

Ю.Н. Пономарев, И.А. Булатова, К.М. Фирсов, *Ю.В. Кистенев

Прохождение импульсов излучения фемтосекундного лазера на сапфире с титаном на горизонтальных и наклонных трассах

Институт оптики атмосферы СО РАН

** Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск*

Поступила в редакцию 12.07.2001 г.

Проведены оценки энергетического ослабления и изменения спектрального состава сверхкоротких оптических импульсов лазера на сапфире с титаном на протяженных горизонтальных и наклонных атмосферных трассах. В расчетах учитывалось взаимодействие излучения с молекулами водяного пара.

Введение

Фемтосекундные лазеры генерируют излучение с шириной спектра, сопоставимой с несущей частотой и достигающей нескольких сотен обратных сантиметров. Исключительные свойства многомодового излучения стабильных фемтосекундных лазеров предопределили интерес к ним, как к источникам, для решения задач определения параметров атмосферы.

В данной статье рассматривается задача прохождения импульса излучения фемтосекундного лазера на сапфире с титаном, генерирующего излучение в интервале 730–980 нм по горизонтальным и наклонным атмосферным трассам с учетом поглощения молекулами H_2O .

Параметры лазерного излучения и характеристики спектра поглощения атмосферы

К основным процессам, сопровождающим распространение излучения такого спектрального состава в атмосфере, относится селективное поглощение молекулами атмосферных газов.

Спектр генерации лазера попадает в достаточно сильные полосы поглощения водяного пара. На рис. 1 приведены спектры поглощения атмосферы, синтезированные с помощью базы данных HITRAN [1, 2] для приземного слоя, и спектры генерации лазера.

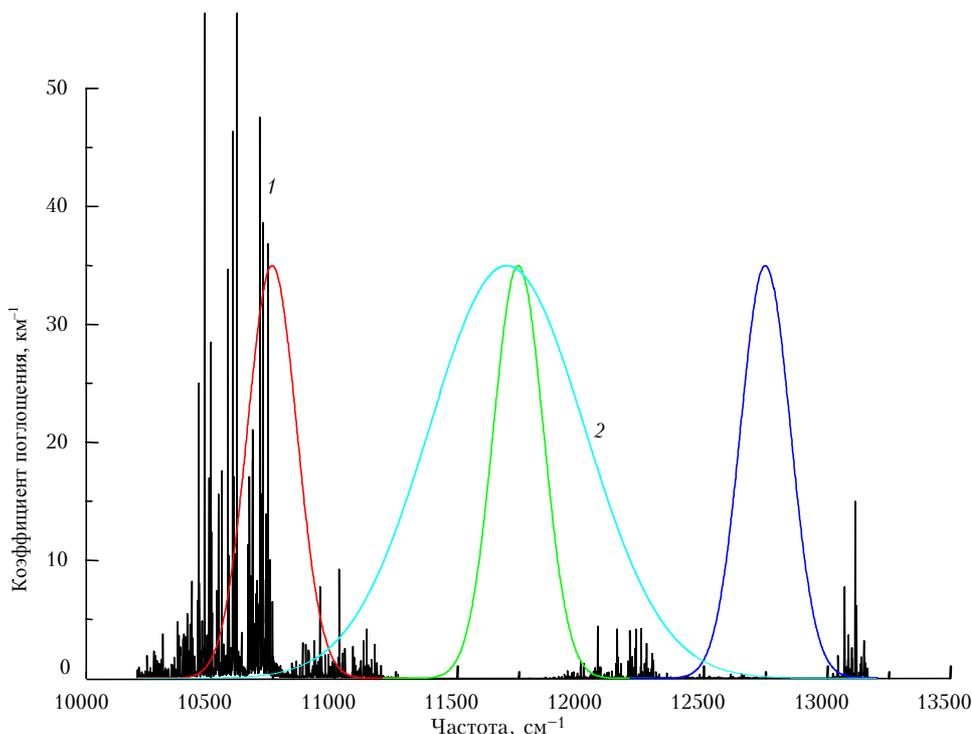


Рис. 1. Спектр поглощения атмосферы (1) и огибающая импульса лазерного излучения (2)

Расчет коэффициентов молекулярного поглощения проводился на основе метода прямого счета line-by-line [3]. Температура, давление и концентрация газов относятся к модели лета средних широт.

В целом в расчетах учитывалось около 4000 спектральных линий.

