

Вклад поглощения излучения стоксовой компоненты ВКР импульсных твердотельных лазеров атмосферными газами в сигнал оптико-акустического детектора

Ю.Н. Пономарев, Т.Е. Кураева

*Институт оптики атмосферы СО РАН
634055, Томск, Россия, пл. Академика Зueva, 1, kte@iao.ru*

Метод оптико-акустического (ОА) детектирования применяется для исследования зависимости поглощения газовых сред и атмосферного воздуха от интенсивности лазерного импульса, взаимодействующего с газом [1, 2]. Малая длина газовой кюветы оптико-акустического детектора позволяет при фокусировке излучения получать в исследуемой среде значения интенсивностей, при которых наряду с излучением возбуждающего лазера генерируется стоксова компонента ВКР в атмосферном азоте [3]. При перестройке длины волны излучения лазера длина волны стоксовой компоненты также перестраивается и может поглощаться молекулярными компонентами воздуха, давая вклад в величину регистрируемого ОА сигнала. В работе сделаны оценки величины вклада этого дополнительного поглощения в ОА сигнал при взаимодействии сфокусированного излучения импульсных твердотельных лазеров Nd:YAG и Nd:YLF с воздухом, содержащим молекулярные составляющие CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, N₂O, NH₃ при использовании оптико-акустического детектора.

Ключевые слова: филаментация, лазер, поглощение, вынужденное комбинационное рассеяние, оптоакустика; laser, absorption, stimulated Raman scattering, optoacoustics.

Введение

При фокусировке или коллимации излучения мощных импульсных лазеров видимого или ближнего ИК диапазона в воздухе интенсивность излучения достигает нескольких сотен мегаватт. При этом возникает вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) на колебательных переходах молекул азота. В таблице 1 приведены частоты линий генерации лазеров Nd:YAG и Nd:YLF, диапазоны перестройки их частот, частоты стоксовых компонент ВКР в азоте и диапазоны их перестройки.

Таблица 1

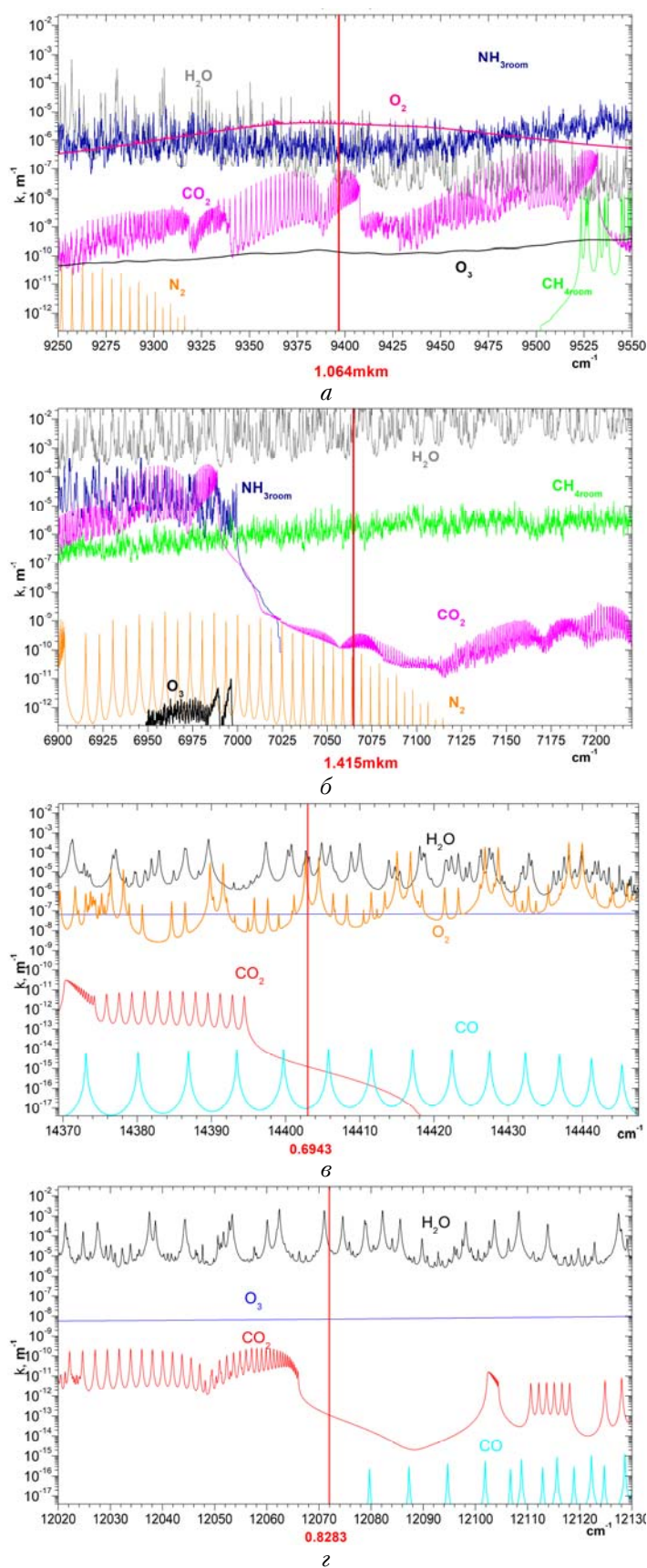
Тип лазера	Частота линии генерации, см ⁻¹	Диапазон перестройки частоты лазера, см ⁻¹ [4, 5]	Полоса частот стоксовой компоненты ВКР азота, см ⁻¹ [6, 7]	
Nd:YAG (лазер с иттрий-алюминиевым гранатом, легированным неодимом)	6925,208	4,30	4598,508	4589,908
	7473,283	4,20	5146,483	5138,083
	7583,226	4,50	5256,726	5247,726
	9396,73	5,00	7070,73	7060,73
	9708,738	5,00	7382,738	7372,738
	10570,825	9,50	8249,325	8230,325
Nd:YLF (лазер с иттрий-литиевым фторидом, легированным неодимом)	7299,270	12,0	4980,27	4956,27
	7552,870	12,0	5233,87	5209,87
	7617,146	12,0	5298,146	5274,146
	9496,676	12,0	7177,676	7153,676
	9551,098	12,0	7232,098	7208,098

