

УДК 53.082.54, 533.6.011.72, 535.321.9, 535.327, 535.338.334, 537.531

СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КВАЗИИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Д. В. Назаров, А. Л. Михайлов, А. В. Федоров, С. Ф. Маначкин,
В. Д. Урлин, А. В. Меньших, С. А. Финюшин, В. А. Давыдов,
Е. В. Филинов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт физики взрыва, 607190 Саров, root@gdd.vniif.ru

Экспериментально исследовано изменение показателя преломления в полиметилметакрилате и фтористом литии при квазиизоэнтропическом нагружении. Определены значения показателя преломления и поправочного коэффициента в формуле для расчета массовой скорости. Результаты, полученные при квазиизоэнтропическом нагружении вещества, сопоставлены с известными данными для ударно-волнового сжатия исследуемых материалов.

Ключевые слова: показатель преломления, квазиизоэнтропическое сжатие, ударная волна, лазерный доплеровский интерферометр Фабри — Перо, монокристалл фторида лития, полиметилметакрилат.

ВВЕДЕНИЕ

Оптически прозрачные материалы традиционно используются в качестве окон в оптических пирометрах, спектро스코пах, при проведении измерений массовой скорости на границе раздела материал/окно с использованием лазерных доплеровских измерителей скорости VISAR, ORVIS и Fabry — Perot. В последнем случае оконные материалы, как правило, применялись для исследования условий ударного нагружения. В таких экспериментах должно приниматься во внимание изменение коэффициента преломления материала окна в зависимости от степени сжатия за фронтом ударной волны. При изоэнтропическом нагружении сжатый материал находится при гораздо более низкой температуре, чем при ударном нагружении, сжатый до такого же давления. Температурное различие тем больше, чем больше давление нагружения. Необходимо также знать, как изменяются прозрачность и коэффициент преломления в зависимости от давления в условиях изоэнтропического и квазиизоэнтропического нагружений.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При регистрации лазерными интерферометрическими методами скорости контактной границы через прозрачное «окно» возникает дополнительный доплеровский сдвиг частоты, который обусловлен движением среды с изменяющимся показателем преломления. Фактиче-

ски измеряемая скорость есть первая производная от видимой толщины окна L_{app} , которую в общем случае можно выразить как

$$L_{app} = \int_0^{L_{real}} n(x) dx, \quad (1)$$

где L_{real} — действительная толщина окна, $n(x)$ — показатель преломления вдоль пути лазерного луча.

На необходимость учета влияния изменения показателя преломления в ударно-сжатом прозрачном материале при определении скоростей контактных границ с помощью интерферометрических измерителей скорости указывали авторы работ [1–5]. Так, в экспериментах [2, 5], проводимых с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR, отмечена необходимость учета коэффициента оптической коррекции $\Delta\nu/\nu$ в формуле определения действительной массовой скорости, которая больше реальной в K раз:

$$K = 1 + \Delta\nu/\nu. \quad (2)$$

Если предположить, что показатель преломления прозрачного материала зависит только от степени сжатия в соответствии с соотношением

$$n_{i+1} = n_i + \left. \frac{dn}{d\rho} \right|_i (\rho_{i+1} - \rho_i) = n_i + \left. \frac{dn}{d\sigma} \right|_i (\sigma_{i+1} - \sigma_i) \quad (3)$$

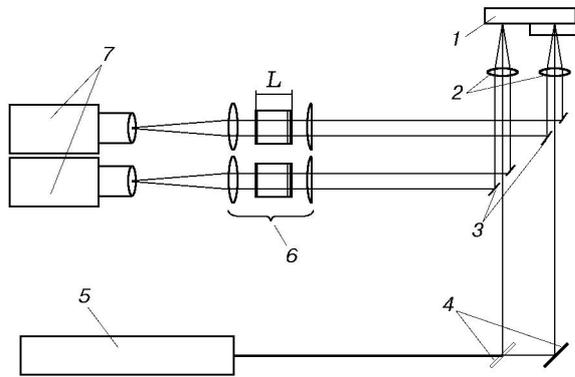


Рис. 1. Двухканальная схема регистрации:
 1 — ступенчатый образец; 2 — линзы; 3 — зеркала с отверстиями; 4 — отражающие (50 и 100 %) зеркала; 5 — рубиновый лазер, $P \approx 200$ Вт, $\lambda = 694.3$ нм; 6 — интерферометры Фабри — Перо; 7 — фоторегистраторы

