

## Заключение

Таким образом, продемонстрирована возможность измерения двулучепреломления в средах с большой анизотропией методами поляриметрии. Рассмотрены особенности применения поляриметрии для измерения двулучепреломления в тонкопленочных анизотропных материалах. Выполнена оценка чувствительности метода при исследовании свойств анизотропных материалов большой толщины.

## Литература

1. Хомченко, А.В. Измерение распределения разности фаз при линейном двулучепреломлении в твердых телах с внутренними напряжениями / А.В. Хомченко, И.У. Примак, А.Н. Василенко // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. Естественные науки. – 2016. – Т. 96, № 3. – С. 124–130.
2. Оптические свойства кристаллов / А.Ф. Константинова, Б.Н. Гречушников, Б.В. Бокуть, Е.Г. Валяшко. – Мн.: Наука и техника. – 1995. – С. 88–94.
3. Park, В.К. Precision polarimetry with real-time mitigation on optical window birefringence / В.К. Park, А.О. Sushkov, D. Budker // Review of Scientific instruments. – 2009. – Vol. 79, № 013108. – P. 1–5.
4. Hödemann, S. Scattered laser light fringe patterns for stress profile measurement in tempered glass plates / S. Hödemann [et al.] // European Journal Glass Scientific Technology, A. – 2014. – Vol. 55, № 3. – P. 90–95.

**С.В. Васильев, А.Ю. Иванов, В.И. Недолугов**  
УО «Гродненский государственный университет  
имени Янки Купалы», Гродно, Беларусь

## **РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА**

Целью данной работы является исследование формирования упругих волн при воздействии на металлический образец излучения импульсного лазера с плотностью потока  $\sim 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

## 1. Методика исследований и экспериментальная установка

Нами проведены экспериментальные исследования акустических волн, возникающих при действии лазерного излучения на поверхность металлических образцов. В качестве источника излучения использовался лазер на этанольном растворе родамина 6Ж [1]. Энергия лазерного импульса измерялась калориметром ИМО-2Н. Для получения достаточно однородного пятна облучения диаметром  $\sim (3 \div 4)$  мм с резкими краями часть лазерного пучка выделялась с помощью диафрагмы, изображение которой формировалось на поверхности мишени двухлинзовой системой. Сигнал с датчика давления, прикрепленного к тыльной стороне мишени и расположенного на оптической оси системы, подавался на вход запоминающего осциллографа С8-13. Запуск осциллографа осуществлялся посредством лазерного импульса, часть энергии которого подавалась на коаксиальный фотоэлемент через блок временной задержки.

Следует отметить, что обычно в экспериментальных установках длина коаксиального кабеля между датчиком и регистрирующим прибором достигает нескольких десятков метров, т.е. суммарная электрическая ёмкость кабеля может обусловить искажение формы регистрируемого сигнала, особенно если это короткий импульс с широким спектром. Поэтому согласование датчика давления с коаксиальным кабелем при подобных исследованиях является весьма актуальной задачей.

В частности, для согласования традиционно используемого датчика на основе пьезокерамики ЦТС-19, имеющего большое внутреннее сопротивление (порядка 1 МОм), с коаксиальной линией (коаксиальный широкополосный кабель типа РК-75, имеющий погонную электрическую ёмкость 70 пФ/м), необходим буферный усилитель с высокоомным входом и низкоомным выходом.

При длине линии равной 5м (реальная длина кабеля в экспериментальной установке) верхняя граничная частота полосы пропускания системы «датчик – регистратор» может быть оценена на основе формулы  $F_B = 1 / (R_d \times C_l)$ , где  $R_d$  – внутреннее сопротивление датчика, равное в нашем случае 1МОм,  $C_l$  – суммарная электрическая емкость коаксиального кабеля (1000пФ). При указанных значениях параметров находим  $F_B = 1 / (1 \times 10^6 \text{ Ом} \times 1000 \times 10^{-12} \text{ Ф}) = 1$  кГц, что явно недостаточно для регистрации широкополосных сигналов.

Следовательно, между датчиком и регистратором должно быть установлено согласующее устройство с высокоомным входом и низ-

коомным выходом, обеспечивающее с минимальными искажениями передачу формы сигнала от датчика к регистратору (запоминающему осциллографу С8-13).

Поэтому нами в качестве элемента, предназначенного для регистрации давления в акустической волне, использовалось беспроводное устройство регистрации физических величин (БУРФВ) [2]. При этом обеспечивалась дальность связи до 50 м и трансляция регистрируемой упругой волны без искажений.

