

Ослабление излучения терагерцового диапазона водным аэрозолем

Б.Г. Агеев, Ю.Н. Пономарев, Е.Н. Чесноков*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3*

Поступила в редакцию 29.01.2015 г.

Представлены результаты измерений энергетического ослабления терагерцового излучения лазера на свободных электронах модельной воздушно-аэрозольной средой. Исследованы спектральная и концентрационная зависимости ослабления излучения. Показано, что для реализованных условий эксперимента ослабление обусловлено аэрозольными частицами.

Ключевые слова: ТГц-излучение, ослабление, водный аэрозоль; THz radiation, attenuation, water aerosol.

Введение

Терагерцовое излучение занимает на шкале электромагнитных волн диапазон от 0,1 до 10 ТГц ($3,33\text{--}333\text{ см}^{-1}$ или 3 мм – 30 мкм), т.е. находится между инфракрасной (ИК) и микроволновой областями. Источниками излучения в этой области спектра являются как классические тепловые излучатели (глобары и т.п.), так и излучатели, использующие самые современные технологии: лазерные (квантово-каскадные лазеры, параметрические генераторы) и электронные пучки (лазеры на свободных электронах). Ни один тип излучателя не перекрывает весь терагерцовый диапазон, поэтому экспериментальные исследования проводятся в спектральном участке, определяемом конкретным излучателем.

Дальний ИК-диапазон ($\nu < 100\text{ см}^{-1}$) представляет интерес для атмосферных исследований по крайней мере по двум причинам. В этом диапазоне большинство молекулярных газов атмосферы, включая легкие примеси, имеют чисто вращательные спектры, что облегчает задачу их идентификации и определения концентрации методами дистанционной спектроскопии. Электромагнитное излучение этого диапазона практически не рассеивается атмосферным аэрозолем, что позволяет вести дистанционную диагностику объектов в замутненной атмосфере. С другой стороны, использование излучения дальнего ИК-диапазона в реальной атмосфере затруднено сильным поглощением в этой области, обусловленным атмосферным водяным паром [1, 2].

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) создан один из самых мощных в мире источников терагерцового излучения – лазер на свободных электронах (ЛСЭ). Он дает излучение со средней мощностью до 400 Вт в диапазоне длин волн $50\text{--}83\text{ см}^{-1}$ [3]. Ранее на стенде ЛСЭ нами были проведены тестовые измерения поглощения воздухом излучения в диапазоне $70\text{--}86\text{ см}^{-1}$ и выполнено моделирование спектров пропускания реальной атмосферы в диапазоне $50\text{--}125\text{ см}^{-1}$ [4]. Было показано, что для практического применения излучения ЛСЭ на атмосферных трассах даже небольшой (~ 100 м) длины необходим поиск микроонок прозрачности, свободных от вклада резонансного поглощения молекулами H_2O .

Дополнительным источником энергетических потерь лазерного излучения является атмосферный аэрозоль, в частности водный. В данной статье представлены результаты измерений энергетического ослабления излучения ЛСЭ модельной воздушно-аэрозольной средой.

Условия и схема измерений

Измерения выполнены на стенде Сибирского центра фотохимических исследований [5].

В исследовании был использован водный аэрозоль, вырабатываемый серийным ультразвуковым генератором: монодисперсная (не менее 90%) фракция диаметром 5 мкм. Для формирования воздушно-аэрозольного слоя применялась трубка из лавсана с открытыми концами ($\varnothing 40 \times 200$ мм), в отверстие боковой стенки которой вставлялся выходной патрубок генератора аэрозоля. Генератор имел три режима работы, позволяющих ступенчато изменять концентрацию частиц.

* Борис Григорьевич Агеев (ageev@asd.iao.ru); Юрий Николаевич Пономарев (yuron@iao.ru); Евгений Николаевич Чесноков (chesnok@kinetics.nsc.ru).

Излучение ЛСЭ при выходе из трубопровода транспортировки луча диафрагмировалось до диаметра 25 мм, после чего сферическим зеркалом осуществлялась фокусировка в место проведения измерений. Диаметр пучка излучения на выходе из трубки с исследуемой средой составлял ~15 мм. Мощность выходного излучения измерялась калориметром, в качестве которого служил термоэлектрический датчик собственного изготовления (рис. 1).

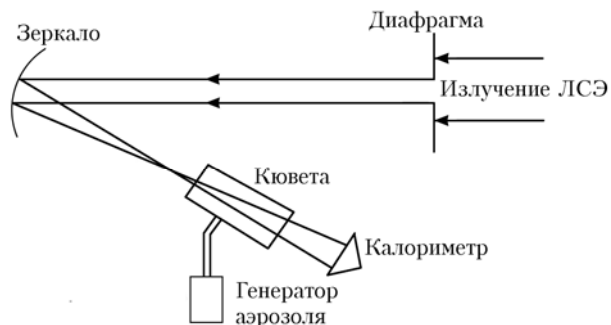


Рис. 1. Схема измерений

Измерения проведены на пяти линиях генерации ЛСЭ в диапазоне 60–83 см⁻¹. Спектральные характеристики излучения контролировались на Фурье-спектрометре Bruker IFS 66v/S (спектральное разрешение 0,115 см⁻¹). На рис. 2 показана суммарная спектрограмма линий генерации, а в таблице – их центральные частоты. Отметим, что все линии, кроме IV, свободны от поглощения атмосферным водяным паром.