($\sigma_i = \rho_i/\rho_0$ — сжатие материала окна в i -й ударной волне, ρ_0 — исходная плотность), то при сжатии несколькими ударными волнами значение K будет определяться соотношением

$$K_i = n_0 - \left. \frac{dn}{d\sigma} \right|_i = \frac{U'_i}{U_i}. \quad (4)$$

Для определения K_i по формуле (4) необходимо лазерным интерферометрическим методом измерить кажущуюся массовую скорость U'_i в материале окна, по которому идет волна сжатия, и реальную массовую скорость U_i . Последнюю можно оценить либо расчетным образом, либо по измерению скорости свободной границы материала окна, используя правило удвоения массовой скорости при выходе волны на свободную границу.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В настоящей работе исследовалось поведение показателей преломления монокристалла фтористого лития (LiF) (ось $\langle 001 \rangle$) при давлениях квазиизотропического нагружения $p \approx 30$ и ≈ 60 ГПа и образцов полиметилметакрилата (ПММА) при $p \leq 16$ ГПа.

Образцы нагружались в квазиизотропическом режиме — последовательностью ударных волн, выходящих из пакета пластин различной динамической жесткости. Такой режим не является изотропическим, но позволяет существенно снизить разогрев вещества при максимальном сжатии, а регистрация фронта

ударных волн дает возможность точно оценивать реализованные состояния вещества.

Для одновременного измерения скоростей свободной и контактной границ в прозрачном материале применялась двухканальная система регистрации, изображенная на рис. 1. Образец выполнен в виде ступенчатой пластины. На внешнюю поверхность первой ступени методом вакуумного напыления наносился отражающий слой алюминиевого покрытия толщиной $1 \div 2$ мкм или накатывалась алюминиевая фольга толщиной 10 мкм. Вторая ступень пластины выполнялась из того же материала, что и первая, и прижималась к отражающей границе. Поверхности пластин полировались до оптической прозрачности. Первый канал регистрации измерял скорость свободной границы окна, второй — скорость внутренней контактной границы в окне на той же лагранжевой координате. Измерения скорости проводились лазерным интерферометром Фабри — Перо на фотоэлектронных регистраторах щелевой развертки, относительная погрешность измерения $\approx 3\%$. Из формулы (4) видно, что погрешность измерения скорости сказывается на погрешности определения производной $\frac{dn}{d\sigma}$, оценка которой в данном случае дает значение $\approx 5\%$.

Показатель преломления на длине волны рубинового лазера ($\lambda = 694.3$ нм) для LiF составляет $n_{\text{LiF}} = 1.390$, для ПММА — $n_{\text{PMMA}} = 1.491$; начальная плотность исследуемых оконных материалов составляет для LiF $\rho_{\text{LiF}} = 2.644$ г/см³, для ПММА — $\rho_{\text{PMMA}} = 1.180$ г/см³ [6].

На рис. 2, 3 представлены расчетные профили давления и схемы используемых нагружающих устройств, в которых из пакета пластин с различной динамической жесткостью в образец входит последовательность ударных волн.

Так как трехволновая квазиизотропическая волна сжатия при движении в материале окна быстро вырождается в ударную, то регистрация скорости в образцах LiF и ПММА проводилась при толщине первой ступени $\Delta = 3$ и 5 мм соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

На рис. 4 представлена типичная интерферограмма скорости, где четко выделяется фронт и можно оценить параметры ударных волн, входящих в исследуемый образец.