Начальная форма огибающей лазерного импульса описывается распределением Гаусса с несущей частотой ν_c , что соответствует описанию лазера Femtis на сапфире с титаном, длительность импульса порядка 50–200 фс, межмодовый интервал определяется длиной лазерного резонатора.

Расчет атмосферного пропускания

При расчетах атмосфера моделировалась сферически слоистой средой, параметры которой изменялись в соответствии со стандартными моделями атмосферы [4].

Для излучения фемтосекундного лазера невысокой мощности можно считать, что в спектре сохраняется четкая модовая структура. В этом случае пропускание атмосферной трассы для многочастотного излучения с учетом попавших в спектр линий поглощения принимаемых во внимание газов определялось по формуле [5]:

$$T = \sum_{i=1}^n I_i \exp \left\{ - \int_0^L \alpha_i [h(l)] dl \right\} / \sum_{i=1}^n I_i; \quad (1)$$

$$h(l) = \sqrt{(R + z_1)^2 + l^2 + 2l(R + z_1) \sin \theta} - R, \quad (2)$$

где I_i – интенсивность излучения в i -й моде; L – длина трассы; θ – зенитный угол трассы; z_1 – высота источника; R – радиус Земли ($R = 6380$ км); $\alpha_i(h)$ – коэффициент молекулярного поглощения на высоте h , км^{-1} .

При получении формулы (2) мы не учитывали атмосферную рефракцию. Для плоско-слоистой сре-

ды оценку относительного изменения длины трассы можно представить в виде

$$\delta L / L \approx (n_0 - 1) \text{tg}^2 \theta, \quad (3)$$

где n_0 – показатель преломления в приземном слое атмосферы.

Результаты расчетов пропускания для различных моделей спектров излучения лазера представлены в таблице (положения центральной частоты и ширины спектра варьировались). Разницу между этими моделями можно увидеть на рис. 1.

Оценки изменения формы лазерного импульса

Линейное поглощение в атмосфере описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial l} E = 2\pi i k \sum_{i=1}^n N_i \mu_i P_i; \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \eta} = -\gamma_i P_i + i \delta_i \omega^e E, \quad (5)$$

где E – комплексная амплитуда оптического импульса; P – комплексная амплитуда поляризации среды; N – концентрация резонансного газа; $\eta = (t - l/c)$, t – время, c – скорость света; $\gamma_i = 1/T_{2i} - i\Delta\omega$, T_2 – время фазовой релаксации, $\Delta\omega$ – отстройка от резонанса; $\delta_i = 2\mu_i/h$, μ_i – дипольный момент перехода; ω^e – разность заселенностей уровней перехода.

Используя преобразование Фурье, окончательное выражение можно представить в виде

$$E(\eta, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(0, \nu) \times \exp \sum_{j=1}^n \frac{\tau_j [1 + i(\Delta\omega_j T_{2j} - \nu T_{2j})]}{2 [1 + (\Delta\omega_j T_{2j} - \nu T_{2j})^2]} \exp(i\nu\eta) d\nu, \quad (6)$$

Модели и результаты расчетов

Диапазон генерации, см^{-1}	Горизонтальные трассы, км		Наклонные трассы					
	1	10	$h_1, \text{км}^{-1}$	$h_2, \text{км}^{-1}$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 60^\circ$	$\theta = 80^\circ$
10200 – 13200	0,952	0,832	0	10	0,930	0,923	0,897	0,830
			10	20	0,999	1	0,999	0,997
			10	50	1	1	0,999	0,997
			20	50	0,997	0,997	0,997	0,997
10200 – 11200	0,610	0,204	0	10	0,505	0,479	0,377	0,205
			10	20	0,993	0,992	0,998	0,972
			10	50	0,993	0,992	0,987	0,972
			20	50	0,972	0,972	0,972	0,972
11200 – 12200	0,991	0,953	0	10	0,986	0,984	0,976	0,950
			10	20	1	1	1	1
			20	50	1	1	1	1
			0	10	0,981	0,978	0,966	0,926
12200 – 13200	0,990	0,931	10	20	1	1	1	1
			10	50	1	1	1	1
			20	50	1	1	1	1

Примечание. h_1 и h_2 – высоты; θ – зенитный угол трассы. Межмодовый интервал равнялся $0,01 \text{ см}^{-1}$.

где n – число учитываемых линий; τ_j – оптическая толщина атмосферы для j -й линии поглощения.