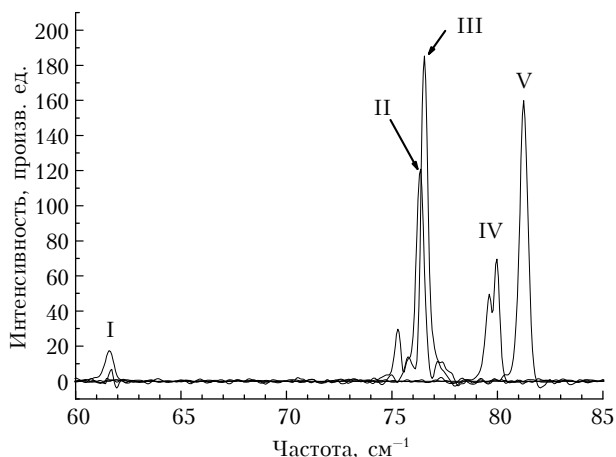


Рис. 2. Спектрограммы линий излучения ЛСЭ, используемые при измерениях

Центральные частоты линий генерации ЛСЭ

Номер линии	I	II	III	IV	V
Частота, см ⁻¹	61,6	76,4	76,6	79,8	82,8

Для сравнения на рис. 3 представлено полученное с помощью Фурье-спектрометра пропускание комнатного воздуха (температура 20 °С, относительная влажность ~30%) в исследуемой спектральной области, где поглощение обусловлено

именно водяным паром. Мощность излучения на наиболее сильной линии III составляла ~100 мВт.

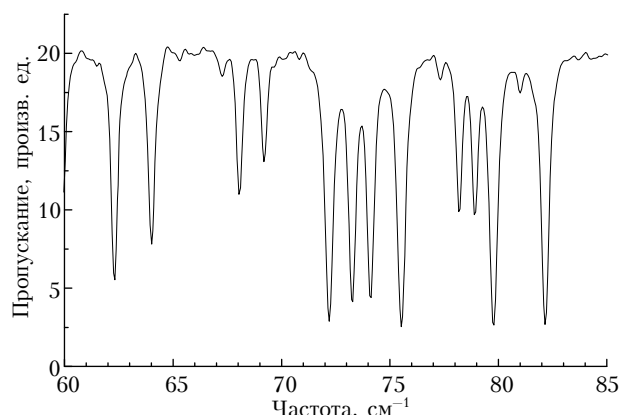


Рис. 3. Пропускание воздуха в области перестройки лазерного излучения

До проведения измерений экспериментально было установлено, что нестабильность мощности излучения на каждой линии за время, необходимое для единичного измерения ослабления, не превышает погрешности датчика (~10%). В связи с этим применялась одноканальная схема регистрации. Процедура измерений заключалась в регистрации мощности излучения ЛСЭ при отсутствии W_0 и наличии W аэрозольных частиц в канале распространения. По отношению зарегистрированных величин мощности определялось пропускание среды $T = W/W_0$.

Результаты измерений

Концентрационная зависимость

На линии II измерения выполнены при изменении режима генерации аэрозоля. Концентрация аэрозоля оценивалась экспериментально, по пропусканию соответствующей воздушно-аэрозольной среды излучения He-Ne-лазера с использованием расчетного значения коэффициента ослабления излучения частотой 15873 см⁻¹ сферическими каплями чистой воды. Результаты представлены на рис. 4.

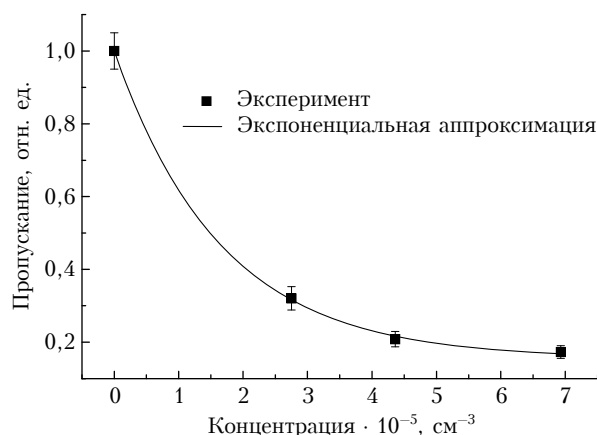


Рис. 4. Зависимость пропускания воздушно-аэрозольной среды от концентрации аэрозоля (частота линии излучения 76,4 см⁻¹)

Видно, что экспериментальные данные хорошо аппроксимируются экспоненциальной кривой. Это свидетельствует о соответствии пропускания исследуемой среды закону Бугера.

