯ ИК-СПЕКТРОГРАФА

Разработанный компактный спектрограф в сборе занимал объем $20 \times 10 \times 16 \text{ см}^3$ (длина × ширина × высота). Оптическая схема, а также внутреннее устройство спектрографа представлены на рис. 3. Лазерный луч 1 фокусируется внешней

линзой на входную щель спектрографа 2. Далее расходящийся лазерный пучок коллимируется сферическим серебряным зеркалом 3 (радиус кривизны 280 мм, апертура 40 мм) и направляется на дифракционную решетку 4. Дифракционная решетка имеет следующие параметры: 100 штр/мм, размеры $40 \times 50 \text{ мм}^2$. Она устанавливалась на поворотную платформу с регулировкой угла поворота микрометрическим винтом. Предельное спектральное разрешение дифракционной решетки (при использовании всей ее апертуры) $\lambda/\Delta\lambda = 100 \cdot 50 = 5000$. Спектральные компоненты, выделенные дифракционной решеткой, направлялись на второе сферическое зеркало 5 (радиус кривизны 280 мм, апертура 40 мм) и фокусировались на приемную площадку 6. Приемная площадка представляла собой линейную матрицу пироэлектрических приемников HPL 256I-100 (HEIMANN Sensor GmbH, Германия) на основе танталата лития (LiTaO₃). Матрица состояла из 256 элементов (пикселей) размером $42 \times 100 \text{ мкм}^2$ суммарной длиной 1.3 см. Матрица оснащена мультиплексором, включающим в себя малошумящие предусилители для каждого пикселя, аналоговые переключатели и выходной усилитель. Эта система обеспечивала отклик 540 кВ/Вт при модуляции излучения с частотой 1 Гц. Подробные технические характеристики этой матрицы пироэлектрических приемников могут быть найдены на сайте производителя [14].

Цифровые входы матрицы совместимы с CMOS. Максимальная частота модуляции сигнала до 512 Гц. Для измерения температуры детектора в корпус также встроен датчик температуры. Считывание данных и вывод на ПК осуществлялись контроллером и программным обеспечением Evaluation Kit (HEIMANN Sensor GmbH, Германия).

4. ТЕСТИРОВАНИЕ ИК-СПЕКТРОГРАФА

На рис. 4 представлен спектр CO₂-лазера, измеренный новым ИК-спектрографом при перестройке длины волны лазера. В этом случае было зарегистрировано большее число линий, чем с использованием калиброванного спектрометра, вследствие большей чувствительности первого. В полосе 10P было зарегистрировано 14 линий от 10P(8) ($\lambda = 10.47 \text{ мкм}$) до 10P(36) ($\lambda = 10.76 \text{ мкм}$). В полосе 10R было зарегистрировано 9 линий от 10R(10)

