АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXIV 1988 Вып. 3

УДК 534.222.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ

Бендицкий А. А., Карабутов А. А., Кондратенко П. С., Шкардун Е. Д., Яковлев В. А.

Теоретически и экспериментально проанализировано косвенное термооптическое возбуждение звука при воздействии лазерных импульсов на различные мишени в воздухе. Для металлических зеркал амплитуда звуковых импульсов пропорциональна интенсивности света. Для графитовой мишени обнаружено проявление новых механизмов возбуждения звука в воздухе при превышении пороговой интенсивности света.

Воздействие лазерного излучения на поглощающую поверхность твердого тела приводит к генерации в газе, граничащим с облучаемым образцом, акустических колебаний. Этот эффект при интенсивностях излучения, меньших порогов оптического пробоя или разрушения мишени обычно связывают с нагревом приповерхностного слоя газа за счет теплопередачи на границе. Газ, нагреваясь, изменяет свою плотность, возбуждая акустическую волну [1]. В работе [2] зарегистрированы звуковые колебания в воздухе, возникающие при падении излучения CO_2-лазера на поглощающие поверхности.

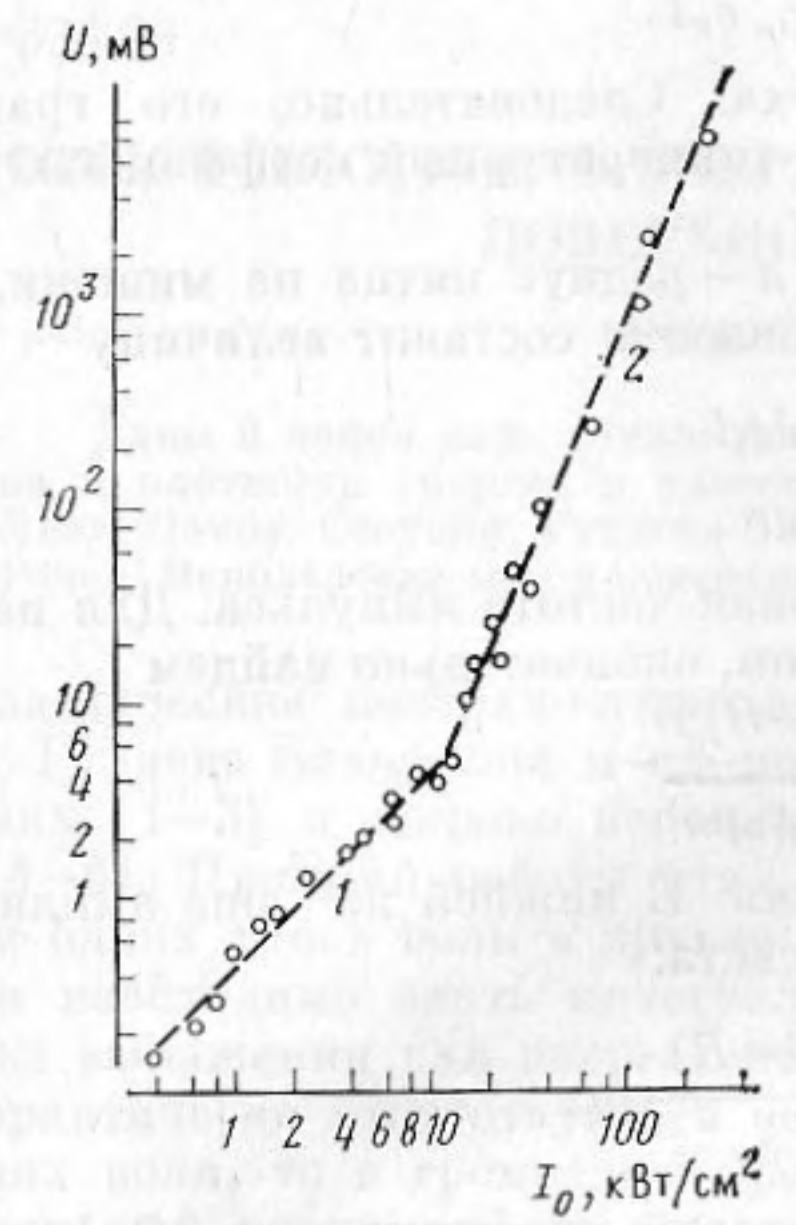
В данном сообщении приводятся результаты измерения акустических импульсов, появляющихся в результате воздействия лазерных импульсов на длине волны 10,6 мкм на различные образцы: графитовая, дюралевая и медная пластины, алюминиевое зеркало, нанесенное на стеклянную и медные подложки. Эксперименты проводились по обычной схеме: излучение импульсного CO_2-лазера (модель 143) направлялось на мишень либо непосредственно (поперечный размер пучка 1,5×1,0 см^2), либо фокусировалось зеркалом в пятно размером 0,3×0,3 см^2. Для изменения мощности излучения применялись фильтры, выполненные из тефлоновой пленки. Контроль энергии производился прибором ИМО-2Н, излучение на который ответвлялось пластиной ZnSe.

