

02;08;12

## Об измерении пространственных энергетических характеристик мощного лазерного излучения

© А.П. Соловьев, О.В. Зюрюкина, М.И. Перченко

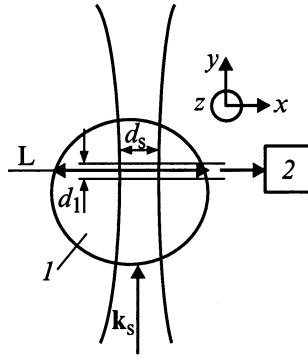
Научно-исследовательский институт механики и физики  
Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского

Поступило в Редакцию 12 марта 1999 г.  
В окончательной редакции 13 апреля 2000 г.

Рассмотрена зависимость сигнала рэлеевского рассеяния лазерного излучения на воздухе от параметров ультразвуковой волны в области наблюдения. Показано, что присутствие ультразвуковой волны приводит к появлению пространственного разрешения в направлении наблюдения при измерении энергетических параметров лазерного излучения по рэлеевскому рассеянию на частоте звука. Оценена минимальная интенсивность лазерного излучения и пространственное разрешение для конкретной частоты и интенсивности звука.

При разработке лазеров, при их использовании в технологических и исследовательских установках важны бесконтактные измерения пространственно-энергетических характеристик мощного лазерного излучения [1–4], когда нежелательно введение и излучение каких-либо элементов измерительных систем. В [5] теоретически и экспериментально показана возможность невозмущающих измерений параметров лазерного излучения на основе регистрации рэлеевского рассеяния, причем минимальная измеренная интенсивность излучения He–Ne лазера составила  $10 \text{ mW/cm}^2$  при объеме наблюдения  $V_R \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$  в телесном угле  $2.6 \cdot 10^{-2} \text{ ср}$ . Основным недостатком метода при диагностике лазерного излучения сложной структуры является отсутствие пространственного разрешения вдоль направления наблюдения. Этот недостаток можно устранить при введении в область наблюдения ультразвуковой волны и регистрации составляющей рэлеевского рассеяния на ультразвуковой частоте.

Рассмотрим схему взаимодействия, приведенную на рис. 1. В ней ультразвуковая волна проходит через область наблюдения фотоприемни-



**Рис. 1.** Схема измерения с УЗ волной:  $I$  — сечение лазерного пучка,  $2$  — фотоприемник;  $k_s$  — волновой вектор УЗ волны,  $d_1$  — размер канала наблюдения вдоль оси звука,  $d_s$  — диаметр УЗ волны в области измерения;  $L$  — размер лазерного пучка вдоль направления наблюдения; направление распространения лазерного излучения перпендикулярно плоскости рисунка.

ка. Для определенности полагаем, что направление ее распространения перпендикулярно осям приемника и лазерного излучения. При распространении ультразвуковой (УЗ) волны с частотой  $f$  в среде возникает добавочное звуковое давление  $p$  по отношению к среднему  $p_0$ . Для плоской волны, бегущей вдоль оси  $y$ , звуковое давление имеет вид:

$$p(y, t) = \bar{p}_A \exp(-j2\pi(ft - y/\Lambda)). \quad (1)$$

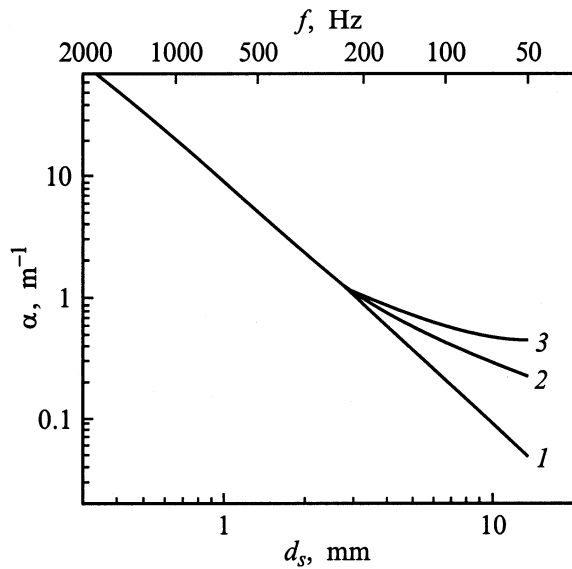
Здесь  $p_A = (2I\rho_0v)^{1/2} \exp(-\alpha y)$  — амплитуда волны,  $I$  — интенсивность звука при  $y = 0$ ,  $\rho_0$  — невозмущенная плотность среды,  $v$  — скорость распространения звука,  $\alpha$  — коэффициент затухания звука,  $\Lambda$  — длина волны звука [6]. Волна давления сопровождается волной плотности  $\rho$ , причем  $\bar{p}_A/\bar{p}_0 = \rho/\rho_0 = n/n_0 = m$ , где  $n_0$  — концентрация молекул газа при атмосферном давлении,  $n$  — амплитуда переменной составляющей концентрации молекул при распространении волны звукового давления. Мощность рэлеевского рассеяния  $W_R$  пропорциональна концентрации молекул газа, так что в сигнале рэлеевского рассеяния также появляется переменная составляющая на УЗ частоте. На фотоприемнике  $2$  суммируются мгновенные значения мощности рэлеевского сигнала  $W_S$

на УЗ частоте, пришедшие от участков  $y$  с фазой  $2\pi y/\Lambda$ . Если  $d_S$  — поперечный размер УЗ пучка,  $d_1$  и  $d_2$  — размеры сечения канала наблюдения вдоль распространения УЗ волны (вдоль оси  $y$  на рис. 1) и поперек (вдоль оси  $z$ ) соответственно, то амплитуду переменной составляющей мощности рэлеевского рассеяния в телесном угле  $\Omega$  для оптимального соотношения  $d_2 \leq d_S$  можно записать:

$$\begin{aligned} W_S &= \frac{\Lambda}{\pi d_1} \sigma n_0 \Omega V I_0 \sin\left(\frac{\pi d_1}{\Lambda}\right) \exp(-\alpha y) \frac{\sqrt{2I_V \rho_0}}{\rho_0} \\ &= W_R \frac{m\Lambda}{\pi d_1} \sin\left(\frac{\pi d_1}{\Lambda}\right) \frac{V}{V_R} \exp(-\alpha y), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $I_0$  — интенсивность лазерного излучения в области наблюдения на длине волны  $\lambda$ ,  $y$  — расстояние от источника звука до объема выборки,  $\sigma$  — сечение рэлеевского рассеяния, пропорциональное  $\lambda^{-4}$ ,  $V \cong d_1 d_2 d_S$  и  $V_R \cong d_1 d_2 L$  — объемы выборки переменной и постоянной составляющих мощности,  $L$  — размер лазерного пучка вдоль направления наблюдения. Можно видеть, что объем выборки переменной составляющей в случае  $d_S < L$  ограничен в направлении наблюдения не размером лазерного луча, а шириной УЗ пучка  $d_S$ . При фокусировке ультразвуковой волны ширину пучка можно сделать примерно равной  $d_S \cong 2\Lambda$ . На рис. 2 показана связь коэффициента затухания звука  $\alpha$  в сухом и влажном воздухе (влажность 40 и 100%) и минимального размера объема выборки вдоль направления наблюдения  $d_S = 2\Lambda$  от частоты звука для схемы измерения, представленной на рис. 1. В зависимости от необходимого разрешения поперек лазерного пучка можно выбрать частоту звука. Затухание на выбранной частоте зависит от расстояния от источника звука до области наблюдения, т.е. от диаметра измеряемого лазерного пучка  $d_L$ . В диапазоне УЗ частот от 200 kHz ( $\Lambda = 1.7$  mm,  $\alpha = 0.9$  m $^{-1}$ ) до 2 MHz ( $\Lambda = 0.17$  mm,  $\alpha = 70$  m $^{-1}$ ) затухание звука еще не слишком велико, а влажность воздуха практически не влияет на затухание и не сказывается на точности измерений. Например, для частоты звука  $f = 1$  MHz разрешение вдоль направления наблюдения  $\cong 0.7$  mm, затухание звука  $\alpha \cong 0.2$  cm $^{-1}$ . При прочих равных условиях значение  $W_S$  максимально при  $d_1 = \Lambda/2$ ,  $d_2 = d_S = 2\Lambda$  и примерно равно

