

- [5] Д е Ж е н П. // Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с.
- [6] В о л о в и к Г.Е., Л а в р е н т о в и ч О.Д. // ЖЭТФ. 1983. Т. 85. В. 6. С. 1997-2010.
- [7] W и В.-G., W e s t J.L., D o a n e J.W. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. № 9. P. 3925-3931.
- [8] К о в а л ь ч у к А.В., К у р и к М.В., Л а в р е н т о - в и ч О.Д. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 5. С. 350-364.

Поступило в Редакцию
4 января 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 6
02; 07

26 марта 1989 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАННИХ СТАДИЙ ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ОРГСТЕКЛА

Г.П. К у з ь м и н, Г.Р. Т о к е р

В работе исследовались ранние стадии процесса лазерного разрушения прозрачного полимера при фокусировке в объем образца гигантского импульса излучения рубинового лазера. Использование в эксперименте в качестве диагностической методики импульсной двухэкспозиционной голографической микроинтерферометрии позволило визуализировать картину несобственного пробоя прозрачного полимера одиночным лазерным импульсом в моменты времени, непосредственно примыкающие к концу импульса. Определены давления за фронтом сферических ударных волн субмиллиметровых размеров, инициированных поглощением лазерного излучения на включениях.

В настоящее время выполнено большое количество работ экспериментального и теоретического характера, связанных с выяснением механизмов лазерного разрушения прозрачных твердых тел [1], в том числе прозрачных полимеров [2]. Показано (исчерпывающая библиография содержится в [2]), что оптический пробой прозрачных полимеров обусловлен всегда присутствующими в объеме образца поглощающими включениями. Нагрев поглощающего включения сфокусированным лазерным излучением надпороговой интенсивности сопровождается возникновением термоупругих напряжений, тепловой ионизации и других тепловых эффектов, приводящих к объемному разрушению прозрачного полимера.

В отличие от традиционных методов исследования оптического пробоя прозрачных диэлектриков [3], в настоящей работе предпринята попытка визуализации и исследования области пробоя методами голографической интерферометрии, обеспечивающими высокие временное и пространственное разрешение [4] (отметим, что в [5] голографическая методика использовалась для получения теннеграмм области пробоя, а давление определялось косвенным образом).

