АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1994, том 40, № 1, с. 131 - 133

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 534.222.2

ГЕНЕРАЦИЯ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ ПРИ ПОГЛОЩЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

© 1994 г. Б. С. Агровский, В. В. Воробьев, В. А. Мякинин, И. Я. Сергеев

Институт физики атмосферы РАН

109017 Москва, Ж-17, Пыжевский, 3

Поступила в редакцию 08.04.93 г.

В работах [1, 2] была продемонстрирована возможность регистрации звуковых импульсов в воздухе при воздействии импульсного излучения CO_2 лазера на поглощающую поверхность твердого тела. Амплитуда и форма звукового импульса при заданных термодинамических параметрах воздуха и твердого тела и коэффициенте поглощения лазерного излучения определяется энергией лазерного импульса и ее распределением в поперечном сечении пучка. В работе [3] предложена методика восстановления распределения средней плотности энергии и полной энергии в пучке из акустических измерений. Эффективность этой методики подтверждена лабораторными измерениями звука, генерируемого при воздействии импульсов рубинового лазера на твердые мишени.

Как следует из оценок, наиболее перспективной областью применения акустических методов измерения энергии лазерных импульсов является применение их для диагностики лазерных пучков, распространяющихся на протяженных атмосферных трассах, когда возможно уширение их диаметра до величин порядка метра, а также регулярные и случайные блуждания (от импульса к импульсу) центра тяжести пучков. В предлагаемой заметке приводятся результаты измерений звуковых импульсов и восстановления по ним энергии лазерных пучков после прохождения ими атмосферной трассы.

В эксперименте исследовалась генерация звука при облучении твердой поверхности импульсным излучением эксимерного Xe–Cl лазера, длина волны излучения которого составляла 0.308 мкм, длительность импульса – 40 нс, энергия – 0.5 Дж, частота повторения – до 100 Гц. Сечение пучка на выходном окне лазера представляло собой вытянутый по вертикали прямоугольник размером 4 × 1 см. Распространение пучка на атмосферной трассе длиной 650 м приводило к существенному уширению пучка (до размеров около 30 см), искажению его структуры и к случайным смещениям центра тяжести пучка. Измерения звука проводились в павильоне на конце трассы. Звук генерировался при облучении лазерными импульсами оштукатуренной стены помещения. Схема измерений приведена на рис. 1.

Для того, чтобы проводить сравнение результатов акустических измерений с результатами измерений стандартным калориметрическим методом (возможности которого были ограничены применением для фокусировки на входное окно калориметра линзы диаметра 15 см), в измерениях использовалась не вся энергия пучка, а только наиболее энергоемкая ее часть, вырезаемая жестко закрепленной диафрагмой (1) диаметром 10 см. Эта часть пучка далее фокусировалась кварцевой сферической линзой (2) с фокусным расстоянием 6 м. Излучение на входное окно калориметра ИКТ-1М (3) отводилось с помощью стопы (4), набранной из 3-х кварцевых пластин и установленной вблизи фокальной плоскости линзы.

Прошедшее стопу излучение направлялось на стену (5) помещения, отстоящую от линзы на расстояние 12 м, таким образом размер пучка на поверхности стены был равен размеру диафрагмы. Энергия прошедшего диафрагму лазерного импульса не превышала 0.1 Дж. Звуковые импульсы, генерируемые при поглощении, регистрировались с помощью микрофона (6) и точного импульсного шумомера 00023 фирмы “Robotron”, имеющего полосу пропускания 10^2 - 2×10^4 Гц. Сигнал шумомера регистрировался цифровым запоминающим осциллографом С9-8(7), развертка которого запускалась в момент прихода лазерного импульса в фокальную плоскость. Для этого часть лазерного излучения с помощью кварцевой