В качестве резервного (контролирующего) элемента для регистрации давления в акустической волне использовался упомянутый выше датчик на основе пьезокерамики ЦТС-19 в сочетании с устройством, предназначенным для компенсации отражения [3]. Выбор типа датчика производился с учётом значительного (более чем в 2 раза) отличия пьезомодулей  $d_{31}$  и  $d_{33}$ , следствием которого была преимущественная регистрация составляющей упругого напряжения, нормальной к рабочему срезу. Полоса пропускания датчика была приемлемой для регистрации сигналов, частота которых не превышала 1 МГц.

## 2. Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате исследований показано, что временная зависимость составляющей тензора упругих напряжений  $\sigma_{zz}$ , регистрируемой на расстоянии  $l_p \geq 20$  см от облучаемой поверхности (указанное расстояние определялось толщиной мишени), имеет вид единичного импульса; при этом длительности акустического и падающего на образец лазерного импульсов практически совпадают.

Выявленная зависимость в указанных условиях хорошо соотносится с результатами, приведенными в работах [4, 5], а также с результатами расчетов  $\sigma_{zz}$  в объемной продольной волне, опубликованными в работе [6].

При действии лазерного излучения на металлический образец толщиной  $\sim (0,1 \div 1)$  см временная зависимость  $\sigma_{zz}(t)$  имела осциллирующий вид (рисунок 1). При этом длительность первого полупериода колебаний определялась длительностью лазерного импульса  $2\tau_1$ . Длительность следующих полупериодов не зависела от  $\tau$  и определялась диаметром пятна фокусировки лазерного излучения  $2\rho_1$  и глубиной  $h_f$  кратера, образовавшегося на поверхности мишени. При этом длина зарегистрированной акустической волны  $\lambda_1$  во много раз превышала как  $h_f$ , так и  $\rho_1$ , но была  $\sim \frac{\rho_1^2}{2h_f}$ . Очевидно, наличие осцилля-

ций в зависимости  $\sigma_{zz}(t)$  связано с колебаниями в поверхностной волне [6]; именно поэтому при  $l \gg \frac{\rho_1^2}{2h_f}$  функция  $\sigma_{zz}(t)$  имеет вид одиночного импульса.

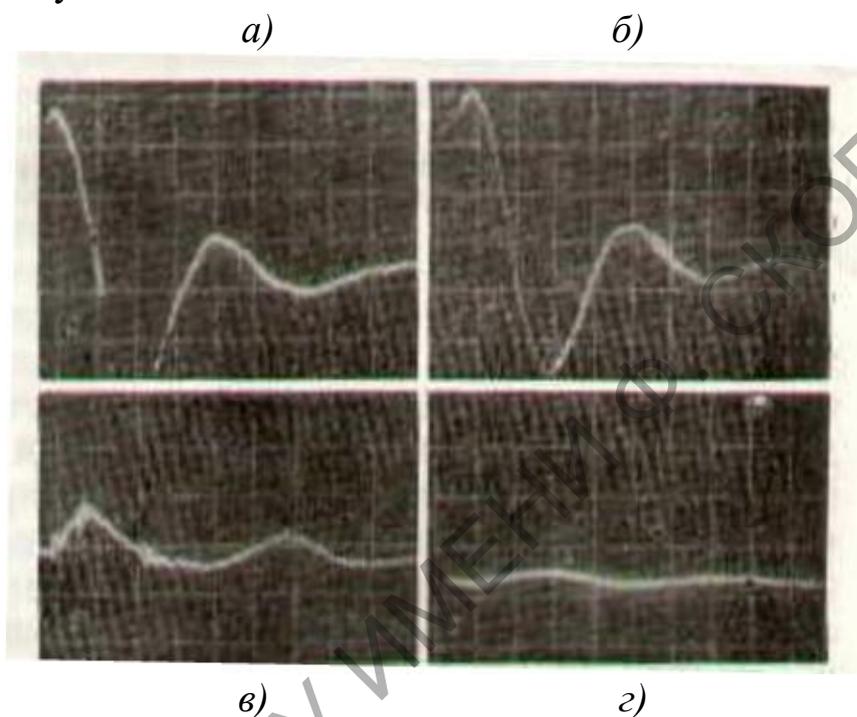
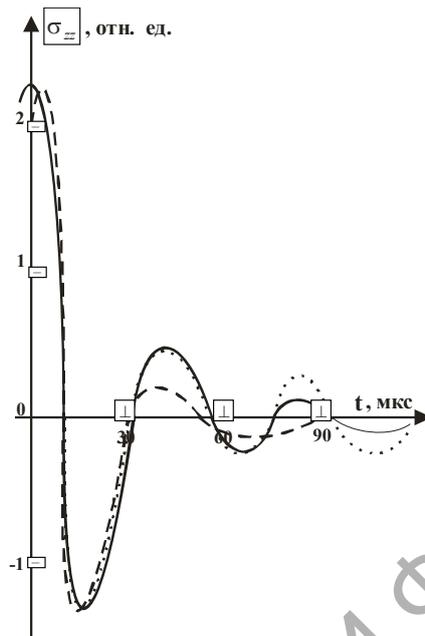