В область перестройки стоксовой частоты ВКР этих лазеров в азоте попадают линии генерации ряда молекулярных газов, присутствующих в атмосферном воздухе. Список этих газов и значения их концентраций [8, 9] приведены в таблице 2.

Таблица 2

Название	Химическая формула	ПДК максимальная разовая в атмосфере		ПДК максимальная разовая в рабочем помещении		Фон, ppm
		мг/м ³	ppm	мг/м ³	ppm	
метан	CH ₄	50,0	75,0	7000,0	10500,0	1,7
угарный газ	CO	5,0	4,295	100,0	85,9	1,5
этилен	C ₂ H ₄	3,0	2,574	100,0	85,8	
аммиак	NH ₃	0,2	0,282	60,0	84,6	0,0005
углекислый газ	CO ₂	—	400	27000,0	14769,0	400
водяной пар	H ₂ O	—	—	—	—	7750,0

На рисунке *a–г* панелях представлен коэффициент поглощения некоторых атмосферных и промышленных газов в области частоты стоксовой компоненты ВКР.



Коэффициент поглощения некоторых атмосферных и промышленных газов в области частоты стоксовой компоненты ВКР

Оценка вклада поглощения молекулярных газов атмосферы на основной частоте лазерного импульса и частоте его стоксовой компоненты, генерируемой в атмосферном азоте при оптико-акустических измерениях

Оптико-акустический метод достаточно широко применяется для измерения нелинейного и многофотонного поглощения лазерного излучения в молекулярных газах [1, 2]. Для повышения интенсивности излучения в исследуемом газовом объеме лазерный луч фокусируют в центре ячейки ОАД. При этом достигается интенсивность в области фокуса до 10^{11} Вт · см⁻², что соответствует при длительности импульса 10^{-9} с и площади сечения пучка в области фокуса 0,01–0,001 см² энергии 0,1–1 Дж. Энергия стоксовой компоненты ВКР может достигать нескольких десятков процентов от энергии лазерного импульса [10]. Для оценок вклада излучения ВКР в акустический сигнал примем уровень энергии стоксовой компоненты равным 10% от энергии лазерного импульса, т.е. 0,01–0,1 Дж. Такой энергии достаточно для регистрации поглощения молекулярными газами на уровне 10^{-7} – 10^{-5} см⁻¹ [11].

Импульс давления в ячейке ОАД

$$\Delta p \sim \kappa(\nu_L) \cdot \omega(\nu_L), \quad (1)$$

где $\kappa(\nu_L)$ — коэффициент поглощения исследуемого газа, а $\omega(\nu_L)$ — энергия лазерного излучения на частоте ν [11].

В случае, когда воздушная среда в ОАД взаимодействует с лазерным импульсом с частотой ν_L и стоксовой компонентой ВКР в атмосферном азоте с частотой ν_S импульс давления

$$\Delta p \sim \kappa(\nu_L) \cdot \omega(\nu_L) + \kappa(\nu_S) \cdot \omega(\nu_S). \quad (2)$$

Вклад поглощения на частоте ν_S в поглощение на частоте ν_L определяется соотношением

$$A = \frac{\kappa(\nu_S) \cdot \omega(\nu_S)}{\kappa(\nu_L) \cdot \omega(\nu_L)}, \quad (3)$$

где $\omega(\nu_L)$ и $\omega(\nu_S)$ — энергии основного и стоксова импульса.