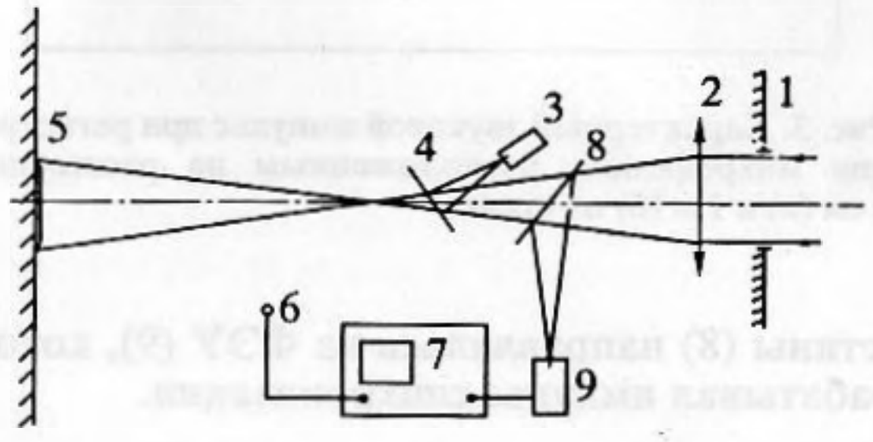

Рис. 1. Схема эксперимента.

Рис. 2. Фотография люминесценции ватмановской бумаги, помещенной в пучок на расстоянии 650 м от лазера.

