

ДЕЙСТВИЕ СВЕТОВОГО ЛУЧА ЛАЗЕРА НА ОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО

А. И. Акимов, Л. И. Миркин, И. Ф. Пилипецкий

(Москва)

Проведен анализ оптических эффектов при фокусировании светового луча лазера внутрь прозрачного диэлектрика (органического стекла). Обнаружены два вида разрушения, связанные с возникновением микротрещин и плоских больших трещин. Переход от одного вида разрушения к другому наблюдается при изменении фокусного расстояния линз (плотности энергии в образце) и продолжительности импульса от  $10^{-3}$  до  $10^{-8}$  сек.

Ранее [1-3] было исследовано действие интенсивного светового излучения лазера на металлы и ионные кристаллы. Был обнаружен ряд эффектов изменения структуры и специфического разрушения материала. Представляло интерес исследовать действие лучей лазера на прозрачные диэлектрики (стекла и полимерные материалы). В настоящем сообщении приводятся результаты исследований действия лучей лазера на органическое стекло (плексиглас).

Подробное описание геометрии излучения и абсолютного распределения светового поля, сфокусированного реальными системами, приведено в работе [4].

Исследуем частную задачу: плоская волна  $S$  проходит через идеальную оптическую систему  $L$  (фиг. 1) в среду  $3$  с показателем преломления  $n$ . Рассмотрим геометрию околофокусной области. Обозначения на схеме:  $1$  — параллельный пучок,  $L$  — линза,  $2$  — область между линзой и веществом,  $3$  — область среды,  $R_0$  — фокусное расстояние линзы в воздухе (радиус сферической волны),  $d$  — часть  $R_0$ , приходящаяся на среду,  $\theta$  — угол между осью линзы и лучом в воздухе,  $\theta'$  — угол между осью линзы и лучом в среде. Из фиг. 1 следует, что

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = n \quad \text{при } n > 1, \quad \theta > \theta' \quad (1)$$

т. е. луч пересекает оптическую ось не в точке  $f$ , а в некоторой точке  $x$ . Для нахождения зависимости  $x = x(\theta)$  напишем еще два очевидных соотношения

$$\operatorname{tg} \theta' = y/x, \quad \operatorname{tg} \theta = y/d \quad (2)$$

или

$$x = d \operatorname{tg} \theta / \operatorname{tg} \theta' \quad (3)$$

где  $d$  — «глубина погружения» среды в фокусное расстояние линзы — считается величиной известной. Переходя в выражении (3) к функциям от одного аргумента  $\theta$  и считая  $\theta$  малым, получим

$$x = x_0 + B\theta^2 \quad (x_0 = dn, \quad B = d(n^2 - 1) / 2n) \quad (4)$$

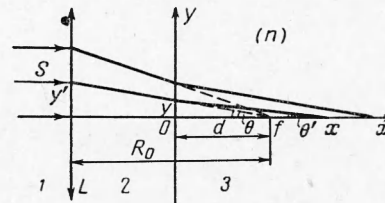
Отсюда вытекает следующее:

1) Фокусное расстояние для параксимальных лучей в среде увеличится на  $\Delta L = d(n - 1)$ , что всегда следует учитывать при фокусировке излучения в избранную точку среды.

2) С увеличением угла  $\theta$  координата  $x$  растет, а это означает, что фокусная точка вырождается в линию (осевую каустику). Это особенно существенно, если излучение квантового генератора с рабочим стержнем большого диаметра фокусируется широкоапертурной оптической системой.

Соотношение (4) необходимо учитывать при анализе геометрии разрушения прозрачных диэлектриков в прифокальной области. Поле осевой каустики (с линейной протяженностью при обычно применяемой аппаратуре от сотых долей мм до 1 мм, см. таблицу) может способствовать, кроме того, выполнению условий для начала самофокусировки [5].

Приведем прежде всего крайне немногочисленные литературные данные о действии светового излучения лазера на прозрачные материалы. Херчер [6] наблюдал действие сфокусированного лазерного излучения на некоторые прозрачные диэлектрики. Микрофотографии разрушений показали, что они в основном состоят из комбинаций больших трещин и нитей, причем последние содержали очень маленькие пузырьки. В работе [7] было указано, что пробой стекла состоит из области, где материал измельчен в порошок, и нескольких жилок, начинающихся в этой области и уходящих за фокус (длина главной жилки равна примерно 7 мм). Геометрическая оптика не может объяснить возникновение таких длинных нитей (осевая каустика, см. таблицу, в лучшем случае — до 1 мм). В [4] теоретически обосновывается возможность нитеобразной картины разрушений. В основу расчета взято явление самофокусировки света. Следует заметить, что идея самофокусировки света при использовании интенсивного лазерного излучения была высказана ранее Г. А. Аскарьяном [8].



