

МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ВЕЩЕСТВ В БЛИЖНЕМ И СРЕДНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

Валерик Сергеевич Айрапетян

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, заведующий 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 лидарного комплекса для дистанционной идентификации взрывчатых веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния. Проведены расчетные исследования по дистанционному исследованию спектроскопических параметров некоторых опасных химических веществ

Ключевые слова: лидар, перестраиваемый генератор света, метод дифференциального поглощения и рассеяния, нелинейный кристалл, HGS, наркотическое вещество

METHOD FOR REMOTE DETECTION OF HAZARDOUS SUBSTANCES IN THE NEAR AND MIDDLE IR RANGE

Valerik S. Ayrapetyan

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

Alexander V. Makeev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant of Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

A scheme of a lidar complex for remote identification of explosives by the method of differential absorption and scattering is proposed. Calculation studies on remote sensing of spectroscopic parameters of some hazardous chemicals have been carried out.

Keywords: lidar, tunable light generator, differential absorption and scattering method, nonlinear crystal, HGS

Введение

Оптические методы обнаружения опасных сложных органических молекул с использованием лазерного излучения в диапазоне 1,4 – 5,8 мкм обладают рядом преимуществ перед широко распространенными контактными методами детектирования веществ. Поэтому задача создания новых высокоэффективных комплексов дистанционного обнаружения и идентификации веществ, основанных на

методах лазерной ИК-спектроскопии для оснащения специальных служб РФ является крайне актуальной для обеспечения безопасности страны.

На данный момент исследуются и разрабатываются новые методы для точного и оперативного анализа опасных веществ в атмосфере, к ним можно отнести: метод импульсной терагерцовой спектроскопии, метод терагерцовой спектроскопии на основе квантово-каскадных лазеров [1], также активно ведутся исследования методов диодной лазерной спектроскопии, лазерно-индуцированной флуоресценции, лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, лазерной оптико-акустической спектроскопии [2].

Методы и материалы

В работе представлен новый метод обнаружения и идентификации веществ на основе лидарного комплекса, использующего в качестве источника излучения инфракрасный параметрический генератор света (ИК-ПГС).

Большое число сложных органических соединений относятся к классу летучих и характеризуются высоким давлением паров, вследствие чего они могут быть обнаружены при анализе компонент атмосферы. Результаты ранее проведенных исследований [4–6] свидетельствуют, что основные колебательно-вращательные полосы поглощения (пропускания) излучения опасных органических соединений, таких как взрывчатые и наркотические вещества, лежат в ближней и средней инфракрасной (ИК) области длин волн (от 1 до 8 мкм). В данном спектральном диапазоне колебательно-вращательные спектры поглощения молекул сложных органических веществ обладают высокой специфичностью, которая определяется их химическим составом и симметрией, что позволяет с высокой точностью относить отдельные спектральные линии к вполне конкретному химическому соединению.

На рис. 1 представлена схема лидарного комплекса для дистанционного обнаружения сложных органических молекул.

Источником накачки параметрического генератора света служит импульсный YAG:Nd³⁺ – лазер, плавная угловая перестройка частоты сигнальной и холостой волны ω_c , ω_x осуществляется посредством поворота нелинейного кристалла (НК) из тригалллата ртути (HGS), конструктивно резонатор представляет собой кольцевую схему и состоит из трех зеркал M1, M2, M3. Важно отметить, что зеркало M2 выполнено в виде набора зеркал, размещенных на револьверном механизме, такое решение обусловлено необходимостью оптимизации коэффициента отражения, для достижения максимальной энергии в выходном импульсе ПГС, зеркало M3 имеет пропускание на частоте ω_n излучения накачки, которое попадает в специально установленный поглотитель, предотвращая тем самым повреждение мощным излучением лазера накачки диспергирующего элемента в виде эталона Фабри-Перо (ЭФП), а также обеспечивая оптимальный режим его работы.