Относительные измерения амплитуды акустических сигналов проводились с помощью электродинамического микрофона МД-64, который включался либо на вход усилителя с коэффициентом усиления 74 дБ, либо на вход запоминающего осциллографа С8-13. Амплитуда импульсов давления измерялась также калиброванным пьезоприемником, изотовленным из керамики ЦТС-19. Чувствительность измерительной схемы при работе с микрофоном ограничивалась акустическими шумами работающей аппаратуры и составляла в условиях опыта 70 мкВ.

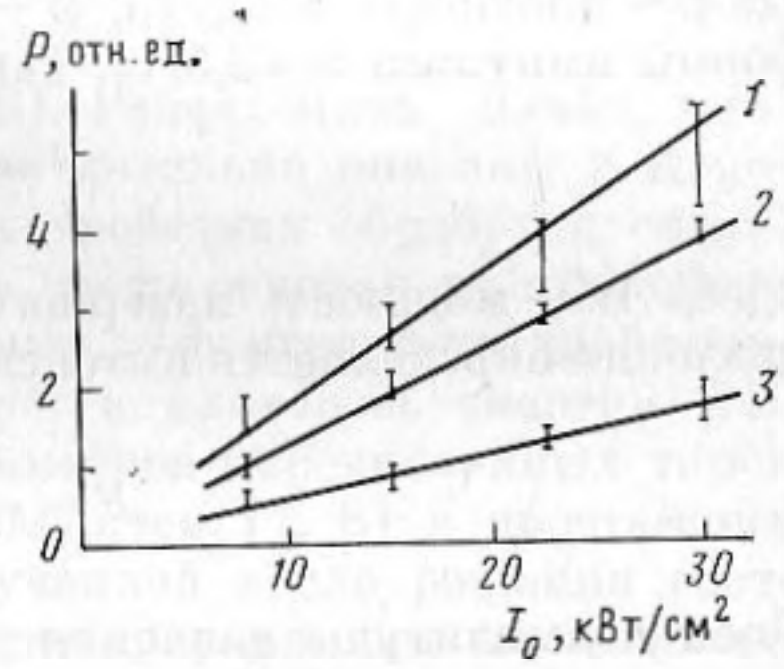
Было обнаружено следующее. При фиксированной интенсивности лазерного излучения I_0 в диапазоне $10^3 \div 10^4$ Вт/см^2 и многократном (10 импульсов) облучении одного и того же или различных участков поверхности графита амплитуда акустического сигнала P меняется на величину не более 20%. При больших интенсивностях и воздействии на один и тот же участок поверхности наблюдается снижение амплитуды возбуждаемых акустических импульсов. Эта зависимость от интенсивности приведена в таблице, число воздействующих импульсов — 10, частота следования — 2 Гц, размер пятна на мишени — 0,3×0,3 см^2.

Зависимость амплитуды акустического импульса от интенсивности света, падающего на графитовую мишень, представлена на фиг. 1. После каждого выстрела мишень сдвигалась, так чтобы излучение в следующем импульсе попадало на новый участок поверхности; зависимость снята при различных размерах пятна.

Результаты измерений амплитуды звука при облучении других образцов представлены на фиг. 2. В случае алюминиевого зеркала на медной подложке электрический сигнал на выходе усилителя был близок к пределу чувствительности схемы даже при максимальных использованных интенсивностях излучения в отличие от зеркала на стеклянной подложке. Этот факт может быть объяснен эффективным оттоком тепла в медную подложку по сравнению со стеклянной за время действия лазерного импульса. Для металлических образцов зависимость амплитуды давления от интенсивности сохраняла линейность



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Зависимость амплитуды звуковой волны в воздухе от интенсивности лазерного излучения на поверхности графитовой мишени. Показатели степенной зависимости $P \sim I_0^n$ на участке *1* – 1,0∓0,1, на участке *2* – 2,4∓0,2

Фиг. 2. Зависимость амплитуды звуковой волны в воздухе от интенсивности лазерного излучения для различных типов зеркал: *1* – медное, *2* – алюминиевое на стеклянной подложке, *3* – дюралевое

во всем исследованном диапазоне интенсивностей света. Для графитовой мишени эта зависимость меняется на степенную $P \sim I_0^n$ с показателем $n = 2{,}4 \pm 0{,}2$ при интенсивностях света выше 10 кВт/см². На границе пропорциональности $I_0 \cong 30$ кВт/см² амплитуда импульсов давления составляла $5 \cdot 10^2$ Па (размер пятна 1,5×1,0 см², расстояние мишень-приемник – 1,5 см).

