

Г.Г. Матвиенко*, Ю.Н. Пономарев*, Б.А. Тихомиров*, А.Б. Тихомиров*,
А.В. Кирсанов, А.М. Киселев, А.Н. Степанов

Оптико-акустические измерения поглощения фемтосекундного излучения Ti:Sa-лазера атмосферным воздухом

* *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Поступила в редакцию 24.12.2003 г.

Выполнены сравнительные измерения поглощения атмосферным воздухом нано- и фемтосекундного импульсного излучения Ti:Sa-лазера с помощью оптико-акустического детектора с пространственно-временным разрешением сигналов. Получена зависимость поглощения излучения фемтосекундного импульса атмосферным воздухом от энергии импульса в диапазоне ≤ 10 мДж.

Введение

В последнее десятилетие лидары дифференциального поглощения, использующие перестраиваемые по длине волны импульсные лазеры в качестве светового источника, активно применяются для мониторинга газовых компонент атмосферы с высоким пространственным разрешением [1, 2]. Эта лидарная техника позволяет работать, как правило, с очень ограниченным числом детектируемых компонент.

Многокомпонентный газоанализ атмосферы осуществляется пространственно-интегрирующими абсорбционными методами, как, например, DOAS (differential optical absorption spectroscopy), в которых в качестве источника излучения с широким спектром используются Солнце или спектральные лампы видимого и УФ-диапазонов. Примером таких газоанализаторов является трассовый многоволновый газоанализатор SANOА [3]. Новая технология мониторинга, применяющая метод абсорбционной спектроскопии с новым источником излучения — суперконтинуумом (СК), генерируемым в заданной области атмосферы с помощью фемтосекундных лазерных импульсов высокой мощности, обеспечивает многокомпонентный анализ газового состава атмосферы с высоким пространственным разрешением [4].

Излучение СК генерируется в атмосфере при распространении фемтосекундных (ФС) лазерных импульсов. Как показано в [4], оно не является диффузным и остается, как и лазерный пучок, коллимированным вдоль трассы распространения. Для получения СК на расстояниях в несколько сотен метров используются ФС-лазеры с выходной мощностью несколько тераватт. Излучение СК перекрывает спектральный диапазон в несколько сотен нанометров в видимом и ближнем ИК-диапазонах.

Распространение тераваттных ФС-импульсов в газах и аэрозолях отличается от хорошо изученных случаев распространения импульсов наносекундной длительности. Так, при взаимодействии ФС-излучения с колебательно-вращательными переходами атмосферных молекул следует учитывать нестационарность взаимодействия, одновременное возбуждение большого количества переходов в молекулах (колебательно-вращательных полос нескольких газов, например H₂O и O₂ для Ti:Sa-лазера) и очень высокую пиковую мощность излучения. Экспериментальные исследования специфики поглощения излучения ФС-импульсов молекулярными газами, воздухом и газовой аэрозольными средами немногочисленны.

В данной статье сообщается о первых результатах измерений поглощения воздухом излучения ФС-импульсов излучения Ti:Sa-лазера с помощью оптико-акустического (ОА) детектора с пространственно-временным разрешением сигналов, в том числе зависимости поглощения нано- и фемтосекундных импульсов при сравнимой ширине их частотных спектров.

Эксперимент

Эксперимент проводился на лазерном стенде Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) по стандартной схеме. Излучение лазера пропускать через ячейку ОА-детектора, который измерял поглощенную газом энергию лазерного пучка.

Описание использованного в эксперименте лазерного комплекса приведено в [5]. В настоящей работе использовалось импульсное излучение Ti:Sa-лазера с энергией импульсов $E_{\text{имп}} \leq 10$ мДж и длительностью $\tau_{\text{имп}} = 9$ нс или 80 фс. Энергия импульсов

Ti:Sa-лазера изменялась при помощи аттенюатора, состоящего из фазовой пластинки $\lambda/2$ и поляризатора. Спектр излучения регистрировался с помощью монохроматора и ПЗС-линейки с разрешением 0,04 нм. Вид спектров представлен на рис. 1.