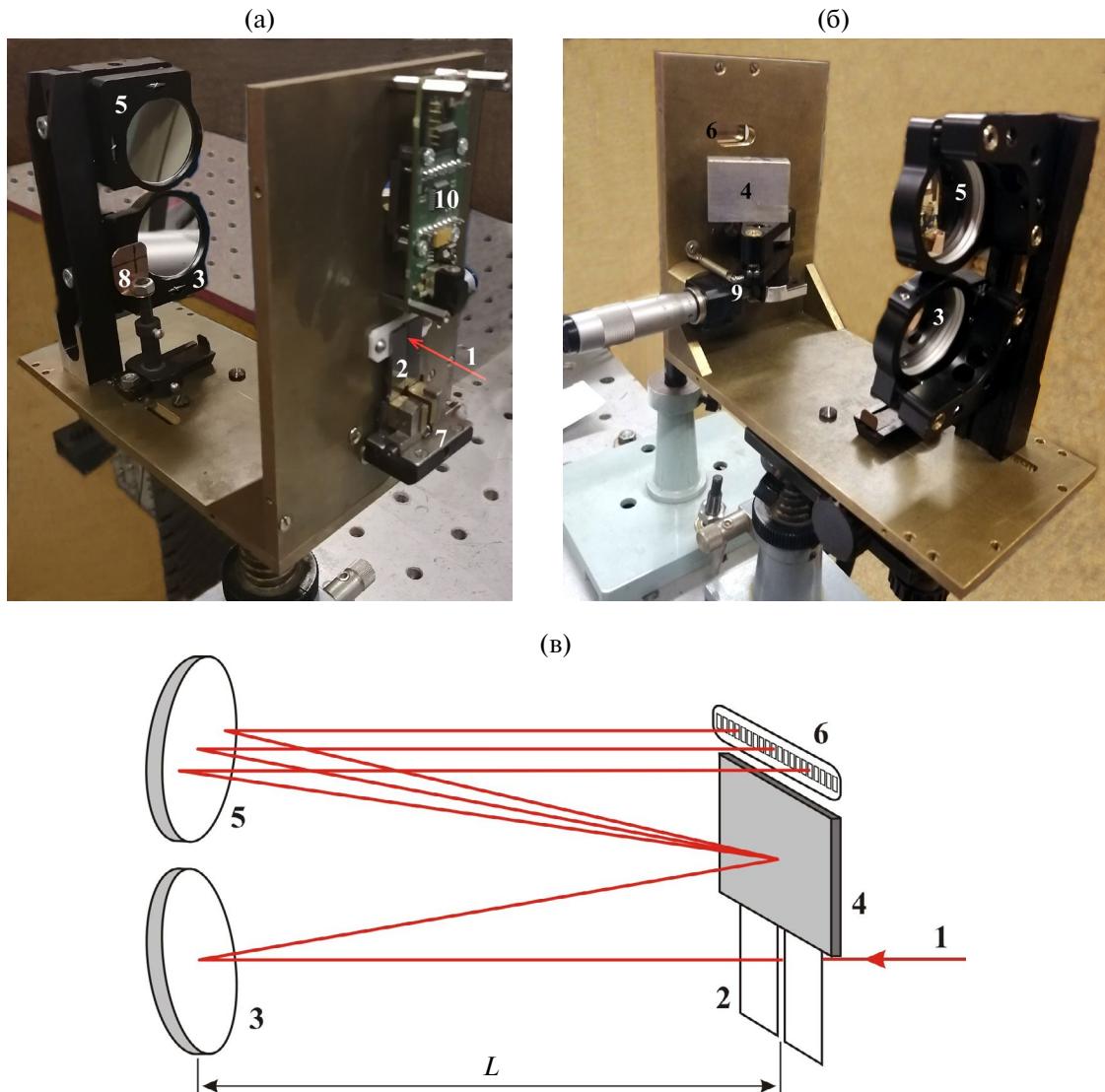


Рис. 3. Внутреннее устройство спектрографа: спектрографа: **а** — вид спереди, **б** — вид сзади, **в** — оптическая схема; 1 — лазерное излучение; 2 — входная щель; 3, 5 — вогнутые зеркала ($K8 + Ag, R = 280$ мм); 4 — дифракционная решетка (100 штр/мм); 6 — пироэлектрическая линейка (256 пикселей); $L = 140$ мм; 7 — механизм управления шириной щели; 8 — выдвижной “прицельный” маркер; 9 — микрометрический механизм управления углом поворота решетки; 10 — плата управления пироэлектрической линейкой.

($\lambda = 10.31$ мкм) до $10R(28)$ ($\lambda = 10.19$ мкм). Также было зарегистрировано 5 линий в полосе 9R и 6 линий в полосе 9P. Снижение мощности линий CO_2 -лазера в полосах 9P и 9R связано с суммарным уменьшением коэффициентов отражения дифракционной решетки и выходного зеркала в резонаторе лазера в этом диапазоне длин волн.

Также было измерено спектральное разрешение прибора. В этом случае CO_2 -лазер был юстирован таким образом, чтобы он работал одновременно на двух линиях: 10P(16) и 10P(18). Спектр двухчастотного излучения, измеренный новым спектрографом, представлен на рис. 5.