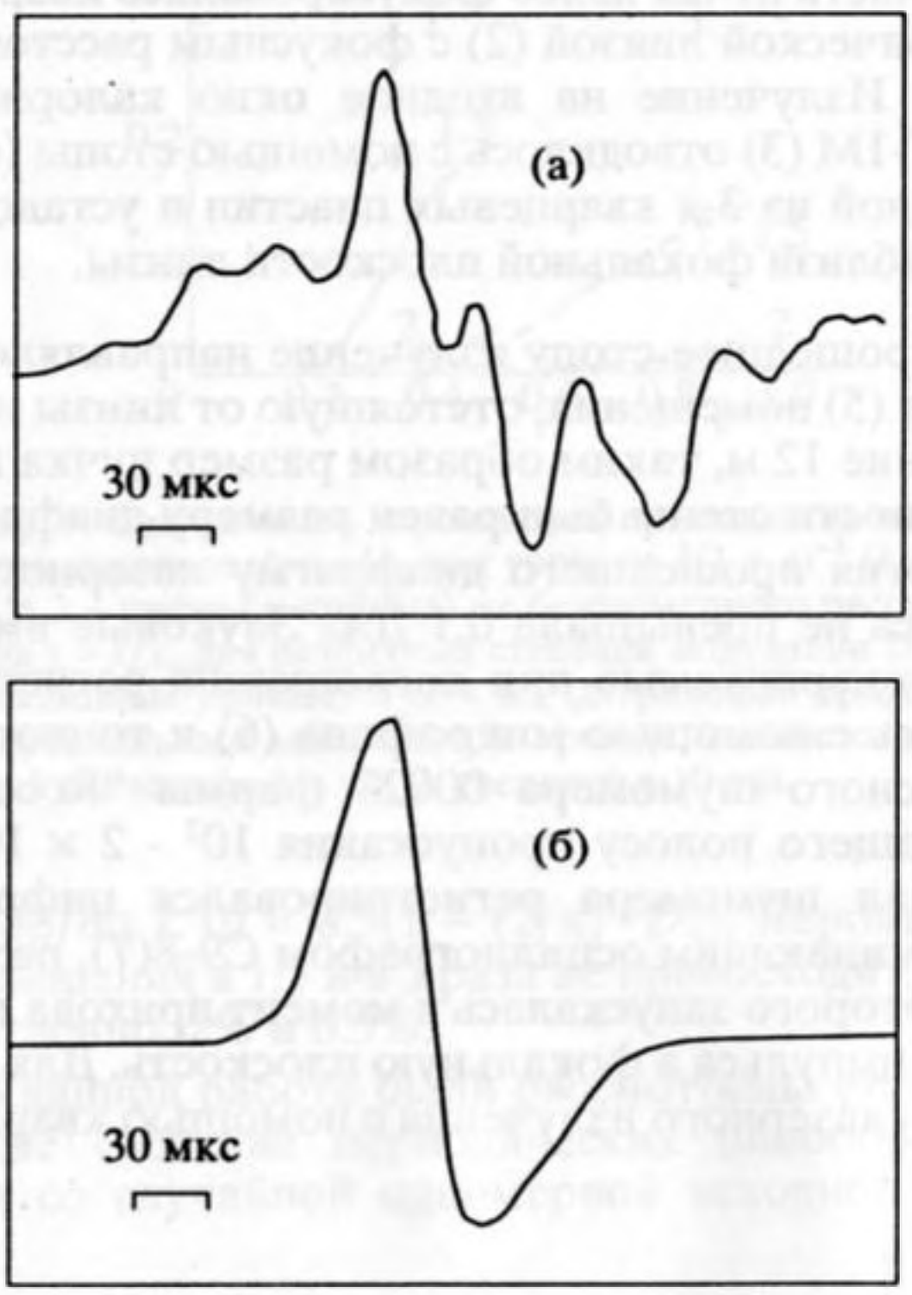

Рис. 3. Характерный звуковой импульс при регистрации микрофоном, расположенным на расстоянии 3 см (а) и 1 м (б) от стены.

пластины (8) направлялась на ФЭУ (9), который вырабатывал импульс синхронизации.

Для иллюстрации распределений энергии в пучке после прохождения трассы на рис. 2 пред-

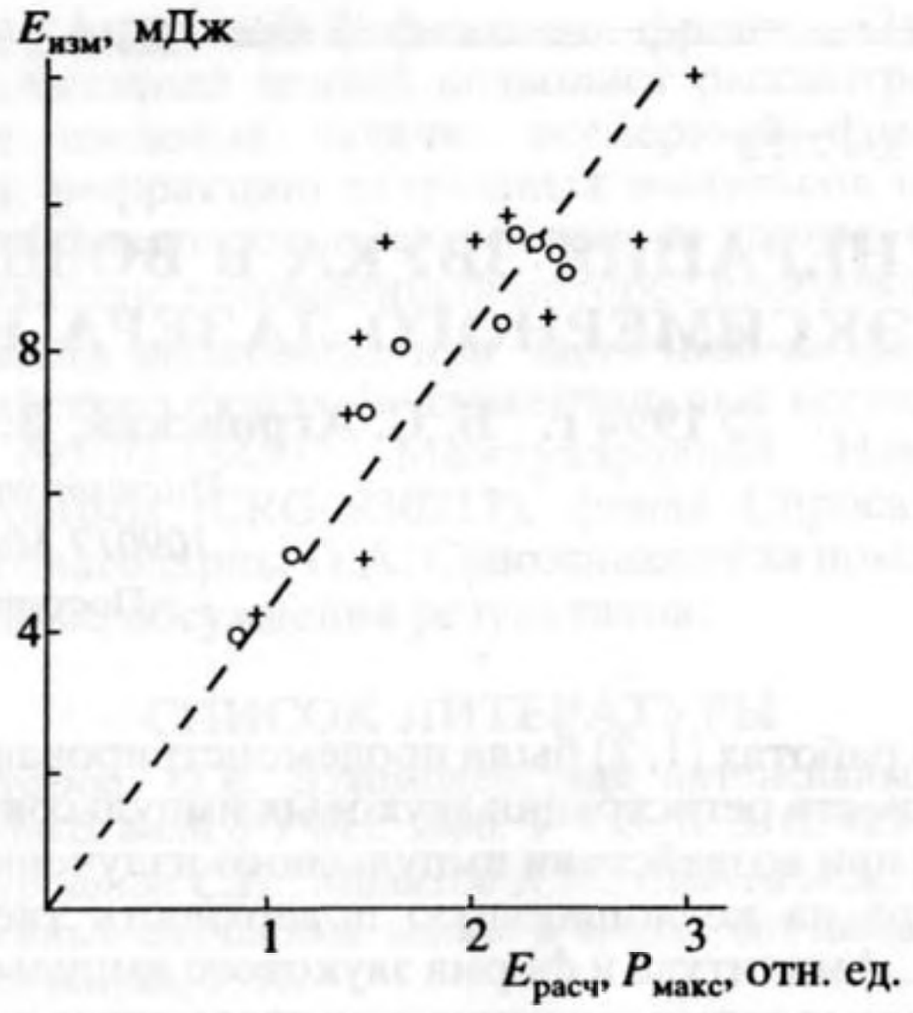

Рис. 4. Зависимости измеренных калориметром энергий лазерного импульса $E_{изм}$ от величины $E_{расч}$ – рассчитанной по формуле (3) (кружки) и от величины $p_{макс}$ – максимального давления в звуковом импульсе (крестики).

