

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ НА ОСНОВЕ ИК-ПГС

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, зав. кафедрой специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383)361-07-31, e-mail: v.s.ayrapetyan@sgga.ru

Александр Викторович Макеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, аспирант, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

Предложена схема кольцевого резонатора ИК-ПГС для дистанционного обнаружения и идентификации взрывчатых веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния. Проведены расчетные исследования по дистанционной идентификации спектроскопических параметров некоторых взрывчатых веществ (TNT).

Ключевые слова: лидар, перестраиваемый генератор света, метод дифференциального поглощения и рассеяния, нелинейный кристалл, HGS, взрывчатое вещество, TNT, тротил.

DETECTION AND IDENTIFICATION OF EXPLOSIVES BY DIFFERENTIAL ABSORPTION AND SCATTERING BASED ON IR-OPO

Valerik S. Hayrapetyan

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., D. Sc, Head of the Department of Special Devices, Innovation and Metrology, phone: (383) 361-07-31, e-mail: v.s.ayrapetyan@sgga.ru

Alexander V. Makeev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plahotnogo St., Ph. D. student, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

An IR-OPO ring resonator circuit for remote detection and identification of explosives by differential absorption and scattering is proposed. Computational studies on the remote identification of the spectroscopic parameters of some explosives (TNT) were carried out.

Key words: lidar, tunable light generator, differential absorption and scattering method, non-linear crystal, HGS, explosive, TNT.

Введение

В мире наблюдается тенденция к росту терроризма. Так военная доктрина Российской Федерации в пункте 12 (к) относит растущую угрозу глобального экстремизма (терроризма) и его новых проявлений в условиях недостаточно эффективного международного антитеррористического сотрудничества, реальную

угрозу проведения терактов с применением радиоактивных и токсичных химических веществ, к основным внешним военным опасностям, угрожающим нашей стране. Оптические методы обнаружения взрывчатых веществ с использованием лазерного излучения в диапазоне 1,41-9,0 мкм обладают рядом преимуществ перед широко распространенными контактными методами обнаружения взрывчатых веществ. Поэтому задача создания новых высокоэффективных комплексов дистанционного обнаружения и идентификации взрывчатых веществ, основанных на методах лазерной ИК-спектроскопии для оснащения специальных служб РФ, является крайне актуальной для обеспечения безопасности и обороноспособности нашей страны.

В связи с актуальностью рассматриваемой проблемы активно ведутся работы по совершенствованию и разработке новых методов обнаружения взрывчатых веществ.

Тринитротолуол (тротил, TNT) – известное бризантное взрывчатое вещество. В работе [2] был проведен спектрохимический анализ и квантово-химический расчет гибридными функционалами B3LYP и базисным набором

3-21G в компьютерной программе GaussView. Был получен спектр поглощения и значения частот и интенсивностей колебательно-вращательных переходов молекулы. Основные характеристики TNT представлены в табл. 1.

Таблица 1

Название	Состав	Плотность	Теплота взрыва, кДж/кг	Скорость стационарной детонации, Км/с	Давление в точке Чем-пена-Жуге, ГПа	Температура плавления, °С
Тротил (TNT)	Тринитротолуол	1,06-1,64	3570-4330	5,25-6,95	11,0-19,0	80,85

Для поиска информативных спектральных линий для тринитротолуола был получен и смоделирован спектр высокого разрешения молекулы воды с заданными параметрами и получена функция поглощения в информационной системе «Спектроскопия атмосферных газов» (SPECTRA) [10], которая использует HITRAN и GEISA. Для моделирования молекулы воды (H₂O) в диапазоне волновых чисел от 1000 до 2000 см⁻¹ были выбраны следующие параметры: температура T = 296 К, давление p = 1 атм., шаг вычислений 1 см⁻¹.