Этот рисунок показывает, что в соответствии с критерием Релея (две спектральные линии считаются разрешенными, если провал суммарного контура равняется 20% или более) спектральное разрешение нового спектрометра составляет примерно 0.02 мкм / 0.2 см $^{-1}$, что позволяет надежно разделить две соседние линии CO_2 -лазера. Необходимо отметить, что спектральное разрешение ограничивалось расстоянием между пикселями линейки — 50 мкм. Поэтому можно ожидать, что использование пироэлектрической линейки с 512 элементами позволит увеличить спектральное разрешение в 2 раза.

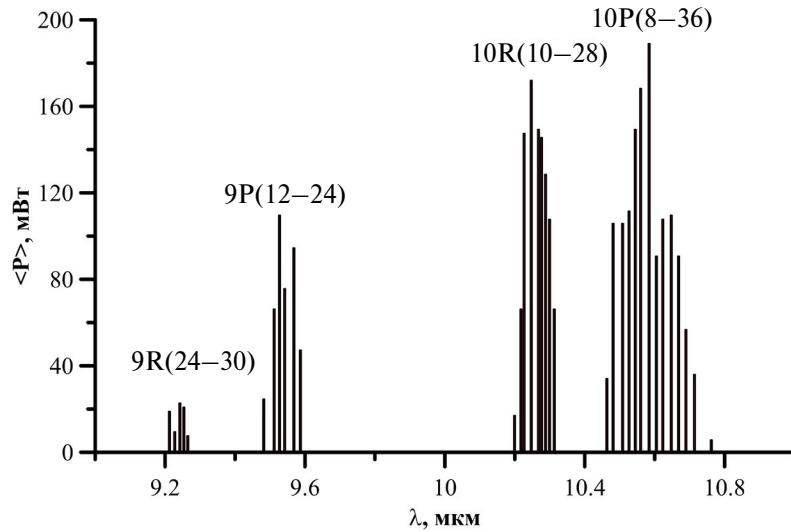


Рис. 4. Перестроечная диаграмма CO₂-лазера, измеренная новым спектрографом.

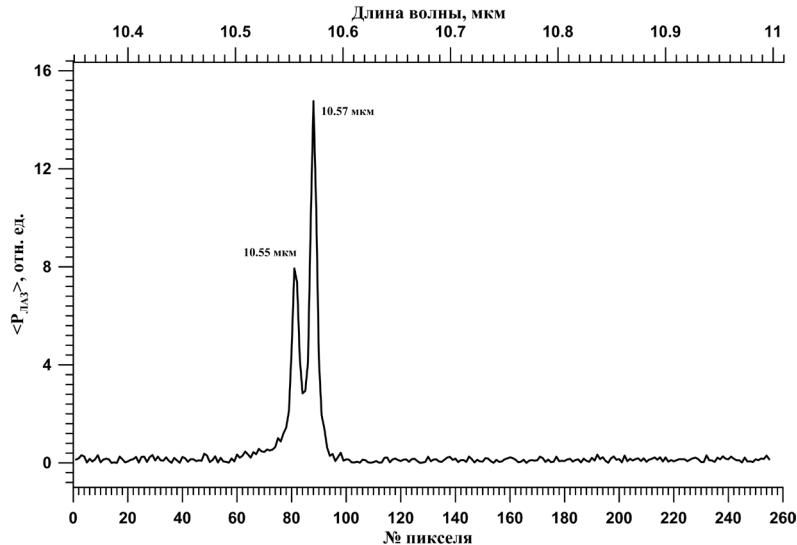


Рис. 5. Спектр двухчастотного CO₂-лазера, измеренный новым спектрографом.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан компактный ИК-спектрограф на базе линейки пироэлектрических датчиков, действующий в диапазоне длин волн 9–11 мкм и охватывающий при фиксированном положении дифракционной решетки интервал длин волн 0.6 мкм (диапазон волновых чисел 50 см⁻¹) со спектральным разрешением примерно 0.02 мкм (что составляет около 0.2 см⁻¹). Такой спектрограф полностью охватывает две основные полосы генерации CO₂-лазера и позволяет разделить и идентифицировать его две соседние линии. Это делает его весьма привлекательным инструментом для оперативного использования в лидарах дифференциального поглощения