ставлена одна из характерных фотографий люминесценции ватмановской бумаги при ее облучении пучком. На рис. 3а приведена одна из осциллограмм звуковых импульсов, зарегистрированных на расстоянии 30 см от центра пучка и 3 см от поверхности стены. На ней заметны быстрые изменения звукового давления с временами $\tau \approx 60$ мкс, соответствующими пространственным масштабам распределения энергии в пучке $l \approx 2$ см. Масштаб l, как это и следовало ожидать, по порядку величины совпадает с радиусом корреляции флуктуаций интенсивности в турбулентной среде, т.е. радиусом зоны Френеля $(\lambda L)^{1/2} \approx 1.4$.

На рис. 3б приведена осциллограмма звукового импульса, зарегистрированная на большем, чем в предыдущем случае удалении от поверхности, а именно на расстоянии $z_0 = 1$ м от нее и на расстоянии $r_0 = 20$ см от центра пучка. Поскольку при такой геометрии происходит "сжатие" регистрируемого микрофоном импульса приблизительно в $(z_0/\rho_0 = 5)$ раз, из-за ограниченности частотной полосы микрофона быстрые изменения давления усредняются и они отсутствуют на осциллограммах.

Согласно формулам (14), (15) работы [3], давление $p(t)$ в звуковом импульсе, при выполнении условия $\tau_{las} \ll l/c$, где τ_{las} – длительность лазерного импульса, c – скорость звука в воздухе, связано с энергетическими характеристиками лазерного пучка соотношениями:

$$\int_0^t p(t)dt' = K\bar{J}\left(r = \sqrt{(ct)^2 - z_0^2}\right), \qquad (1)$$

где K – постоянная, зависящая от коэффициента поглощения лазерного излучения твердым телом, и от соотношений между коэффициентами теплопроводности, плотностями и теплоемкостями воздуха и твердого тела,

$$\bar{J}(r) = (2\pi)^{-1}\int J(r, \varphi)d\varphi - \quad (2)$$

усредненное по окружности радиуса r распределение плотности энергии $J(r, \varphi)$ на плоской поверхности твердого тела, r и φ – полярные координаты с центром в точке пересечения перпендикуляра к этой плоскости, опущенного из точки измерения звукового давления.

Из формул (1) и (2) для полной энергии E в пучке следует соотношение

$$E = \iint J(r, \varphi)rdrd\varphi = K_1\int_0^\infty tdt\int_0^t p(t')dt', \quad (3)$$

где K_1 – постоянная.

Зарегистрированные осциллографом зависимости $p(t)$ оцифровывались с шагом дискретизации 1 мкс и по формуле (3) рассчитывалась энергия в пучке. Зависимости энергий лазерного импульса, измеренных калориметром, от восстановленных из акустических измерений представлены на рис. 4. На этом рисунке светлыми кружками нанесены значения энергий, рассчитанные по формулам (3), крестиками – максимальные амплитуды звуковых импульсов. Видно, что точки группируются у прямой, проходящей через начало координат, что свидетельствует о линейном по энергии лазерного излучения механизме генерации звука. При этом разброс кружков относительно этой прямой значительно меньше, чем крестиков. Соответственно выше точность восстановления с использованием полной информации о звуковом импульсе, а не только о его амплитуде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карабутов А.А., Платоненко В.Т., Чупрына Г.В.* Невозмущающий опто-акустический метод измерения энергии светового импульса. ЖТФ, 1985. Т. 55. № 8. С. 1627 - 1629.
2. *Бендицкий А.А., Карабутов А.А., Кондратенко П.С., Шкардун Е.Д., Яковлев В.А.* Экспериментальное исследование термооптического возбуждения звуковых импульсов в воздухе. Акуст. журн. 1988. Т. 24. № 3. С. 414 - 416.
3. *Богатуров А.Н., Воробьев В.В., Мякинин В.А.* Восстановление пространственного распределения энергии в лазерных пучках из акустических измерений. Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 6. С. 986 - 992.