Методы и материалы

В работе предложен метод обнаружения и идентификации взрывчатых веществ на основе лидарного комплекса, использующего в качестве источника излучения инфракрасный параметрический генератор света (ИК-ПГС). Рассматриваемый метод основан на том, что в средней ИК области, от 2500 см⁻¹ (4 мкм) до 1100 см⁻¹ (9 мкм), колебательно-вращательные спектры поглощения молекул TNT обладают высокой специфичностью, определяемой их симметрией и химическим составом, что позволяет с достаточной точностью относить отдельные

спектральные линии к вполне определенному химическому соединению. Именно в этой области спектра находятся фундаментальные колебательно-вращательные переходы молекул практически всех известных взрывчатых веществ.

На рисунке 1 представлена схема лидарного комплекса для дистанционного обнаружения взрывчатых веществ

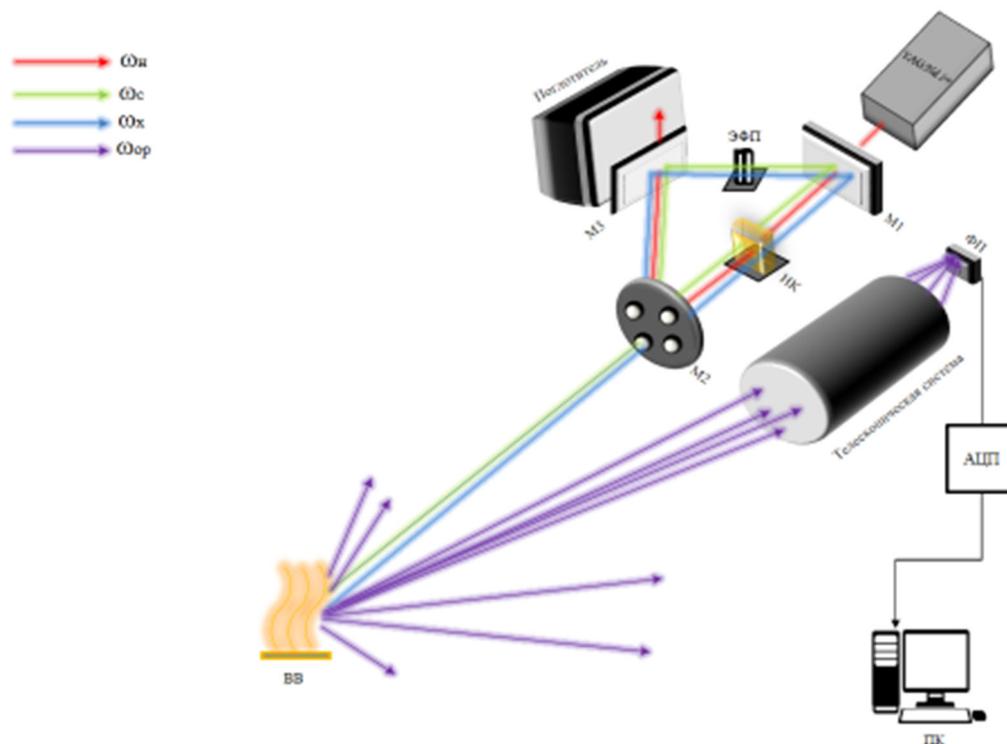


Рис. 1. Схема ИК-параметрического лидарного комплекса

Источником накачки служит импульсный YAG: Nd³⁺ – лазер, плавная перестройка частоты ω_c , ω_x осуществляется посредством поворота нелинейного кристалла (НК) из HGS, сам резонатор выполнен по кольцевой схеме и состоит из зеркал M1, M2, M3, причем зеркало M2 выполнено в виде набора зеркал, размещенных на револьверном механизме, для оптимизации коэффициента отражения, а зеркало M3 имеет пропускание на частоте ω_n излучения накачки, которое попадает в специально установленный поглотитель, обеспечивая тем самым оптимальный режим работы диспергирующего элемента в виде эталона Фабри-Перо (ЭФП), АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ПК - персональный компьютер [14]

Сам метод поиска и обнаружения взрывчатого вещества (ВВ) основан на принципе дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР). С помощью установки, посредством плавной перестройки частоты излучения, лазерный импульс, проходя через взрывчатое вещество, устанавливается на максимуме линии поглощения в т. В, затем, на крыле этой линии в т. А (рис. 2).