на базе многочастотных (многоволновых) CO₂-лазеров. Во втором порядке дифракции решетки разработанный спектрограф может быть также использован для измерения спектра CO₂-лазера (длина волны 5–6 мкм) [11, 12, 15]. Другим направлением использования такого спектрографа является измерение спектральных характеристик мощных наносекундных и фемтосекундных лазерных систем среднего ИК-диапазона, работающих в моноимпульсном режиме [15, 16] или с низкой (около 10 Гц) частотой повторения импульса [17]. Также такой спектрограф может быть основой для разработки систем частотно-разрешенного оптического стробирования (FROG), необходимых для

диагностики ультракоротких лазерных импульсов, которые для длинноволнового излучения ($\lambda \sim 10$ мкм) на данный момент недоступны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10068, <https://rscf.ru/project/22-79-10068/>).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агашев Р.Р. Лидарный мониторинг атмосферы. Москва: Физматлит, 2009.
2. Васильев Б.И., Маннун У.М. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36(9). С. 801. <https://doi.org/10.1070/QE2006v036n09ABEH006577>
3. Борейшо А.С., Коняев М.А., Морозов А.В., Пикулик А.В., Савин А.В., Трилис А.В., Чакчир С.Я., Бойко Н.И., Власов Ю.Н., Никитаев С.П., Рожнов А.В. // Квантовая электроника 2005. Т. 35(12). С. 1167. <https://doi.org/10.1070/QE2005v035n12ABEH008962>
4. Шербакова А.В., Анфимов Д.Р. Фуфурин И.Л. и др. // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129(6). С. 747. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.06.50986.7k-21>
5. Michaels C.A., Masiello T., Chu P.M. // Applied Spectroscopy. 2009. V. 63(5) P. 538.
6. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A. et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110(9-10). P. 533. <https://doi.org/10.1366/000370209788346904>
7. Schliesser A., Picqué N., Hänsch T.W. // Nature Photonics. 2012. V. 6. P. 440. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.142>
8. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Kotkov A.A., Sinitsyn D.V., Andreev Y.M. // Applied Spectroscopy. 2022. V. 76(12). P. 1504. <https://doi.org/10.1177/00037028221119837>
9. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Stepanishchev V.V., Khafizov I.Z. // Journal of Physics: Conference Series. 2017. V. 941(1). P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/941/1/012004>
10. Yakovlev S., Sadovnikov S., Kharchenko O., Kravtsova N. // Atmosphere. 2020. V. 11(1). P. 70. <https://doi.org/10.3390/atmos11010070>
11. Ионин А.А., Козлов А.Ю., Селезнев Л.В., Синицын Д.В. // Препринт ФИАН. 2008. №1. С. 1.
12. Ионин А.А., Козлов А.Ю., Селезнев Л.В., Синицын Д.В., // Квантовая электроника. 2009. Т. 39(3). С. 229. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n03ABEH013811>
13. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y., Sagitova A.M., Sinitsyn D.V., Rulev O.A., Badikov V.V., Badikov, D.V. // Optics Express. 2019. V. 27(17). P. 24353. <https://doi.org/10.1364/OE.27.024353> <https://www.heimannsensor.com/pyroelectric-sensors>
14. Andreev Y.M., Budilova O.V., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y. // Optics Letters. 2015. V. 40(13). P. 2997. <https://doi.org/10.1364/OL.40.002997>
15. Polyanskiy M.N., Pogorelsky I.V., Babzien M., Palmer M.A. // OSA Continuum. 2020. V. 3(3). P. 459. <https://doi.org/10.1364/OSAC.381467>
16. Kinyaevskiy I.O., Koribut A.V., Seleznev L.V., Klimachev Y.M., Dunaeva E.E., Ionin A.A. // Optics & Laser Technology. 2024. V. 169. P. 110035. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110035>