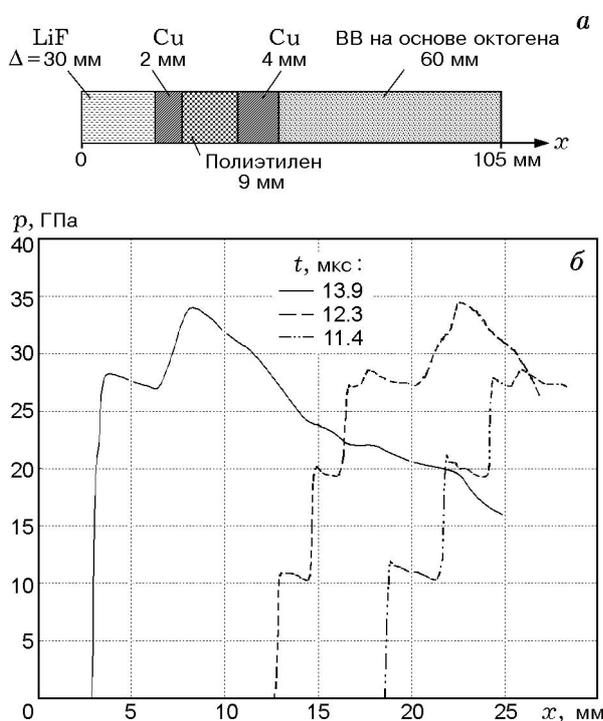


Рис. 2. Схема модельного устройства с образцом из LiF (а) и профиль давления в образце ($p_{\max} \approx 30$ ГПа) в различные моменты времени (б)

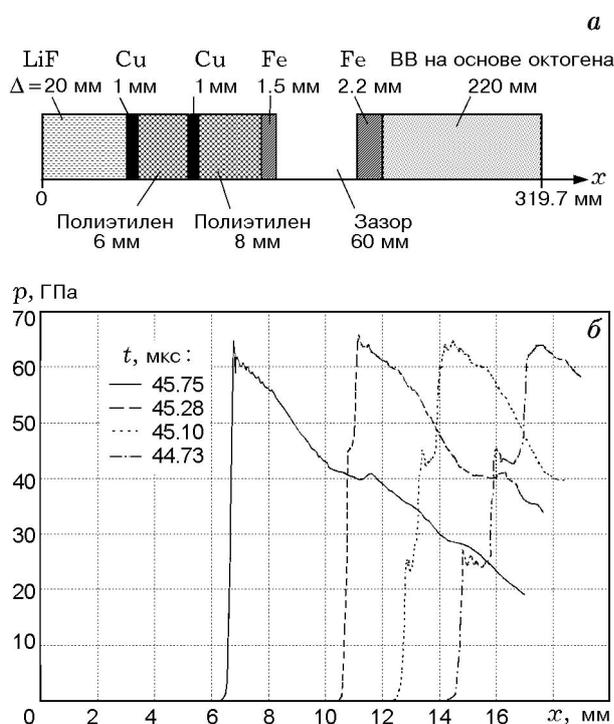


Рис. 3. Схема модельного устройства с образцом из LiF (а) и профиль давления в образце ($p_{\max} \approx 60$ ГПа) в различные моменты времени (б)

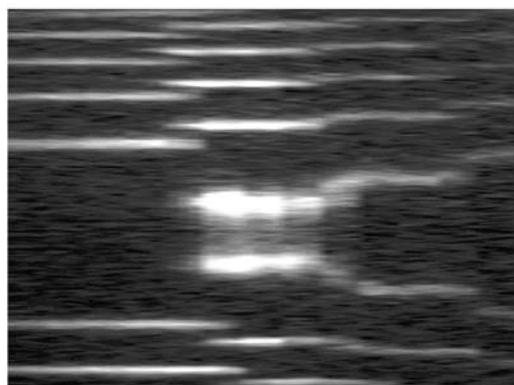


Рис. 4. Интерферограмма Фабри — Перо массовой скорости внутри образца LiF при нагружении трехступенчатой волной сжатия до $p_{\max} \approx 30$ ГПа

Давление и сжатие в настоящей работе для последовательности ударных волн определены с использованием уравнения состояния LiF [7] на основе экспериментально измеренных значений скорости свободной границы образцов LiF.