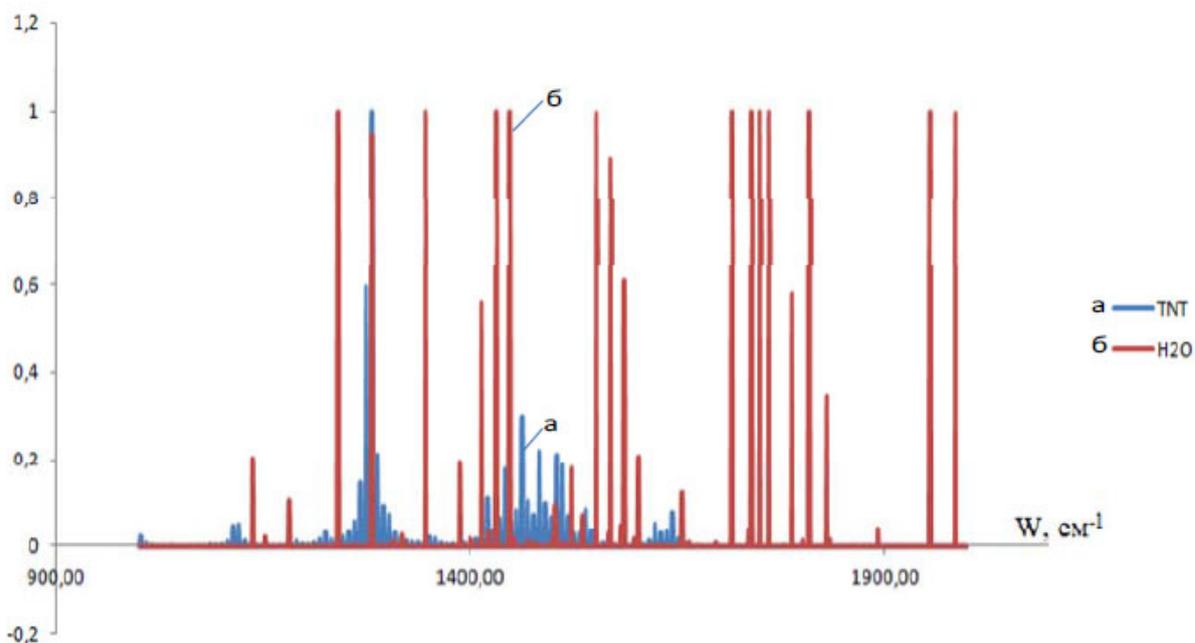


Рис. 2. ИК-фурье график функции поглощения TNT и H₂O в инфракрасном диапазоне частот от 3500 до 500 см⁻¹.

Сигналы двух импульсов регистрируются фотодетектором и сравниваются в АЦП. Дифференциальное значение этих двух сигналов выводится на монитор ПК в виде колебательно - вращательных спектров поглощения молекулами ВВ. Метод ДПР обладает наилучшей чувствительностью при зондировании определенных составляющих с больших расстояний [14,15,16].

Расчет полуширины лазерного излучения выполнен по формуле:

$$\Delta\vartheta = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_0^2}. \quad (1)$$

На основе интенсивностей были вычислены объемные коэффициенты обратного рассеяния $\beta(\lambda_0, R)$ на длине волны λ_0 и расстоянии до объекта R , а затем получено значение минимальной выходной энергии зондирующего лазера для детектирования минимальной концентрации ВВ в соответствии с формулой

$$E_{Lmin} \approx \frac{2R^2 \cdot \left(\frac{C}{Ш}\right)_{min}}{\beta(\lambda_0 R) \cdot \xi(\lambda_0) \cdot U(\lambda_0)} \exp \left[2 \int_0^R k(\lambda_0 R) dR \right], \quad (2)$$

где $C/Ш$ – отношение интенсивности сигнала к шуму; $\xi(\lambda_0)$ – коэффициент спектрального пропускания приемной оптической системы; $U(\lambda_0)$ – параметр чувствительности приемной системы; $k(\lambda_0, R)$ – коэффициент ослабления на соответствующей длине волны λ_0 .