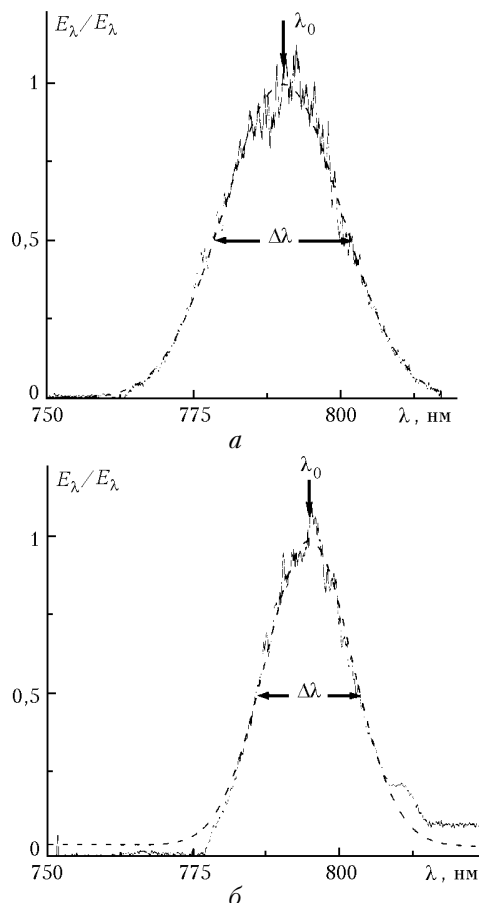


Рис. 1. Спектры импульсов излучения Ti:Sa-лазера с $\tau_{\text{имп}} = 9$ нс (а) и 80 фс (б): пунктирные кривые – результат подгонки функцией Гаусса; $\lambda_0 = 790$ нм и $\Delta\lambda = 23,4$ нм (а); $\lambda_0 = 794,7$ нм, $\Delta\lambda = 17,7$ нм (б)

Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка близко к гауссовому как для нано-, так и для фемтосекундных импульсов. Диаметры лазерных пучков были одинаковыми и на уровне $0,135I_{\text{max}}$ равнялись 8 мм (I_{max} – значение интенсивности на оси пучка).

Для регистрации поглощения излучения нано- и фемтосекундных импульсов Ti:Sa-лазера использовался ОА-детектор [6], разработанный в Институте оптики атмосферы СО РАН (г. Томск). Благодаря временному разрешению информативных и паразитных фоновых импульсных ОА-сигналов, детектор позволяет регистрировать сигнал от поглощения излучения в исследуемом газе на нулевом фоне. Применение в ОА-детекторе специального концентратора, состоящего из цилиндрического и сферического параболических зеркал, для фокусирования акустических импульсов на микрофон позволило увеличить его чувствительность по коэффициенту поглощения до $2 \cdot 10^{-11} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Дж}$.

Чувствительность ОА-детектора максимальна, когда ось лазерного пучка совпадает с фокальной осью цилиндрического параболеоида. При одинаковых условиях измерений (одинаковые термодинамические и релаксационные характеристики исследуемых газов, одинаковые пространственные и временные характеристики излучения и т.д.) значение чувствительности детектора не зависит от спектрального диапазона, в котором производятся измерения коэффициентов поглощения.

Для исследования поглощения фемтосекундного излучения Ti:Sa-лазера использовался модифицированный ОА-детектор без окон. Его схема иллюстрируется рис. 2.

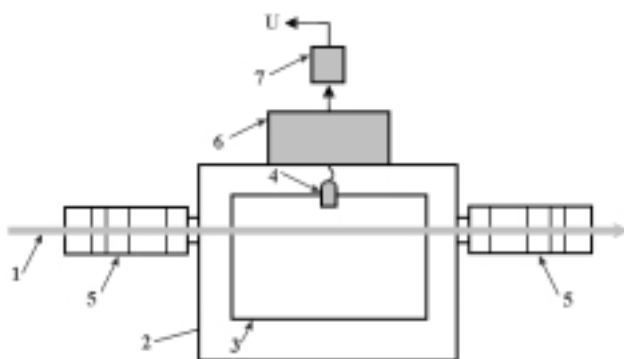


Рис. 2. Схема ОА-детектора: 1 – лазерный пучок; 2 – корпус ОА-ячейки; 3 – концентратор; 4 – микрофон; 5 – буферный объем; 6 – предусилитель; 7 – фильтр

При отсутствии окон акустический шум детектора от внешних источников (особенно низкочастотный шум в полосе до 1 кГц) возрос примерно в 100 раз. Для снижения уровня шума ячейка детектора была снабжена буферными объемами с диафрагмами, а в электрическую схему на выходе предусилителя был введен фильтр высоких частот, обеспечивающий пропускание 85% в области частот ≥ 5 кГц.

При проведении сравнительных измерений поглощения нано- и фемтосекундных импульсов в отсутствие процесса филаментации излучение фокусировалось в ячейку линзой с фокусным расстоянием 88 см. Расстояние от линзы до микрофона было равно 56 см, а фокальная плоскость линзы находилась за ОА-ячейкой. В этом случае диаметры лазерных пучков в плоскости расположения микрофона были равны 3 мм.

В сравнительных измерениях поглощения фемтосекундных импульсов в условиях образования филаменты и при ее отсутствии излучение фокусировалось в ячейку с помощью сферического зеркала с радиусом кривизны 161,3 см. Расстояние от зеркала до микрофона равнялось 180 см.

