

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 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-

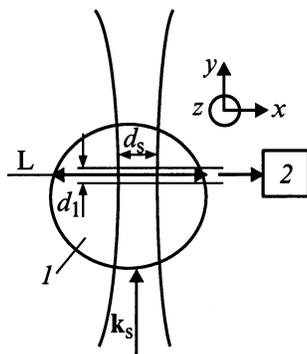


Рис. 1. Схема измерения с УЗ волной: I — сечение лазерного пучка, 2 — фотоприемник; k_s — волновой вектор УЗ волны, d_1 — размер канала наблюдения вдоль оси звука, d_s — диаметр УЗ волны в области измерения; L — размер лазерного пучка вдоль направления наблюдения; направление распространения лазерного 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 $y = 0$, ρ_0 — невозмущенная плотность среды, v — скорость распространения звука, α — коэффициент затухания звука, Λ — длина волны звука [6]. Волна давления сопровождается волной плотности ρ , 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 Ω 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 λ , y — расстояние от источника звука до объема выборки, σ — сечение рэлеевского рассеяния, пропорциональное λ^{-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 α 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

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

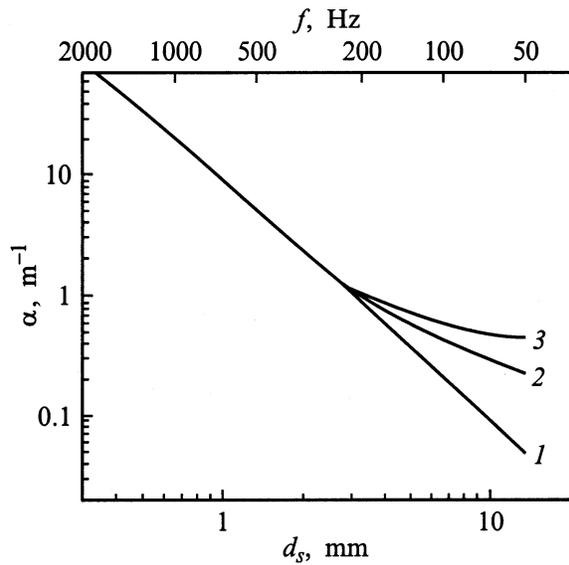


Рис. 2. Связь коэффициента затухания звука α в сухом и влажном воздухе с минимальным размером $d_s = 2\Lambda$ объема выборки вдоль направления наблюдения для схемы измерения, представленной на рис. 1. Здесь кривая 1 соответствует сухому воздуху, 2 — влажности воздуха 40%, 3 — влажности 100%. Верхняя 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 η — квантовая эффективность ФЭУ, h — постоянная Планка, c — скорость света, ΔF — 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 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 W/cm^2 и полосе пропускания усилителя приемной системы 100 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.