$$W_{S\max} \cong \frac{4m}{\pi} I_0 n_0 \sigma \Omega \Lambda^3 \exp(-\alpha y). \quad (3)$$



**Рис. 2.** Связь коэффициента затухания звука  $\alpha$  в сухом и влажном воздухе с минимальным размером  $d_s = 2\Lambda$  объема выборки вдоль направления наблюдения для схемы измерения, представленной на рис. 1. Здесь кривая 1 соответствует сухому воздуху, 2 — влажности воздуха 40%, 3 — влажности 100%. Верхняя горизонтальная ось — соответствующая частота звука  $f$ .

Интенсивность  $I_0$  лазерного излучения может быть определена по измеренной переменной составляющей рэлеевского сигнала  $W_S$ . Оценим минимальную измеряемую интенсивность лазерного излучения. Ограничиваясь дробовым шумом и полагая, что он определяется постоянной составляющей рэлеевского рассеяния  $W_R$ , отношение мощности сигнала к мощности шума  $S/N$  на выходе фотоприемника можем записать в виде:

$$\frac{S}{N} \cong \frac{\sigma \lambda \eta \Omega n_0}{4ch} \frac{d_1 d_2 L I_0}{\Delta F} \left[ \frac{m \Lambda d_s}{\pi d_1 L} \sin \left( \frac{\pi d_1}{\Lambda} \right) \right]^2, \quad (4)$$

где  $\eta$  — квантовая эффективность ФЭУ,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света,  $\Delta F$  — полоса пропускания усилителя в приемной системе. При частоте звука 1 МГц и интенсивности звука в фокусе

$I = 1 \text{ W/cm}^2$ , наблюдения в телесном угле  $0.4 \text{ sr}$ , для длины волны излучения  $\lambda = 0.63 \text{ }\mu\text{m}$ , при оптимальном размере канала наблюдения  $d_1 = \Lambda/2$ , а  $d_2 = d_S = 2\Lambda$  (объем выборки  $V = 8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3$ ) и  $L/d_S = 5$ , отношение сигнал/шум, равное 1, реализуется при значении интенсивности лазерного излучения  $100 \text{ W/cm}^2$  и полосе пропускания усилителя приемной системы  $100 \text{ Hz}$ . Отметим, что  $I_{\min} \sim \lambda^3$ . Известными радиотехническими методами, например методом накопления, можно существенно повысить отношение сигнала к шуму.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ГК РФ ВО (ГР-72-96) и Программы "Университеты России — фундаментальные исследования" (проект № 1669).

## Список литературы

- [1] Беликова О.В., Давид Ю.К., Куприна Л.В. // Метрология. 1990. № 5. С. 25.
- [2] Гандельман Г.М., Кондратенко П.С., Левинский Б.Н. // Методы и средства измерений параметров лазерного излучения. М., Труды ВНИИФТРИ, 1985. С. 61.
- [3] Hillman L.W., Krasinsky J. et al. // Appl. Opt. 1983. № 22. P. 3474.
- [4] Fang Quwan, Zhang // Chin. J. Lasers. 1992. V. 19. N 5. P. 363.
- [5] Соловьев А.П., Зюрюкина О.В. // ПТЭ. 1999. № 3. С. 128–131.
- [6] Физические величины: Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991.