Результаты

Сравнительные измерения: поглощения воздухом излучения нано- и фемтосекундных импульсов; зависимости поглощения от энергии импульса; различия поглощения излучения фемтосекундных импульсов в дофиламентном режиме и при образова-

нии филаменты, проводились с комнатным воздухом при атмосферном давлении. Парциальное давление водяного пара P_{H_2O} контролировалось психрометром и составляло 10 торр при температуре воздуха 295 К. Полученные результаты приведены на рис. 3, 4.

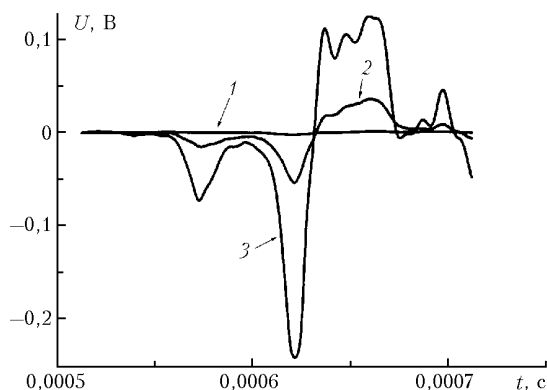


Рис. 3. Оптико-акустические сигналы, генерируемые при поглощении импульсного излучения Ti:Sa-лазера комнатным воздухом

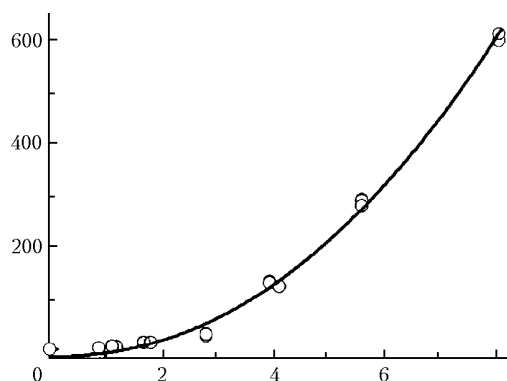


Рис. 4. Зависимость поглощенной воздухом энергии фемтосекундного излучения Ti:Sa-лазера от энергии лазерного импульса (a , b , c – параметры подгонки; R^2 – коэффициент корреляции)

Рис. 3 иллюстрирует четкие различия в форме и амплитуде сигналов ОА-детектора для различных режимов импульсов Ti:Sa-лазера, проходящих через

измерительную ячейку. Наибольшую амплитуду ОА-сигнал имеет в случае образования филаменты.

На рис. 4 представлена отчетливая квадратичная зависимость поглощения воздухом фемтосекундного излучения от энергии импульса. В результате экспериментов также установлено, что поглощение излучения фемтосекундного импульса существенно выше (почти на 2 порядка), чем поглощение излучения наносекундной длительности при сравнимых спектральных ширинах излучения.

Полученные результаты являются первой демонстрацией эффективности ОА-метода в исследовании поглощения сверхкоротких импульсов излучения атмосферными газами. Они также иллюстрируют нетривиальные изменения поглощательной способности воздуха при вариации режима распространения фемтосекундных импульсов, включая их филаментацию. Детальное исследование обнаруженных эффектов будет предметом дальнейших экспериментов.

Авторы признательны Н.Н. Трифионовой за помощь в оформлении статьи.

Настоящая работа поддержана проектом 2.4 ОФН РАН и Интеграционным проектом СО РАН № 12.

1. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
2. Ismaie S., Browell E.V. Airborne and spaceborn lidar measurements of water vapor profiles: a sensitive analysis // Appl. Opt. 1989. V. 28. № 7. P. 3603–3615.
3. Web: www.environnement – sa.com
4. Rairoux P., Schilinger M., Niedermeier S., Rodriguez M., Ronneberger F., Sauerbrey R., Stein B., Waite D., Wedeking C., Wille H., Woste L., Ziener C. Remote sensing of atmosphere using ultrashort laser pulses // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. P. 573–580.
5. Бабин А.А., Киселев А.М., Сергеев А.М., Степанов А.Н. Терраваттный фемтосекундный Ti:Sa-лазерный комплекс // Квант. электрон. 2001. Т. 31. № 7. С. 623–626.
6. Козлов В.С., Панченко М.В., Тихомиров А.Б., Тихомиров Б.А. Измерение аэрозольного поглощения излучения с длиной волны 694,300 нм в приземном слое воздуха // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 9. С. 756–761.

G.G. Matvienko, Yu.N. Ponomarev, B.A. Tikhomirov, A.B. Tikhomirov, A.V. Kirsanov, A.M. Kiselev, A.N. Stepanov. **Photo-acoustic measurements of the Ti:Sa-laser femtosecond radiation absorption by atmospheric air.**

Comparative measurements of the Ti:Sa-laser nano- and femtosecond radiation absorption by atmospheric air were conducted with the use of the photo-acoustic detector with spatial-temporal resolution of signals. The magnitude of the dependence of the femtosecond pulse radiation absorption by atmospheric air on the pulse energy of ≤ 10 mJ was observed.