Учитывая, что отношение интенсивности сигнала к шуму (С/Ш) для данной системы равно 1,5, зная величины параметров лазерной установки ($\xi(\lambda_0) = U(\lambda_0) = 1$), с учетом проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях ($R = 5$ см) по формуле (1) получим, что минимально необходимая энергия зондирующего лазера будет равна 10 мДж.

По значениям минимальной выходной энергии зондирующего сигнала, объемного коэффициента обратного рассеяния и расстояния до объекта вычислена интенсивность прошедшего сигнала (E) через молекулы вещества, TNT по формуле Бэра:

$$E = E_{Lmin} \cdot e^{-\beta R}. \quad (3)$$

Величина концентрации органических веществ $N(R)$ в объеме газа, определяемая методом ДПР рассчитана по формуле:

$$N(R) = \frac{1}{2\sigma_A(\lambda_0 - \lambda_1)} \left\{ \frac{d}{dR} \left[\ln \frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_0, R)} - \ln \frac{\beta(\lambda_1, R)}{\beta(\lambda_0, R)} \right] + k(\lambda_1, R) - k(\lambda_0, R) \right\} \quad (4)$$

Результаты

Расчеты спектроскопических параметров для веществ TNT, TATR, DNT представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета спектроскопических параметров ВВ

Наименование вещества	Максимальная частота поглощения, ν (см ⁻¹)	Длина волны, λ (мкм)	Полуширина излучения, $\Delta\nu$ (см ⁻¹)	Коэффициент поглощения, α (см ⁻¹)	Концентрация веществ, ppm
TNT	1850±0,7	5,405	56,1±1	1,78·10 ⁻¹¹	10