Оценим амплитуду импульса, возбуждаемого за счет теплопередачи от мишени в воздух. Так как воздух в целом нагревается сравнительно слабо (ввиду его малой теплопроводности), тепловой поток от мишени в

Снижение амплитуды десятого импульса относительно первого при воздействии на один и тот же участок графита

I_0, кВт/см²	P_{10}/P_1	I_0, кВт/см²	P_{10}/P_1
13	1,0	90	0,6
26	0,87	120	0,4
30	0,75	150	0,3
46	0,6	270	0,3
77	0,6	540	0,25

воздух может быть оценен как $H(T_м - T_0)$, где H – коэффициент теплопередачи, $T_м$ – температура мишени и T_0 – температура воздуха. В нашем случае

$$T_м = \frac{(1-R) I_0 \sqrt{\tau_л}}{\sqrt{\lambda_м c_м \rho_м}},$$

где R — коэффициент отражения поверхности, $\tau_л$ — длительность лазерного импульса, $\lambda_м$, $c_м$, $\rho_м$ — теплопроводность, теплоемкость и плотность материала мишени. Приповерхностный слой воздуха толщины l нагреется на

$$T_в = \frac{(1-R) I_0 \tau_л^{1/2} H}{\sqrt{\lambda_м c_м \rho_м}\, c_V l},$$

где c_V — объемная теплоемкость воздуха. Следовательно, его граница сместится на величину $\Delta l = \beta l T_в$, где β — температурный коэффициент расширения воздуха.

В дальней волновой зоне $r \gg a^2/c\tau_л$ (a — радиус пятна на мишени, c — скорость звука в воздухе) амплитуда давления составит величину

$$P = \rho \frac{\omega^2 a^2 \Delta l}{2\pi r},$$

где ρ — плотность воздуха, ω — характерная частота импульса. Для нашей формы импульса $\omega \simeq 2{,}5/\tau_л$. Таким образом, окончательно найдем

$$P = \rho \frac{\beta H (1-R) W}{r\sqrt{\lambda_м c_м \rho_м}}.$$

Здесь W — мощность лазерного излучения. В нижней же зоне амплитуда давления определяется интенсивностью света:

$$P = \frac{I_0 \sqrt{\tau_л}\, H \beta (1-R)}{\sqrt{\lambda_м c_м \rho_м}\, c_V} \rho c.$$

Оценка амплитуды давления для графитовой пластины по этой формуле дает величину $\simeq 25$ Па, а измеренное значение составило 20 Па (при интенсивности порядка 1 кВт/см^2). Такое совпадение расчетного и измеренного значений представляется чрезвычайно хорошим, учитывая приближенный характер оценок и возможную зависимость коэффициента теплопередачи H от длительности импульса. Провести сопоставление амплитуд давления, измеренных с помощью микрофона, с расчетными не представляется возможным ввиду ограниченности его полосы пропускания. Однако наблюдается их соответствие по порядку величины.

При $I_0 > 10$ кВт/см^2 поверхность графита нагревается уже на десятки градусов и, по-видимому, начинают проявляться другие механизмы возбуждения звука. Это может быть испарение или десорбция поверхностных примесных слоев, микропробои на поверхности [3], взрывы микровключений [4]. Поэтому была предпринята попытка обнаружить пары воды, которые могли появиться в воздухе в результате облучения графита. Для этого образец помещался в газовую кювету спектрофотометра ИКС-29 и облучался серией импульсов (100 импульсов при интенсивности 50 кВт/см^2). Размер образца позволял располагать его внутри кюветы так, чтобы он не перекрывал окна кюветы. Снимался спектр пропускания до и после облучения образца. В области поглощения паров воды 3 мкм пропускание кюветы уменьшалось, хотя и незначительно (на 1÷2%), что находится в пределах погрешности эксперимента и не позволяет с уверенностью говорить о десорбции воды. Однако приведенные данные по генерации звука говорят в пользу этого механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жаров В. П., Летохов В. С.* Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. М.: Наука, 1984. С. 320.
2. *Бендицкий А. А., Мишке Б. А., Овчинникова И. Б., Рухман Г. И.* Об использовании оптически возбужденных звуковых волн для регистрации параметров лазерного излучения // Тез. докл. III Всесоюз. науч.-техн. конф. «Фотометрия и ее метрологическое обеспечение». М.: Стандарты, 1979. С. 256.
3. *Бендицкий А. А., Громов Г. Л.* Возможный механизм локального усиления поля излучения CO_2-лазера // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. № 12.
4. *Бабаджан Б. И., Лохов Ю. Н., Углов А. А.* Условия возникновения «пикитирования» поверхности металлооптического зеркала при облучении его ИК-излучением // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 1. С. 25–29.

Всесоюзный научно-исследовательский институт оптико-физических измерений

Поступила в редакцию 3.VI.1987