Расчеты трансформации импульса лазерного излучения при распространении в газовой среде с учетом 400 наиболее сильных линий поглощения представлены на рис. 2.

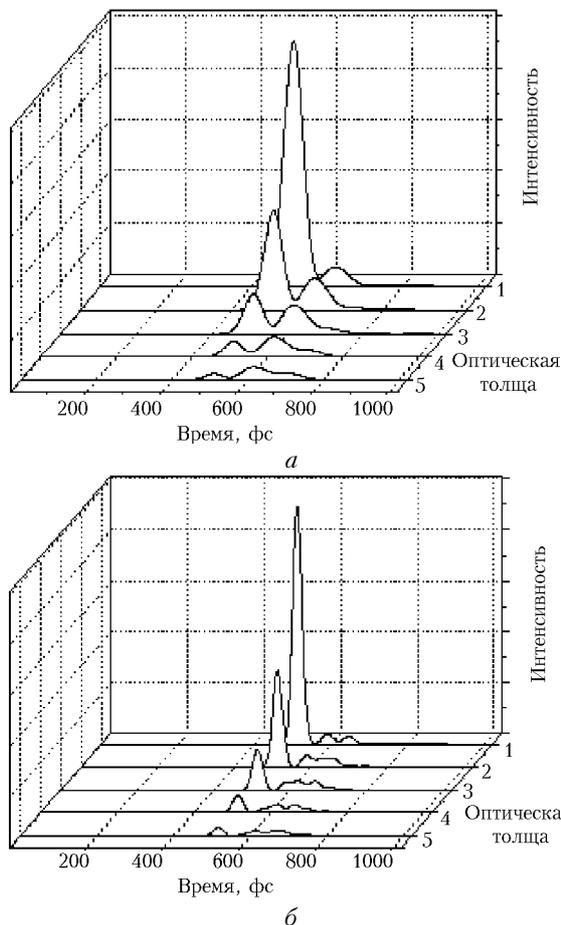


Рис. 2. Изменение формы лазерного импульса при его распространении в газовой среде. Начальные длительности импульсов 200 (а) и 50 фс (б)

Yu.N. Ponomarev, I.A. Bulatova, K.M. Firsov, Yu.V. Kistenev. Propagation of the femtosecond Ti:Sapphire laser pulses along horizontal and inclined atmospheric paths.

Estimates of radiation attenuation and spectral characteristics of the femtosecond Ti:Sapphire laser pulses, propagating along horizontal and inclined atmospheric paths, are presented. Calculations took into account interaction between the radiation and water vapor molecules.

Выводы

Показано, что при использовании в расчетах более узкого спектра генерации фемтосекундного лазера изменение положения центральной частоты обуславливает вариации пропускания и разница в значениях пропускания может достигать 25% (для горизонтальной трассы длиной 1 км).

При распространении короткого лазерного импульса с начальной формой, описываемой распределением Гаусса, происходит его трансформация. Быстро и характер этого процесса зависят, в частности, от начальной длительности импульса.

Излучение фемтосекундного лазерного импульса ослабляется намного сильнее при прохождении по горизонтальным трассам.

Работа поддержана комплексным интеграционным проектом СО РАН № 8 «Разработка физических основ и создание фемтосекундных лазеров для исследования окружающей среды».

1. Rothman L.S., Gamache R.R., Goldman A., Brown L.R., Toth R.A., Pickett H.M., Poynter R.L., Flaud J.M., Camy-Peyret C., Barbe A., Husson N., Rinsland C.P. and Smith M.A.H. The HITRAN database: 1986 Editions // Appl. Opt. 1987. V. 26. P. 4058–4097.
2. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Benner D.C., Deori V.M., Flaud J.M., Camy-Peyret C., Perrin A., Goldman A., Massie S.T., Brown L.R. and Toth R.A. The HITRAN molecular database: editions of 1991 and 1992 // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1992. V. 48. P. 469–507.
3. Mitsel A.A., Firsov K.M. A fast line-by-line method // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1995. V. 54. P. 549–557.
4. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 264 с.
5. Землянов А.А., Кистенев Ю.В., Колосов В.В., Пономарев Ю.Н., Фирсов К.М. Ослабление интенсивности много-частотного лазерного излучения на протяженных атмосферных трассах. Препринт ИОА СО РАН. № 1. 1998. 22 с.