По схеме, изображенной на рис. 2, проведен также один опыт по определению кажущейся массовой скорости $U'(t)$ и скорости свободной границы $W(t)$ в образце из ПММА. В профиле $W(t)$ зарегистрировано три волны сжатия, при этом значения скоростей $W_1 = 1890$ м/с, $W_2 = 3440$ м/с.

Результаты опыта с ПММА хорошо описываются линейной зависимостью $n(\sigma)$, где $dn/d\sigma = 0.462$.

Зависимость $n(\sigma)$ для ударно-волнового сжатия LiF, построенная по данным работы [1], и зависимость для квазиизэнтропического сжатия LiF, зарегистрированная в настоящей работе, представлены на рис. 5.

Зависимость $n(\sigma)$ для квазиизэнтропического сжатия ПММА, зарегистрированная в настоящей работе, приведена на рис. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя данные рис. 5 для диапазона давлений $p = 1.5 \div 115$ ГПа из [1], находим среднее значение производной $dn/d\sigma = 0.109$ ($K = 1.285$), а в диапазоне давлений $p = 11.2 \div 45.3$ ГПа, который исследовался в настоящей работе, $dn/d\sigma = 0.105$.

Зарегистрированные в настоящей работе

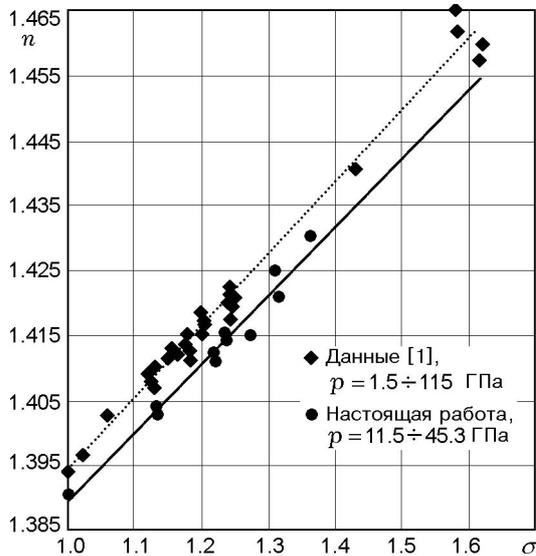


Рис. 5. Зависимость $n(\sigma)$ для опытов при ударно-волновом нагружении LiF

значения показателя преломления LiF при квазиизотропическом сжатии расположены ниже данных работы [1], что обусловлено другой длиной волны использованного в [1] зондирующего лазера ($n_0(\lambda_1) = 1.3939$, $\lambda_1 = 514.5$ нм; $n_0(\lambda_2) = 1.3902$, $\lambda_2 = 694.3$ нм). По результатам проведенных опытов можно сделать вывод, что поправочный коэффициент $K = 1 + \Delta\nu/\nu$ практически постоянен как при ударно-волновом, так и при квазиизотропическом нагружении и составляет $K = 1.295$. В области давлений до $p \approx 45$ ГПа показатель преломления зависит в основном от степени сжатия (плотности) и хорошо описывается линейной зависимостью с наклоном $dn/d\sigma = 0.105$. Другими словами, это позволяет говорить о слабой зависимости показателя преломления LiF от температуры в волне сжатия в исследованном диапазоне давлений.

По данным работы [8] в области $p \leq 70$ ГПа зависимость показателя преломления от температуры по крайней мере на порядок меньше его зависимости от плотности. Экспериментальные результаты настоящей работы подтверждают данные работы [8].

Квазиизотропическое сжатие образца из ПММА до давления ≈ 17 ГПа не привело к потере прозрачности. Показатель преломления выявил также линейную зависимость от степени сжатия с наклоном $dn/d\sigma = 0.462$ (см.