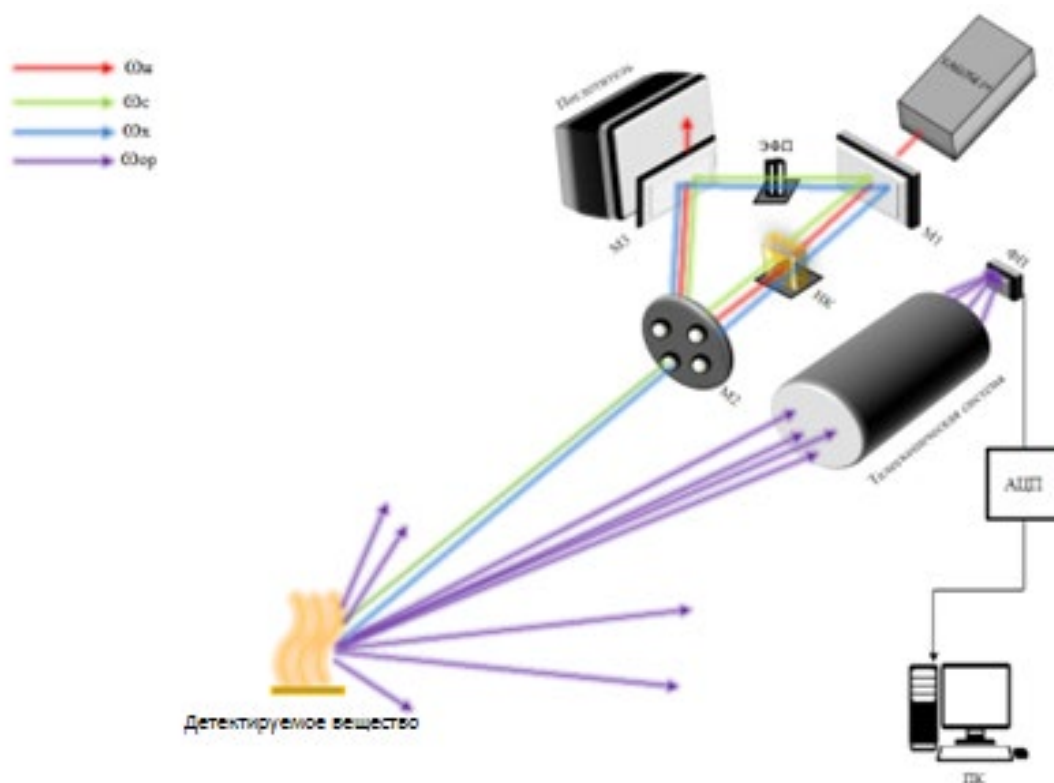


Рис. 1. Схема ИК-параметрического лидарного комплекса

При прохождении импульсного излучения ПГС через вещество часть излучения поглощается молекулами данного вещества. Посредством плавной перестройки частоты излучения первый импульс, генерируемый ПГС, устанавливается на максимум линии поглощения молекулой вещества. Следующий импульс ПГС перестраивается на крыло этой линии поглощения. Обратнo-рассеянное излучение принимается с помощью телескопической системы, выполненной по схеме Ньютона. Сигналы двух импульсов регистрируются фотодетектором, установленным в фокусе телескопа, и сравниваются в аналого-цифровом преобразователе (АЦП). Дифференциальное значение этих двух сигналов выводится на монитор ПК в виде колебательно-вращательных спектров поглощения молекулами вещества. ИК-спектр наркотического вещества JWN-250 представлен на рис. 2.

Расчет полуширины лазерного излучения выполнен по формуле:

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

На основе интенсивностей вычисляются объемные коэффициенты обратного рассеяния $\beta(\lambda_0, R)$ на длине волны λ_0 при расстоянии до объекта R . С учетом

этих данных получено значение минимальной выходной энергии ПГС для обнаружения минимальной концентрации вещества, определяемой как:

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

где $C/\text{Ш}$ – 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 .