Спектральная зависимость

Измерения выполнены на пяти линиях при минимальной концентрации аэрозоля. Результаты показывают (рис. 5), что наблюдается заметное увеличение пропускания исследуемой среды при переходе в длинноволновую область, это согласуется с известной зависимостью коэффициента аэрозольного ослабления от длины волны излучения типа $k \sim \lambda^{-1}$ [6] (аппроксимация приведена на рис. 5).

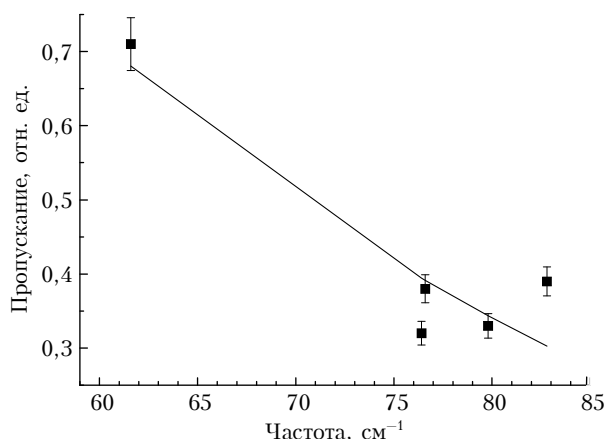


Рис. 5. Спектральная зависимость пропускания воздушно-аэрозольной среды (концентрация частиц $2,75 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$)

Также видно, что настройка линии генерации ЛСЭ на сильную линию поглощения воды ($79,8 \text{ см}^{-1}$) не приводит к соответствующему изменению пропускания по сравнению с соседними линиями. Это, видимо, говорит о том, что полученный результат обусловлен аэрозольной составляющей.

Заключение

Измерения и расчетные оценки ослабления излучения на линиях в диапазоне $60\text{--}83 \text{ см}^{-1}$ воздушно-аэрозольной смесью показали, что при реализованных условиях ослабление обусловлено в основном аэрозольной составляющей исследуемой смеси. В [7] представлены результаты эксперимен-

тальных измерений и численного моделирования регистрации сигнала обратного рассеяния от аэрозольного облака с модальным радиусом капель 2 мкм на длине волны 130 мкм ($76,923 \text{ см}^{-1}$). Полученные в этих работах данные в случае совместного учета могут быть использованы при оценках чувствительности дистанционного зондирования молекулярного состава атмосферы с помощью источников терагерцового излучения.

Работа выполнена при частичной поддержке интеграционных проектов № 9 и 79 междисциплинарных фундаментальных исследований СО РАН.

1. Cherkassky V.S., Knyazev B.A. Terahertz radiation: Last decade publications. Preprint BINP 2002-44 / Budker Inst. Nucl. Phys. (Novosibirsk). 2002. 42 p.
2. Ахмеджанов Р.А., Иляков И.Е., Корытин А.И., Литвак А.Г., Постникова А.С., Суворов Е.В., Шишкин Б.В. Применение нестационарной (time-domain) спектроскопии с использованием сверхширокополосных когерентных терагерцовых импульсов в интересах экологии, медицины и безопасности // Электромагнитные волны терагерцового диапазона. Программа фундаментальных исследований Президиума РАН № 29. Отчет за 2005 г. Проект 3.3. С. 77–81.
3. Bolotin V.P., Cherkassky V.S., Igumenov I.K., Kayran D.A., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kotenkov V.V., Kubarev V.V., Kulipanov G.N., Kuryshev G.L., Matvienko A.N., Medvedev L.E., Miginsky S.V., Mironenko L.A., Oreshkov A.D., Ovchar V.K., Petrov A.K., Popik V.M., Salikova T.V., Serednyakov S.S., Skrinisky A.N., Shevchenko O.A., Scheglov M.A., Vinokurov N.A., Zaigraeva N.S. Status of the Novosibirsk free electron laser and first experiments with high power terahertz radiation. Preprint BINP 2004-57 / Budker Inst. Nucl. Phys. (Novosibirsk). 2004. 22 p.
4. Агеев Б.Г., Матвиенко Г.Г., Пономарев Ю.Н., Чесноков Е.Н. Перспектива использования терагерцового диапазона в атмосферной оптике: Сб. трудов // Первое рабочее совещание «Генерация и применение терагерцового излучения». Новосибирск. 24–25 ноября 2005 г. Новосибирск: Изд-во ИЯФ СО РАН, ИХКиГ СО РАН, 2006. С. 96–103.
5. URL: <http://www.kinetics.nsc.ru/center>
6. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 256 с.
7. Кулипанов Г.Н., Лисенко А.А., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Кубарев В.В., Чесноков Е.Н., Бабченко С.В. Экспериментальные исследования взаимодействия терагерцового излучения новосибирского лазера на свободных электронах с водным аэрозолем // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1070–1073.

B.G. Ageev, Yu.N. Ponomarev, E.N. Chesnokov. Attenuation of THz radiation by water aerosol.

Results of the energy attenuation measurements of terahertz radiation from the free-electron laser by a model air-aerosol medium are presented. The spectral and concentration dependencies of energy attenuation are investigated. It was shown that the attenuation is caused by aerosol particulates for the implemented experimental conditions.