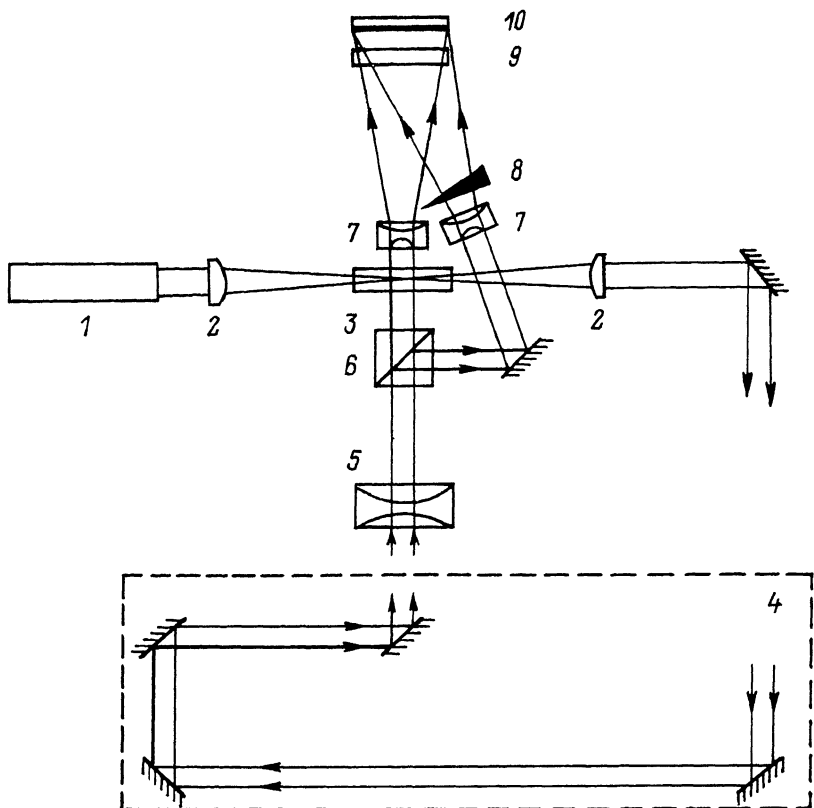


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, включающая голографический микроинтерферометр сфокусированного изображения.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. Излучение рубинового лазера (1) с пассивной модуляцией добротности, которая осуществляется путем введения в резонатор пассивного элемента (КС-19), характеризуется основными параметрами: $\mathcal{E} = 0.1-1$ Дж, $\tau_{1/2} = 30$ нс, $\lambda = 0.6943$ мкм. Лазерный пучок с помощью короткофокусной линзы (2) ($F = 40$ мм) фокусировался в объем тонкой ≈ 2 мм пластинки из оргстекла (3). Часть лазерного пучка, прошедшего область пробоя, собиралась и коллимировалась линзой. После прохождения оптической линии задержки (4) лазерное излучение использовалось для диагностики области пробоя.

Голографический интерферометр сфокусированного изображения обеспечивает статическое пространственное разрешение $\lesssim 10$ мкм по полю 2 мм. Диагностирующее излучение собирается объективом (5) (И-51) и, минуя светоделительный кубик (6), зондирует область пробоя. Микрообъектив (7), находящийся в предметном плече интерферометра, строит сфокусированное изображение области пробоя

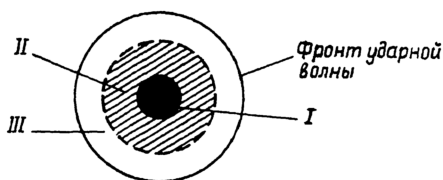
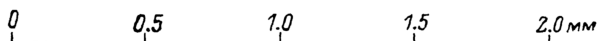


Рис. 2. Восстановленные микроинтерферограммы (а, б) и схематическое изображение области за фронтом сферической ударной волны (в). Задержка диагностирующего излучения: 20 нс (а), 60 нс (б).

на плоскость фотослоя голограммы (10). Вращение клина (8) в опорном плече между двумя экспозициями позволяет получать восстановленные интерферограммы в полосах конечной ширины.

Полученные экспериментальные данные указывают на то, что явление пробоя носит существенно дискретный характер. Область, находящаяся внутри каустики фокусирующей линзы и имеющая форму цилиндра, сильно вытянутого в аксиальном направлении, приблизительно равномерно заполнена микросферами субмиллиметрового размера. Размер области пробоя в этом направлении значительно превосходит размер фокального объема (диаметр фокального пятна ≈ 200 мкм) и достигает 5 мм. Объем внутри каждой сферической поверхности имеет сложную внутреннюю структуру, состоящую из трех областей (рис. 2, в). Центральная область I правильной сферической формы ($r \approx 10$ мкм) окружена диффузной областью II, внутри которой отсутствует система интерференционных полос. Полосы наблюдаются лишь во внешней области III, ограниченной сфе-

рической поверхностью с максимальными размерами 200 мкм ($\tau = 20$ нс) (рис. 2, а) и 400 мкм ($\tau = 60$ нс) (рис. 2, б). От выстрела к выстрелу микросферы распределяются в пространстве случайным образом, причем их количество приблизительно линейно зависит от энергии лазерного импульса в исследуемом диапазоне 0.1–1.0 Дж, а диаметры могут различаться на порядок.