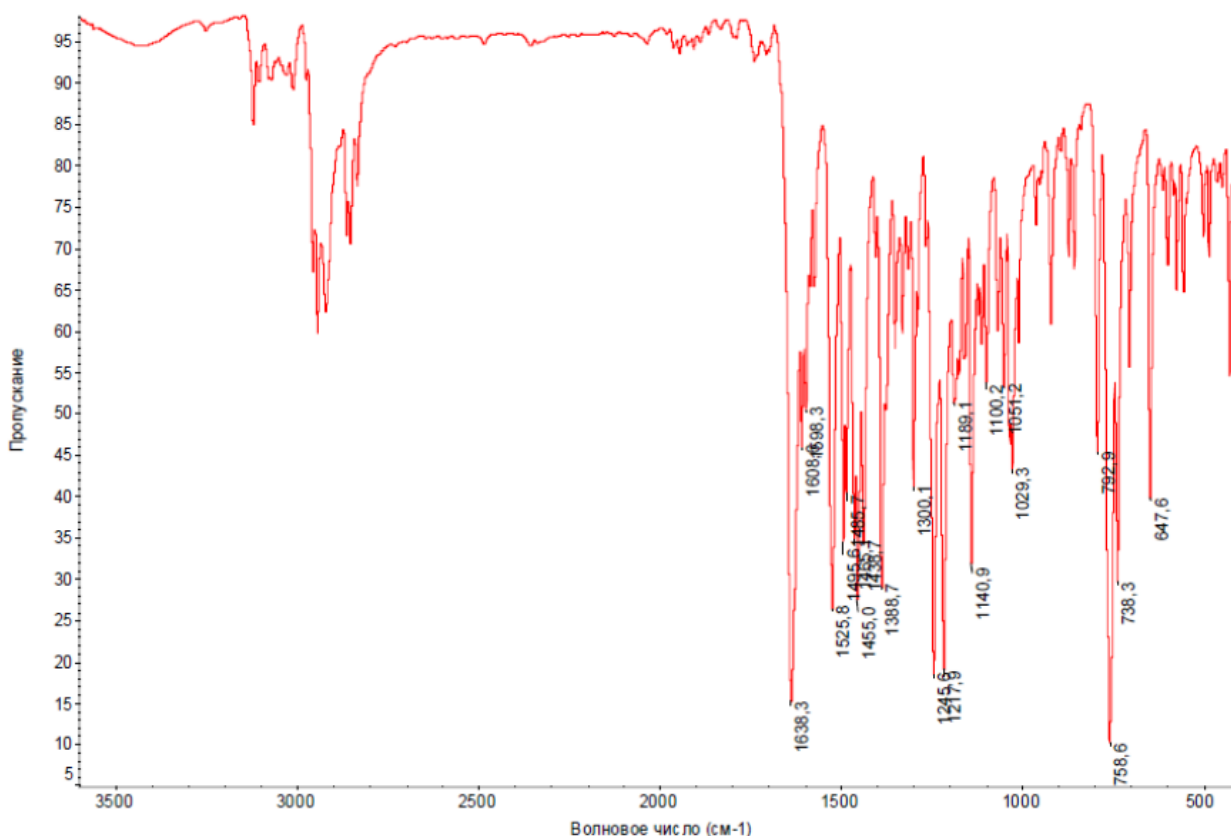


Рис.2. ИК-спектр JWN-250

Учитывая, что отношение интенсивности сигнала к шуму для данной системы равно 1,5, зная величины параметров ПГС ($\xi(\lambda_0) = U(\lambda_0) = 1$), 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.

Учитывая значение минимальной выходной энергии сигнала ПГС, объемного коэффициента обратного рассеяния, а также расстояния до объекта интенсивность прошедшего сигнала (E) через молекулы вещества, может быть вычислена по формуле Бэра:

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

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

Результаты вычисления значений полуширины спектров поглощения ($\Delta\nu$) и энергии прошедшего излучения (E), а также концентрации молекул ($N(R)$) и относительного числа молекул (n) для вещества JWN-250 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета спектроскопических параметров JWN-250

Номер ветви	Полоса поглощения, ν (см^{-1})	Длина волны, λ (мкм)	Полуширина излучения, $\Delta\nu$ (см^{-1})	Коэффициент поглощения, α (см^{-1})	Концентрация НВ
1	2835,29–2870,59	3,505	40,7	$2,38 \cdot 10^{-12}$	$0,44 \cdot 10^{-14}$
2	2905,88–2947,06	3,42	42,75	$11,66 \cdot 10^{-12}$	$2,17 \cdot 10^{-14}$
3	2929,41–2961,76	3,39	26,105	$4,12 \cdot 10^{-12}$	$0,77 \cdot 10^{-14}$

Заключение

В работе представлена принципиальная схема лидарного комплекса для обнаружения и идентификации опасных веществ методом ДПР. Представлены результаты расчетов спектроскопических параметров наркотического вещества JWN-250. Результаты расчетов говорят о высокой эффективности и перспективности данного метода.

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. – С. 132–137.
2. E. Ceco, H. Ötnerud, D. Menning, J.L. Gilljam, P. Baath, H. 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., Senesaca 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 паробразном 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, 2021