Фиг. 1. Схема хода световых лучей в системе линза — оргстекло

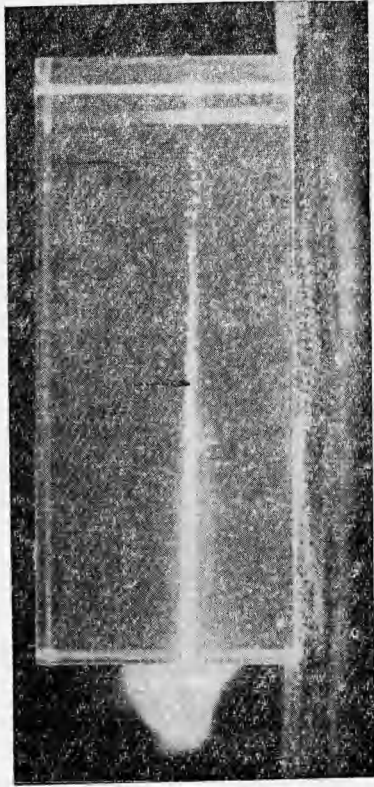
Реальная расходимость луча лазера (предполагая, что она реализуется через сферически расходящуюся волну с  $R \sim 2m$ ) приведет лишь к перемещению фокуса на  $1.025 R_0$  и не может объяснить его размазывания.

В настоящей статье авторы, с точки зрения указанных эффектов, исследовали результаты воздействия мощного лазерного излучения на плексиглас. Использован лазер с модуляцией добротности (длительность импульса порядка  $10^{-8}$  сек) и регулируемой выходной мощностью. Свечение сфокусированного излучения внутри прозрачного образца в момент светового импульса регистрировалось при помощи фотоаппарата. Полученная картина разрушения исследовалась затем микрофотографическим способом. Результаты измерений по некоторым образцам из плексигласа ( $n = 1.5$ ) сведены в таблицу, где 1)  $w$  — мощность излучения лазера, Мвт (мегаватт) ( $\pm 10\%$ ); 2)  $R_0$  — фокусное расстояние линзы в воздухе, мм; 3)  $d$  — часть  $R_0$ , приходящаяся на среду, мм; 4)  $x_0 = dn$  — действительная координата фокуса в среде, мм. Следующие столбцы таблицы описывают размытие фокуса за счет aberrаций системы, где 5)  $B = 1/2 d (n^2 - 1) / n$  мм; 6)  $\theta_m$  — угол между периферийным лучом и осью (рад); 7)  $B\theta_m^2 \cdot 10^{-2}$  мм; 8)  $x$  — координата пересечения периферийного луча с осью  $x$ , мм.

Таким образом, из таблицы следует, что за счет aberrаций системы можно ожидать размытия фокуса (перемещения фокуса вперед по ходу луча) на величину около 0.1 — 1 мм, поддающуюся измерению.

При анализе видов разрушения оргстекла при воздействии светового луча можно выделить два резко отличающихся друг от друга типа разрушения: 1) разрушение с образованием множества микротрещин и 2) разрушение с образованием значительных плоских трещин.

Оказалось, что в исследованном интервале мощности излучения и параметров оптической системы вид разрушения зависит только от фокусного расстояния линзы и не зависит, например, от мощности светового луча.



Фиг. 2. Разрушение по механизму образования микрогребней: а) фотография луча лазера в образце, увеличение 1.5 раза;  
б) зона разрушения в образце вдоль пути луча, увеличение в 3 раза

Разрушение по механизму образования микротрещин характерно при использовании линз с большим фокусным расстоянием. На фиг. 2,а приведена фотография светового луча лазера для типичного опыта этой серии. На снимке имеется ряд характерных особенностей. Прежде всего отметим, что фокус луча должен находиться в месте, отмеченном стрелкой.

$N$	$w$	$R_0$	$d$	$x_0$	$B$	$\theta$	$B \theta m^2$	$x_m$
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	20	80	20	30	8.35	0.075	4.7	30.05
2	80	80	20	30	8.35	0.075	4.7	30.05
3	80	55	20	30	8.35	0.107	9.6	30.10
4	80	55	15	22.5	6.26	0.107	7.4	22.57
5	30	18	13	19.5	5.42	0.333	60	20.10
6	90	18	15	22.5	6.26	0.333	70	23.20
7	90	18	15	22.5	6.26	0.333	70	23.20

В действительности, более узкая и менее расходящаяся часть светового луча проходит дальше. Следует обратить внимание также на характерное свечение воздуха при переходе луча из воздуха в оргстекло и вспышку при выходе луча из образца. На образование этого свечения, связанного с возникновением плазмы, тратится некоторая часть энергии луча, поэтому вычисление плотности мощности внутри образца провести не удастся. Однако изменение мощности излучения в небольших пределах не меняет вида плазменного облака, т. е., по-видимому, количество энергии, переходящее в плазму, существенно не меняется. На фиг. 2, б приведена снятая с небольшим увеличением фотография вида разрушения в таком образце. Из этой фотографии видно, что зона разрушений имеет коническую форму и состоит из отдельных точек, рассеивающих свет (фотографирование проводилось при подсветке узким лучом люминесцентного света с торцов образца). У мест входа лучей и в зоне, близкой к фокусу, обычно наблюдаются сгущения точек. Следует опять отметить, что распространение разрушения наблюдается значительно дальше фокуса, отмеченного стрелкой. Наконец, при фотографировании с торца видно, что конус разрушения имеет форму основания, близкую к кругу.

Плотности излучения при входе в среду в случаях 2, 3, 4 (см. таблицу) (разрушение по механизму образования микротрещин) составляли  $10^8 \text{ вт/см}^2$ .

При уменьшении фокусного расстояния картина разрушения постепенно меняется, и механизм разрушения начинает характеризоваться все меньшим количеством микротрещин и возрастающим количеством значительных трещин. Как и следовало ожидать, след луча при этом сконцентрирован в области фокуса. Кроме того, нужно отметить распространение узкой области интенсивного свечения за фокус. Микроисследование показывает, что зона разрушения в случаях 5, 6, 7 состоит из большого числа почти плоских трещин различных размеров, заканчивающихся общим острием, которое уходит вперед за фокус. Длина нитеобразного следа разрушения  $\sim 6 \text{ мм}$  при среднем размере трещины  $\sim 10 \text{ м.м.}$

Образование плоских трещин наблюдается также и при действии светового импульса лазера, работающего в режиме свободной генерации (длительность импульса  $10^{-3} \text{ сек}$ ). Однако при гигантском

импульсе ( $10^{-8}$  сек) трещины имеют общую линию пересечения, совпадающую с направлением лазерного луча; сами же трещины образуют при этом звездообразную фигуру (вид по лучу). При обычном импульсе ( $10^{-3}$  сек) трещины наклонены к оси на угол, близкий к  $45^\circ$  (см., например, [9]). Фотографии процесса образования плоских трещин показали, что при длительности импульса  $10^{-3}$  сек практически все разрушение происходит за время действия импульса. Этот вывод основан на том, что фотографии разрушения, сделанные во время и после действия импульса, почти не отличаются друг от друга. Кроме того, часто наблюдаются вторичные разрушения, т. е. системы трещин, расположенных вдоль оси, составляющей угол около  $90^\circ$  к первичному лучу. В таких случаях всегда видно, что вторичное разрушение связано с отражением света от ранее образовавшейся трещины. Для гигантского импульса ( $10^{-8}$  сек) фотографии разрушения по механизму образования значительных трещин, сделанные во время и после действия импульса, не совпадают. Во время импульса разрушение имеет коническую форму, и плоские трещины растут уже после окончания импульса.

Отметим, наконец, что исследование разных типов прозрачных полимеров показало, что в каждом из них существуют специфические особенности разрушения. Например, в полистироле при обычном импульсе ( $10^{-3}$  сек) образуются плоские трещины, составляющие с лучом угол, меньший, чем в органическом стекле. При гигантском импульсе в этом материале даже при короткофокусных линзах образуется коническое разрушение без плоских трещин, также распространяющееся значительно дальше фокуса. Измерения области разрушения показывают, что интервал разрушения во всех случаях больше, чем сдвиг фокуса, обусловленный аберрацией линз, и, по-видимому, связано с эффектом самофокусировки света в твердом теле.

Авторы благодарят Г. И. