

ЛАЗЕРНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ

В. С. Айрапетян

УДК 535.33/.34

Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10, Россия; e-mail: v.hayr100011@mail.ru

(Поступила 6 мая 2017)

Разработан, создан и испытан многофункциональный ИК параметрический лазерный комплекс для дистанционного обнаружения и идентификации атмосферных газов, в том числе взрывчатых и химически агрессивных веществ. Проведены расчет и экспериментальные исследования по дистанционному определению спектроскопических параметров наиболее известных взрывчатых веществ TNT, RDX, PETN. Показана возможность высокочувствительного детектирования (~1 ppm) этих веществ с помощью многофункционального ИК параметрического генератора света методом дифференциального поглощения и рассеяния.

Ключевые слова: параметрический лазер, взрывчатые вещества, нелинейный кристалл, дифференциальное поглощение и рассеяние.

A multifunctional IR parametric laser complex for remote detection and identification of atmospheric gases, contained in small amounts, as well as explosive and chemically aggressive substances, was developed and tested. Calculations and experimental studies on the remote determination of the spectroscopic parameters of the most known explosives, including TNT, RDX, PETN, were carried out. The possibility of high-sensitivity (~ 1 ppm) detection of the substances with the help of a multifunctional IR OPO by the method of differential absorption and scattering is shown.

Keywords: parametric laser, explosives, nonlinear crystal, differential absorption and scattering.

Введение. За последние десятилетия возросло количество публикаций, посвященных различным способам дистанционного обнаружения и идентификации взрывчатых веществ (ВВ) [1—3]. Большинство из них представляет практический интерес для создания чувствительных детекторов ВВ, необходимых для решения одной из самых актуальных государственных задач — обеспечения национальной безопасности в борьбе с различными проявлениями террористической деятельности. Особое место занимают методы, основанные на лазерных технологиях [4—7]. Они способны оперативно, локально и с высокой чувствительностью обнаруживать и идентифицировать следовые количества практически всех известных ВВ.

Принцип лазерного зондирования заключается в том, что после взаимодействия электромагнитного излучения с ВВ в прошедшем и рассеянном (в том числе в обратном направлении) излучении содержится информация о структуре, составе, концентрации и других параметрах данного ВВ. Количество полученной информации возрастает на несколько порядков, если частота излучения лазера совпадает с собственной частотой колебания исследуемого ВВ. Хорошо известно [2, 8], что фундаментальные колебательно-вращательные (КВ) полосы поглощения наиболее известных ВВ находятся в среднем ИК диапазоне (6—8 мкм) (рис. 1), а некоторые интенсивные изолированные вращательные линии — в ближнем ИК диапазоне (1.4—1.8 мкм).

LASER BASED REMOTE SENSING OF EXPLOSIVES BY THE METHOD OF DIFFERENTIAL ABSORPTION AND SCATTERING

V. S. Ayrapetyan (Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10 Plachotnogo Str., Novosibirsk, 630108, Russia; e-mail: v.hayr100011@mail.ru)

В связи с этим наиболее привлекательно зондирование ВВ методом дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) с помощью ИК параметрического генератора света (ИК ПГС), позволяющего плавно и/или дискретно перестраивать частоту излучения от импульса к импульсу. Требования, предъявляемые к разработке и созданию многофункционального и компактного лазерного комплекса для зондирования ВВ на основе ИК ПГС, включают в себя теоретическое исследование и анализ экспериментально измеренных параметров КВ спектров поглощения ВВ в диапазоне 1—8 мкм и расчет обратно рассеянного лазерного сигнала с учетом факторов, искажающих КВ спектры поглощения ВВ в открытой атмосфере [9] (рис. 1); теоретическое исследование амплитудно-временных, пространственных и спектральных характеристик ИК ПГС; разработку математического алгоритма и пакета программ для моделирования многофункционального ИК лазерного комплекса, иллюстрирующего виртуальное дистанционное детектирование ВВ; создание и испытание экспериментальной многофункциональной лазерной системы на основе ИК ПГС, позволяющего плавно и/или дискретно перестраивать частоту излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах (1.41—8.8 мкм), для дистанционного зондирования ВВ.

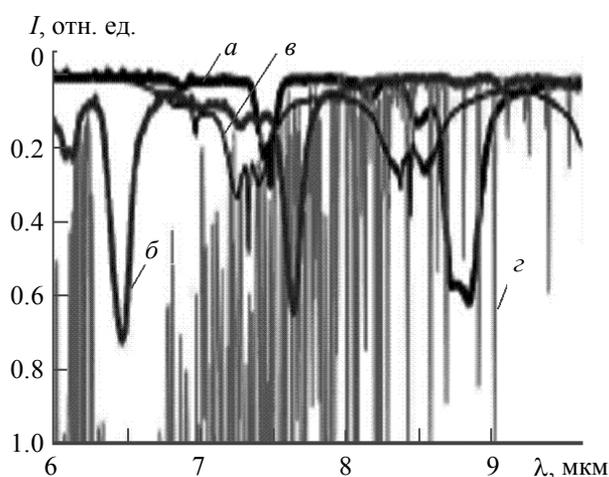


Рис. 1. ИК спектры поглощения ТАТР (а), ТНТ (б), этилена (в) и паров воды (з) [9]

В данной работе исследованы амплитудно-временные и спектральные характеристики ИК ПГС, а также представлены экспериментальные и расчетные данные спектральных параметров ВВ в открытой атмосфере.

Параметрические генераторы света. Дистанционное обнаружение и идентификация ВВ методом ДПР требуют исследования амплитудно-временных и спектральных характеристик лазеров, позволяющих перестраивать частоту излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах (1—9 мкм). Одна из возможностей получения перестраиваемого лазерного излучения в этих диапазонах — использование параметрического преобразования на основе нелинейных кристаллов (НК). Ограниченная прозрачность и снижение коэффициента нелинейности от длины волны кристаллов не позволяют реализовать перестройку частоты излучения лазера во всем диапазоне на одном НК.

Одно из технических решений предполагает создание ИК ПГС с общей накачкой на основе импульсного YAG:Nd³⁺-лазера ($\lambda = 1.064$ мкм) с двумя сменными преобразователями частоты: кольцевым резонатором на активном элементе из кристалла ниобата лития (LiNbO₃) или калий-титанила фосфата (КТР), осуществляющим перестройку частоты в ближнем и среднем ИК диапазонах (1.41—4.24 мкм); линейным резонатором на активном элементе из кристалла тиогалата ртути (HgGa₂S₄) или тиогалата серебра (AgGaS₂), осуществляющим перестройку частоты в среднем и дальнем ИК диапазонах (2.7—9.0 мкм).

ПГС с перестройкой частоты излучения в диапазон 1.41—4.24 мкм. В работах [10, 11] описана оптическая схема трехзеркального кольцевого резонатора ПГС для высокоэффективного преобразования частоты основного излучения лазера накачки в сигнальную и холостую волны. На рис. 2 представлена усовершенствованная оптическая схема кольцевого резонатора ПГС с активным элементом из НК LiNbO₃.

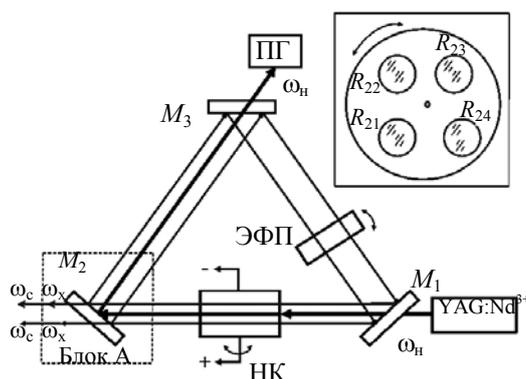


Рис. 2. Оптическая схема кольцевого резонатора ИК ПГС: YAG:Nd³⁺ — лазер накачки; НК — нелинейный элемент из кристалла LiNbO₃; M₁, M₂, M₃ — зеркала кольцевого резонатора; ПГ — поглотитель излучения лазера накачки; ЭФП — эталон Фабри—Перо; ω_с, ω_х, ω_н — частоты сигнальной, холостой волн и лазера накачки соответственно; на вставке — юстировочный столик с четырьмя зеркалами с коэффициентами отражения R₂₁, R₂₂, R₂₃ и R₂₄

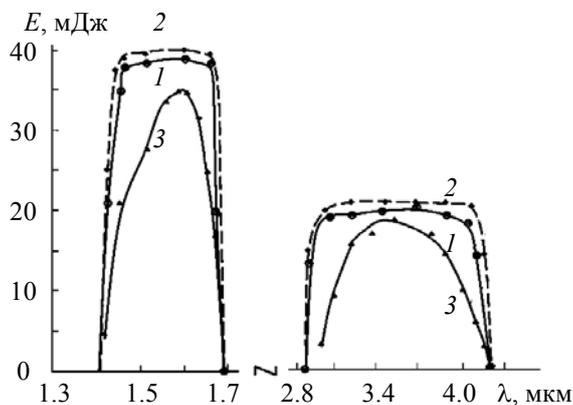


Рис. 3. Зависимость энергии излучения ПГС со сменными зеркалами от длины волны перестройки: 1 — эксперимент, 2 — расчет, 3 — данные [12] для ПГС с одним зеркалом

Эффективное преобразование основного излучения лазера накачки в параметрическое излучение, определяемое формулой $\eta = (E_c + E_x) / E_n$ (где E_n , E_c и E_x — энергии основной, сигнальной и холостой волн соответственно), требует оптимизации отражательно-пропускной способности оптической схемы резонатора ПГС. С этой целью в трехзеркальном резонаторе ПГС выходное зеркало M_2 заменено револьверным механизмом с четырьмя сменными зеркалами, имеющими коэффициенты отражения R_{21} , R_{22} , R_{23} и R_{24} . Вычисленные оптимальные значения коэффициента отражения (R_2) выходного зеркала резонатора ПГС для разных длин сигнальной и холостой волн и измеренные данные показывают, что выходную энергию сигнальной волны можно увеличить от двух до пяти раз, а энергию холостой волны от трех до четырех раз. Распределение выходной энергии сигнальной (1.41—1.69 мкм) и холостой (2.9—4.3 мкм) волн ПГС представлено на рис. 3. Провал в области $\Delta\lambda = 1.69$ —2.85 мкм связан с сильным поглощением НК LiNbO₃ вблизи 2.85 мкм.

Конкурентоспособность ПГС в дистанционном зондировании ВВ повышается, если наряду с высокой выходной энергией он обладает излучением с узкой линией генерации. В целях сужения спектральной ширины параметрического излучения в усовершенствованной оптической схеме предусмотрена возможность введения в резонатор ПГС диспергирующего элемента в виде эталона Фабри—Перо (ЭФП). ЭФП устанавливается в той части резонатора, где отсутствует мощное излучение лазера накачки с $\lambda = 1.064$ мкм. ЭФП действует непосредственно на сигнальную волну, автоматически сужая холостую волну. На рис. 4 представлены спектры излучения холостой волны без ЭФП и с вводом ЭФП в резонатор ПГС.

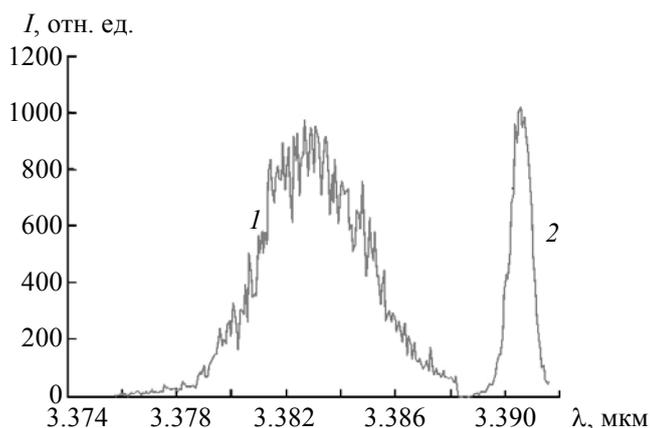


Рис. 4. Спектры излучения холостой волны ПГС: 1 — без ЭФП ($\lambda_1 = 3.383$ мкм), $\Delta\nu_x = 3.6$ см⁻¹; 2 — с вводом ЭФП в резонатор ПГС ($\lambda_2 = 3.391$ мкм), $\Delta\nu_x = 0.69$ см⁻¹

Настройка полосы пропускания ЭФП на необходимую спектральную линию осуществляется путем углового вращения его оптической оси относительно направления падающего на него излучения. Ширину спектра излучения можно измерять для произвольной длины волны во всем диапазоне перестройки (от 1.42 до 4.24 мкм). Вычисленное значение полуширины спектра излучения ПГС показывает, что ввод ЭФП в резонатор ПГС сужает ширину спектра в пять раз без уменьшения интенсивности излучения. Конструктивно оптическая схема позволяет одновременно выполнять плавную и/или дискретную перестройку частоты излучения ПГС от импульса к импульсу [10, 11].

Таким образом, в реализованной оптической схеме ПГС достигается высокоэффективное преобразование основного излучения лазера накачки в параметрическое излучение среднего ИК диапазона. Эффективность преобразования составляет ~30 % во всем диапазоне перестройки длины волны излучения ПГС. Результаты экспериментов согласуются с расчетными данными в пределах погрешности измерений, что подтверждает правильность проведенных расчетов интенсивности ПГС.

ПГС с перестройкой частоты излучения в диапазон 2.2—8.8 мкм. Для эффективного решения задач обнаружения и идентификации ВВ необходимо создание ПГС среднего и дальнего ИК диапазонов. В [13—16] сообщается о синтезированных халькогенидных кристаллах на основе тиогаллата серебра (AgGaS_2), тиогаллата ртути (HgGa_2S_4) и тиогаллата кадмия-ртути ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$), позволяющих расширить диапазон перестройки ПГС от 2 до 9.7 мкм. Однако импульсные параметрические лазеры на основе халькогенидных кристаллов, излучающие в среднем ИК диапазоне, еще не вышли из исследовательских лабораторий. В табл. 1 приведены основные технические характеристики этих лазеров на основе халькогенидных кристаллов.

Анализ современных литературных данных [13—15, 18] по исследованию амплитудно-временных и спектральных характеристик ПГС на основе халькогенидных кристаллов показывает, что можно создать высокоэффективный и монохроматичный ИК ПГС с перестройкой частоты в диапазоне 2—9 мкм.

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики лазеров на основе халькогенидных кристаллов

Активная среда	Выходная энергия, мДж	Эффективность преобразования, %	Расходимость излучения, мрад	Диапазон перестройки, мкм	Литература
AgGaS_2 (тиогалат серебра)	3.3	3.5	10	3.0–3.6	[13]
HgGa_2S_4 (тиогалат ртути)	12 (67 мВт)	4	12	3.69–5.69	[13, 14]
$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$ (тиогалат кадмия-ртути)	4	4.9	10	2.85–3.27, 2.7–9.0	[15, 16]

Экспериментальная установка. В [17, 18] описаны разработка, создание и испытание многофункционального комплекса (МК ИК ПГС) для дистанционного обнаружения и идентификации малых составляющих атмосферных газов, в том числе паров ВВ. Принципиальная схема МК ИК ПГС, работающего по методу ДПР, приведена на рис. 5.

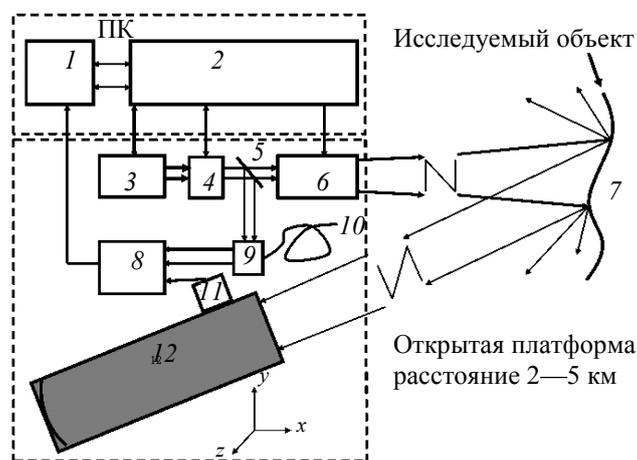


Рис. 5. Принципиальная схема многофункционального комплекса на основе ИК ПГС: 1, 2 — блоки управления и регистрации персонального компьютера (ПК); 3 — YAG:Nd³⁺-лазер накачки; 4 — ИК ПГС; 5 — полупрозрачное зеркало; 6, 12 — передающий и приемный телескопы; 7 — исследуемый объект; 8 — АЦП; 9 — блок контроля частоты ПГС; 10 — ИК световод; 11 — фотодетектор

Исследуемый объект сканируется с помощью ИК ПГС, позволяющего плавно и/или дискретно перестраивать частоту. Плавной перестройкой достигается резонансное совпадение частоты первого импульса ИК ПГС с частотой максимума линии поглощения исследуемого объекта, а второй лазерный импульс дискретной перестройкой устанавливается на крыло линии. Обратные рассеянные сигналы от максимума и от крыла спектральной линии исследуемого объекта собираются приемным телескопом и подаются на чувствительный фотоприемник. После этого электрические сигналы оцифровываются и сравниваются в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), дифференциальные значения выводятся на монитор персонального компьютера в виде КВ спектра исследуемого вещества. При сравнении измеренного КВ спектра со спектроскопической базой данных HITRAN [8] с помощью специализированной компьютерной программы определяются основные параметры (концентрация, состав, строение, величина и направление скорости движения) исследуемого ВВ.

Т а б л и ц а 2. Спектроскопические характеристики некоторых газовых веществ

Взрывчатое вещество	ν_0 , см ⁻¹	λ , мкм	$\Delta\nu$, см ⁻¹	σ , см ² /мол	α , см ⁻¹	Дальность объекта, м	Концентрация, ppm
TNT	1606, 1559	6.22, 6.41	17.5±0.8	5.1·10 ⁵	1.5·10 ⁻⁷	30	7.5
RDX	1272, 1602	7.86, 6.24	24.9±1.2	7.8·10 ⁵	2.0·10 ⁻¹⁰	50	14
PETN	1279, 1626	7.82, 6.15	21.0±1.0	1.4·10 ⁵	1.1·10 ⁻¹⁰	50	40
Диоксид азота	2909	3.44	3.87±0.4	16.1·10 ⁵	0.7·10 ⁻¹⁰	500	1.3*
Закись азота	6295, 6192	1.588, 1.615	0.4			500	3.4*

Примечание. $\Delta\nu$ — полуширина спектра поглощения, σ — дифференциальное сечение поглощения, α — коэффициент поглощения.

* Экспериментальное измерение.

В ранних работах [9, 17] сообщалось, что в качестве исследуемого доступного вещества выбрана молекула метана (CH_4), содержание которого в городской атмосфере 1.6—1.7 ppm. Превышение этого значения зарегистрировано с расстояния 2.2 км. После усовершенствования МК ИК ПГС измерены КВ спектры поглощения и вычислены концентрации паров молекул HCl , а также газов NO_2 и N_2O (табл. 2).

Заключение. Представлена многофункциональная лазерная система на основе ИК параметрического генератора света, позволяющего осуществлять дистанционное, оперативное и высокочувствительное обнаружение и идентификацию взрывчатых веществ, а также с помощью одного лазера проводить измерение концентрации вещества методом дифференциального поглощения и рассеяния. Система позволяет оперативно и с высокой чувствительностью идентифицировать газовые компоненты атмосферы, имеющие колебательно-вращательные спектры, попадающие в диапазон перестройки параметрического генератора света. Детектирование частиц взрывчатых веществ с помощью ИК параметрического генератора света методом дифференциального поглощения и рассеяния перспективно с точки зрения развития новых методов дистанционного обнаружения и идентификации следовых количеств взрывчатых веществ.