Методика позволяет с одной голограммы восстанавливать как интерферограмму, так и тенеграмму области пробоя, анализ которых позволяет утверждать следующее. Поверхность микросфер субмиллиметрового диаметра представляет собой фронт сферической ударной волны (СУВ) в матрице полимера, инициирование которой происходит благодаря поглощению лазерного излучения на включении. Средняя скорость СУВ ко времени задержки $\tau = 20$ нс составляет $U_s = 2.87 \pm 0.08$ км/с и 2.73 ± 0.05 км/с к $\tau = 60$ нс. За фронтом СУВ осуществляется скачок плотности и соответствующее ему увеличение показателя преломления полимера: $\Delta n = (n_0 - 1) \Delta \rho / \rho_0$ [6], где n_0 – показатель преломления, а ρ_0 – плотность невозмущенного вещества. Для оргстекла (ПММК) $n_0 = 1.49$, $\rho_0 = 1.18$ г/см³. Расчет по интерферограммам изменения показателя преломления за фронтом СУВ позволяет определить ударное давление как $\rho_0 U_s^2 \Delta \rho / \rho = \rho_0 U_s^2 \Delta n / (n_0 - 1 + \Delta n)$. Это давление составляет 6–3.5 кбар и 2–0.8 кбар в моменты времени $\tau = 20$ и $\tau = 60$ нс соответственно (задержки отсчитываются от максимума лазерного импульса) для СУВ различного диаметра. Таким образом, зарегистрированная максимальная мощность СУВ ($\rho = 6$ кбар), которая вычисляется по формуле $W = \rho^{3/2} (\Delta \rho)^{1/2} / (\rho \rho_0)^{1/2}$, составляет ≈ 10 МВт/см². Ударная волна быстро затухает и приблизительно через $\tau = 40$ нс амплитуда давления за фронтом СУВ уменьшается в 3–4 раза.

Известно [7], что дополнительным механизмом, обеспечивающим увеличение области поглощения за пределы включения и доминирующим при лазерном пробое полимеров [2], является механизм электронной теплопроводности. Объем плазмы, сосредоточенной вокруг поглощающего включения, к концу лазерного импульса становится, по-видимому, оптически плотным, что приводит к поглощению и рефракции зондирующего излучения ($N_e \lesssim N_{e,кр} = 2.3 \cdot 10^{21}$ см⁻³) и объясняет отсутствие интерференционных полос в области II. Другой вероятной причиной исчезновения интерференционных полос может быть потеря временной когерентности за счет уширения линии лазерного излучения после прохождения им плазменной области II.

Центральная область I, непосредственно примыкающая к поглощающему включению, эффективно рассеивает воздействующее лазерное излучение на угол в 90° (см. также [5]). Красный светофильтр (9) КС-17 беспрепятственно пропускает рассеянное излучение с длиной волны $\lambda = 0.6943$ мкм, что приводит к чрезмерной засветке фотослоя в области I. Отметим, что это происходит на фоне полезной засветки фотоэмульсии до высоких плотностей почернения ≥ 2 с целью получения фазовых голограмм.

Таким образом, область пробоя оргстекла в ранние моменты времени представляет собой дискретную систему сферических ударных волн субмиллиметровых размеров. Фронт каждой из ударных волн отрывается от комплекса включение - волна поглощения ранее конца лазерного импульса, а амплитуда быстро падает со временем. Представляется перспективной возможность визуализации и исследования области пробоя с высоким временным и пространственным разрешением на длине волны, отличной от длины воздействующего лазерного импульса.

Авторы благодарны В.И. Фишеру за полезное обсуждение работы.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Маненков А.А., Прохоров А.М. // УФН. 1986. Т. 148. В. 1. С. 179-211.
- [2] Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслюков А.П. и др. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1985. Т. 49. № 6. С. 1084-1095.
- [3] Имас Я.А. Оптический пробой прозрачных диэлектриков. Препринт ИТМ АН БССР. 1982. № 13.
- [4] Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 336 с.
- [5] Ашмарин И.И., Быковский Ю.А., Гридин В.А. и др. // Квантовая электроника. 1971. № 6. С. 126-128; Ашмарин И.И., Быковский Ю.А., Гридин В.А. и др. // ФТТ. 1974. Т. 16. В. 1. С. 246-248.
- [6] Кормер С.Б. // УФН. 1968. Т. 94. В. 4. С. 641-687.
- [7] Анисимов С.И., Гальбурт В.А., Трибельский М.И. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 8. С. 1671-1679; Поуровская И.Е., Трибельский М.И., Фишер В.И. // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. В. 6. С. 1840-1852.

Поступило в Редакцию
21 декабря 1988 г.