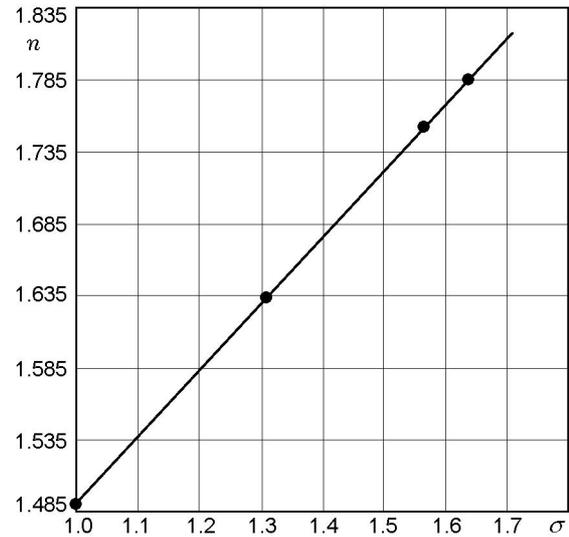


Рис. 6. Зависимость $n(\sigma)$ при квазиизотропическом нагружении ПММА в диапазоне давлений $p = 4.5 \div 16.9$ ГПа

рис. 6). Сравнивая для ПММА результаты настоящей работы и работы [2], где $\Delta\nu/\nu = 0.05$, можно отметить их хорошее согласие, так как значение $\Delta\nu/\nu$ из формулы (2) в нашем случае оказалось равным 0.03.

Таким образом, в диапазоне квазиизотропического сжатия $\sigma = 1.132 \div 1.366$ ($p = 11.7 \div 44.6$ ГПа) зарегистрированы значения показателя преломления LiF $n = 1.403 \div 1.430$, которые могут быть описаны линейной зависимостью с наклоном $dn/d\sigma = 0.105$. В диапазоне квазиизотропического сжатия ПММА $\sigma = 1.310 \div 1.637$ ($p = 4.5 \div 16.9$ ГПа) показатель преломления составил $n = 1.633 \div 1.785$ и может быть описан линейной зависимостью с наклоном $dn/d\sigma = 0.462$.

Данные, полученные в настоящей работе, и данные [1] хорошо согласуются и описываются линейной зависимостью $n(\sigma)$. В результате можно сказать, что различие показателей преломления при ударно-волновом и квазиизотропическом сжатии столь мало, что в пределах погрешности лазерного интерферометрического метода выявить его не удастся.

Работа выполнена по контракту ВНИИЭФ с Сандийскими национальными лабораториями (№ 17083). Авторы выражают благодарность доктору Л. С. Чабилдасу (США) за ценные рекомендации по проведению экспериментов и полезное обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wise J. L., Chhabildas L.C.** Laser interferometer measurements of refractive index in shock-compressed materials // *Shock Waves in Condensed Matter* / Y. M. Gupta (Ed.). 1986.
2. **Barker L. M., Hollenbach R. E.** Shock wave studies of PMMA fused silica and sapphire // *J. Appl. Phys.* 1970. V. 41. P. 4208–4226.
3. **Hardesty D. R.** On the index of refraction of shock compressed liquid nitromethane // *J. Appl. Phys.* 1976. V. 47. P. 1994.
4. **Setchell R. E.** Index of refraction of shock compressed fused silica and sapphire // *J. Appl. Phys.* 1979. V. 50. P. 8186.
5. **Barker L. M., Schuler K. W.** Correction to the velocity-per-fringe relationship for the VISAR interferometer // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45. P. 3692.
6. **Воронков Е. М., Гречушников В. Н., Кистлер Г. И. и др.** Оптические материалы для инфракрасной техники. М.: Наука, 1965.
7. **Урлин В. Д.** Измерение температур ударно-сжатых сред и уравнение состояния конденсированного вещества // *Ударные волны и экстремальные состояния вещества* / Под ред. В. Е. Фортова, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина и др. М.: Наука, 2000. С. 255–296.
8. **Кормер С. Б.** Исследование оптических свойств ударно-сжатых твердых диэлектриков // *Успехи физ. наук.* 1968. С. 641–687.

*Поступила в редакцию 28/III 2005 г.,
в окончательном варианте — 16/XI 2005 г.*