Для Nd:YAG лазера с энергией в импульсе 0,5 Дж и энергией стоксовой компоненты 0,01 Дж и длин волн излучения лазера $\nu_L = 9396$ см⁻¹ и стоксовой компоненты $\nu_S = 7065$ см⁻¹ суммарное поглощение воздуха с содержанием паров H₂O, NH₃, CO₂ и CH₄ на частотах ν_L и ν_S оценивается, как

$$\kappa(\nu_L) = \kappa_{\text{H}_2\text{O}} + \kappa_{\text{NH}_3} + \kappa_{\text{CO}_2} + \kappa_{\text{CH}_4} = 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1},$$

Коэффициенты поглощения соответствуют концентрациям: фоновая концентрация H₂O — 7750,0 ppm, максимальная разовая в рабочем помещении NH₃ — 84,6 ppm, CO₂ — 14769,0 ppm и CH₄ — 10500,0 ppm. Это дает значение $A = 8,69 \cdot 10^2$, для сухого воздуха (при $\kappa_{\text{H}_2\text{O}} = 0$) $A = 2,92$.

Заключение

Проведенные оценки показывают, что при оптико-акустических измерениях поглощения мощного лазерного излучения следует учитывать вклад в акустический сигнал поглощения излучения стоксовой компоненты ВКР, которое может быть значительно выше поглощения на основной частоте, особенно для влажного воздуха.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Пономарев Ю.Н. Нелинейные спектроскопические эффекты в молекулярных газах и их влияние на распространение лазерных пучков в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, №11. С.1509–1518.
2. Киселев А.М., Пономарев Ю.Н., Степанов А.Н., Тихомиров А.Б., Тихомиров Б.А. Нелинейное поглощение фемтосекундных лазерных импульсов (800 нм) атмосферным воздухом и водяным паром // Квантовая электроника. 2011. Т. 41, № 11. С. 976.
3. Вебер А. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях. М. Мир, 1982. 376 с.
4. Nd:YLF — Лазерный кристалл иттрий-литиевого фторида, легированный неодимом: АО «ЛЛС». [Электронный ресурс]: <https://lenlasers.ru/product/ndylf-lazernyj-kristall-ittrij-litievogo-ftorida-legirovannyj-neodimom/?ysclid=lr7fn78ifl28432608>
5. Лазеры с перестройкой частоты. Справочник химика 21 (chem21.info). [Электронный ресурс]: <https://chem21.info/info/147090/?ysclid=lr7f4m4afj391655615>.
6. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.

7. Баранов Ю.И. Экспериментальное исследование индуцированного и континуального поглощения ИК-радиации основными атмосферными газами. Диссертация доктора физико-математических наук: 01.04.05. СПбГУ. Санкт-Петербург, 2014. 203 с.
8. Перевод концентрации газов. ПДК газов. Переводные коэффициенты из мг/м³ в ppm_v. Таблица для взрывоопасных и токсичных веществ по ГОСТ 51330.19-99, ГОСТ 12.1.005-88, ВСН 64-86. [Электронный ресурс]: <https://dpva.ru/Guide/GuideChemistry/Concentration/GasesConcentration/>
9. Онлайн-справочник веществ. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферу. [Электронный ресурс]: http://voc.integral.ru/index.php?pageNum_voc_records=9&totalRows_voc_records=157#.YoNJkjj7RaQ.
10. Авербах В.С., Макаров А.И., Таланов В.Н. ВКР на вращательных и колебательных переходах в газообразном азоте // Квантовая электроника. 1978. Т. 5, № 4. С. 823–829.
11. Антипов А.Б., Капитанов В.А, Пономарев Ю.Н., Сапожникова В.А. Оптико-акустический метод в лазерной спектроскопии молекулярных газов. Новосибирск: Наука, 1094. 128 с.

T.A. Dick, G.E. Rizaev, I.A. Nikolaeva, D.E. Shipilo, A.V. Koribut, D.V. Pushkarev, M.V. Levus, Ya.V. Grudtsyn, N.R. Vrublevskaya, N.A. Panov, O.G. Kosareva, L.V. Seleznev. Characteristics of the second harmonic generated during laser pulse filamentation in air.

In this paper generation of the second harmonic during filamentation of femtosecond laser pulses in air is studied. Analyzing the spatial and spectral characteristics of the second harmonic, we identify key factors affecting its generation, including the energy of the laser pulse, focusing conditions, and air pressure. Numerical investigations confirm experimental observations, showing the efficiency of second harmonic generation $\sim 10^{-10}$.