- [1] S. Wallin, A. Petersson, H. Ostmark, A. Hobro. *Anal. Bioanal. Chem.*, **395** (2009) 259—274
- [2] J. Janni, B. D. Gilbert, R. W. Field, J. I. Steinfeld. *Spectrochim. Acta, A*, **53** (1997) 1375—1381
- [3] J. L. Lazaro, A. E. Cano, P. R. Fernandez, C. A. Luna. *Sensors*, **9**, N 12 (2009) 10434—10446
- [4] L. C. Pacheco-Londono, W. Ortiz-Rivera, O. M. Primera-Pedrozo, S. P. Hernández-Rivera. *Anal. Bioanal. Chem.*, **395** (2009) 323—335
- [5] Л. А. Скворцов. *Квант. электрон.*, **41**, № 12 (2011) 1051—1060
- [6] C. López-Moreno, S. Palanco, J. Javier Laserna, F. DeLucia Jr, A. W. Miziolek, J. Rose, R. A. Walters, A. I. Whitehouse. *J. Anal. At. Spectrom.*, **21** (2006) 55—60
- [7] В. С. Айрапетян, К. А. Фесенко. Материалы V междунар. науч. конгресса “Геосибирь-2009”, 20—24 апрель 2009 г., Новосибирск (2009) 196—200
- [8] L. S. Rothman, I. E. Gordon, Y. Babikov, A. Barbe, D. Chris Benner, P. F. Bernath, M. Birk, L. Bizzocchi, V. Boudon, L. R. Brown, A. Campargue, K. Chance, E. A. Cohen, L. H. Coudert, V. M. Devi, B. J. Drouin, A. Fayt, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, J. J. Harrison, J.-M. Hartmann, C. Hill, J.T. Hodges, D. Jacquemart, A. Jolly, J. Lamouroux, R. J. LeRoy, G. Li, D. A. Long, O. M. Lyulin, C. J. Mackie, S. T. Massie, S. Mikhailenko, H. S. P. Müller, O. V. Naumenko, A. V. Nikitin, J. Orphal, V. Perevalov, A. Perrin, E. R. Polovtseva, C. Richard, M. A. H. Smith, E. Starikova, K. Sung, S. Tashkun, J. Tennyson, G. C. Toon, V. G. Tyuterev, G. Wagner. *J. Quant. Spectr. Radioact. Transfer*, **130** (2013) 4—50
- [9] J. Hildenbrand, J. Herbst, J. Wöllenstein, A. Lambrecht. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7222** (2009) 7222OB
- [10] G. M. Apresyan, V. S. Ayrapetyan, K. A. Sargsyan, T. K. Sargsyan. *Proc. Int. Conf. Lasers, Applications and Technologies LAT-2002*, 22—28 June 2002, Moscow (2002) 89—91
- [11] V. S. Ayrapetyan, A. V. Nakobyan, G. M. Apresyan, E. M. Pogosyan, K. A. Sargsyan, T. K. Sargsyan. *Proc. SPIE*, **6160** (2005) 708—713
- [12] В. С. Айрапетян. *Вестн. НГУ. Физика*, **4**, № 3 (2009) 20—24
- [13] В. В. Бадиков, А. К. Дон, К. В. Митин, А. М. Серегин, В. В. Синайский, Н. И. Щebetова, Т. А. Щегинкина. *Квант. электрон.*, **37**, № 4 (2007) 363—365
- [14] K. L. Vodopyanov, J. P. Maffetone, I. Zvieback, W. Ruderman. *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 1204—1208
- [15] F. Rotermund, V. Petrov. *Opt. Lett.*, **25**, N 10 (2000) 746—748
- [16] В. В. Бадиков, Н. В. Кузьмин, В. Б. Лаптев, А. Л. Малиновский, К. В. Митин, Г. С. Назаров, Е. А. Рябов, А. М. Серёгин, Н. И. Щebetова. *Квант. электрон.*, **34**, № 5 (2004) 451—456
- [17] В. С. Айрапетян. *Журн. прикл. спектр.*, **76**, № 2 (2009) 285—290 [V. S. Ayrapetyan. *J. Appl. Spectr.*, **76** (2009) 268—272]
- [18] V. S. Ayrapetyan, T. A. Shirokova. *Opt. Photon. J.*, N 5 (2012) 357—366