Рисунок 1 – Временные зависимости давления в акустической волне, зарегистрированной при действии лазерного импульса с энергией 25 Дж и длительностью 15 мкс (плотность потока мощности излучения 25 МВт/см<sup>2</sup>) на образцы из: а) алюминия (масса вынесенного металла  $m = 0,5$  мг); б) цинка ( $m = 0,7$  мг); в) висмута ( $m = 1,1$  мг) и з) меди ( $m = 0,3$  мг), зарегистрированные при помощи БУРФВ. На всех осциллограммах вдоль соответствующих осей масштаб одинаков: одно деление вдоль горизонтальной оси соответствует 5 мкс, вдоль вертикальной оси – 50 кПа

На рисунке 2 представлена временная зависимость давления в упругой волне, экспериментально зарегистрированной с использованием БУРФВ при действии на медный образец излучения лазера на этанольном растворе родамина 6Ж при следующих параметрах процесса:  $\tau \sim 15$  мкс,  $r_1 \sim 1,7$  мм,  $l_p \approx 0,9$  см. На этом же рисунке представлена временная зависимость давления в акустической волне, рассчитанная по методике, описанной в работе [6], при тех же значениях параметров  $\tau$ ,  $r_1$ ,  $l_p$  и при  $d = 0,2$  мм и  $T = 650$  °С.



- — эксперимент  
 - - - - - — расчет в линейном приближении,  
 ..... — расчет с учетом нелинейно — упругих эффектов

Рисунок 2 – Временные зависимости давления в акустической волне при действии лазерного импульса длительностью 10 мкс на образцы из меди

### Выводы

В результате проведенных исследований показано, что основным механизмом инициирования упругих волн при действии лазерного излучения на поверхность твердого образца является затухание ударной волны, сформировавшейся при плазмообразовании. Генерация акустических колебаний в таких условиях может быть описана в рамках модели нагруженной области, излучающей гиперзвуковые волны в упругую среду. Указанная область имеет форму сферического сегмента с основанием, совпадающим с основанием кратера, который формируется при действии лазерного излучения на поверхность твердого тела. Временная зависимость давления в возбужденной упругой волне соответствует последовательности затухающих осцилляций, амплитуда и период которых определяются отношением радиуса кривизны неупругой области  $R = r_1^2 / 2d$  к скорости продольного звука в облучаемом образце, а также температурой вещества  $T$  на границе зоны, в которой взаимодействие излучения с веществом является неупругим. Вследствие этого при известном радиусе кратера  $r_1$  можно по виду временной зависимости давления в акустической волне, сформировавшейся при действии лазерного излучения на твердое

тело, одновременно определять глубину неупруго деформированной области  $d$  и температуру  $T$ .

### Литература

1.Барихин, Б. А. Скоростная голографическая киносъемка лазерной плазмы / Б.А.Барихин, А.Ю.Иванов, В.И.Недолугов // Квантовая электроника. – 1990. – Т. 17, № 11 – С. 1477–1480.

2.Григуть, В.В. Компонентная база беспроводного устройства регистрации физических величин, применяемого в учебном эксперименте / В.В. Григуть // Современные информационные технологии в системе научного и учебного эксперимента: опыт, проблемы, перспективы : материалы III Межд. науч.-метод. конф. (Гродно, 14 – 15 мая 2015 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы; редкол.: В.Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2015. – С. 71–73.

3.Воронель, Е.С. Измерение импульсного давления на мишень при образовании светоэрозионного факела / Е.С.Воронель, Л.П.Кирюшин. // Известия СО АН СССР. Сер. технических наук. – 1991. – № 2. – С. 75–79.

4.Минько, Л.Я. О первоначальном плазмообразовании при воздействии лазерного излучения на поглощающие материалы в условиях плоской геометрии разлета образующейся плазмы / Л.Я.Минько, Ю.А.Чивель, А.Н.Чумаков // ЖПС. – 1985. – Т. 42, № 1. – С. 55–61.

5.Лямшев, Л.М. Лазеры в акустике / Л.М.Лямшев. // УФН. – 1987. – Т. 151, № 3. – С. 479–528.

6.Иванов, А.Ю. Акустическая диагностика процесса лазерной обработки материалов / А.Ю.Иванов. – Гродно: ГрГУ, 2007. – 280 с.

### С.С. Гиргель

УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

## СВОЙСТВА ЦИРКУЛЯРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ КУММЕРА – ГАУССА С НЕПРЕРЫВНЫМ УГЛОВЫМ ИНДЕКСОМ

### Введение

Исследование известных и поиск новых решений для оптических полей всегда актуальны. В настоящее время наибольший интерес