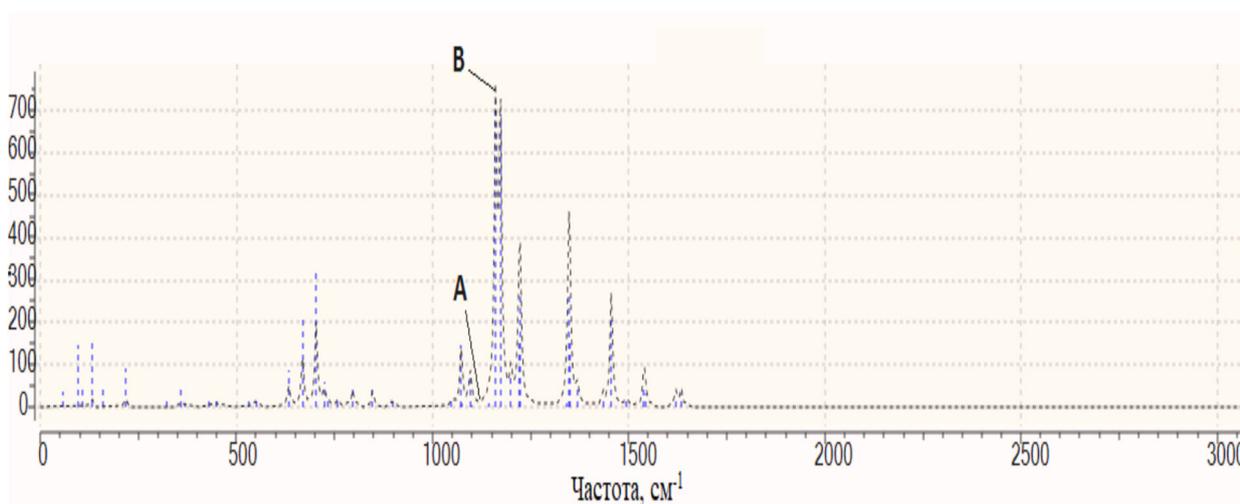


Рис. 3 Моделирование спектра TNT в средней ИК-области

Заключение

Таким образом в работе проведены, расчеты пороговых значений концентраций ВВ обнаруживаемых методом ДПР, предложена схема ИК-параметрического лидарного комплекса для обнаружения и идентификации ВВ методом ДПР, представлены расчетные спектроскопические параметры для ВВ типа TNT.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №19-45-700003)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кихтенко А.В., Елисеев К.В. Обнаружение взрывоопасных объектов: аппаратное обеспечение антитеррористических служб // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2005, Т. XLIX №4 – 132-137 С.
2. E. Сесо, Н. Ötnerud, D. Menning, J.L. Gilljam, P. Baath, Н. Östmark, Stand-off imaging Raman spectroscopy for forensic analysis of post-blast scenes – Trace detection of ammonium nitrate and 2,4,6-trinitrotoluene. – Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives Sensing XV, *Proc. of SPIE*, Vol. 9073, 90730G. – 2014. – pp. 1-9.
3. Zachhuber B., Ramer G., Horbo A., Lendl B., Stand-off Raman spectroscopy of explosives, *Proc. of SPIE*, Vol. 7838, 78380F (2010), p. 1-10.
4. Katz O., Natan A., Silberberg Y., Rosenwaks S. Standoff detection of trace amounts of solids by nonlinear Raman spectroscopy using shaped femtosecond pulses // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92, N 17. P. 171116.
5. Wynn C. M.; Palmacci S.; Kunz R. R.; Rothschild M. A Novel Method for Remotely Detecting Trace Explosives. – *Lincoln Laboratory Journal*, 17, №2, (2008), pp. 27–39.
6. Wynn C.M., Palmacci S., Kunz R.R., Aernecke M. Noncontact optical detection of explosive particles via photodissociation followed by laser-induced fluorescence // *Opt. Express*. 2011. V. 19, N 19. P. 18671–18677.
7. Mukherjee A., Porten S., Patel C.K.N. Standoff detection of explosive substances at distances of up to 150 m // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. N 11. P. 2072–2078.
8. Кузовникова Л.В. Определение характеристик оптико-электронного комплекса обнаружения следов ВВ. / Л.В. Кузовникова, Е.В. Максименко // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2017. – № 3. – С. 74–77.
9. Morales-Rodríguez M. E., Senesac L., Thundat T., Rafailov M. K., Datskos P. G. Standoff imaging of chemicals using IR spectroscopy. – *Proc. of SPIE*, Vol. 8031, 80312D (2010), pp. 1–8.
10. Ruxton K., Robertson G., Miller W., Malcolm G.P.A., Maker G.T. Mid-infrared hyperspectral imaging for the detection of explosive compounds. – *Proc. of SPIE* Vol. 8546, 85460V (2012), pp. 1-9.
11. Bernacki B. E., Blake T.A., Mendoza A., Johnson T.J. Visible hyperspectral imaging for standoff detection of explosives on surfaces. – *Proc. of SPIE* Vol. 7838, 78380C (2010), pp. 1-7.
12. Hempler N., Nicholls J., Malcolm G. Active hyperspectral sensing and imaging for remote spectroscopy applications (2013) <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-11/features/spectral-imaging-active-hyperspectral-sensing-and-imaging-for-remote-spectroscopy-applications.html>.
13. Спектрохимические особенности некоторых бризантных взрывчатых веществ в парообразном состоянии / Набиев Ш.Ш., Ставровский Д.Б., Палкина Л.А., Збарский В.Л., Юдин

Н.В., Голубева Е.Н., Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Собакинская Е.А., Черняева М.Б. //Оптика атмосферы и океана, 2013, 26 №4 – С. 273-285.

14. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Обнаружение и измерение параметров наркотических веществ с помощью перестраиваемого ИК-лазера // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2014» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 199–204.

15. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Лазерное зондирование в задаче обнаружения и измерения параметров наркотических веществ // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 2 (26). –С. 40–46.

16. Айрапетян В. С., Маганакова Т. В. Расчет концентрации наркотических веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 141–147.

© В. С. Айрапетян, А. В. Макеев, 2020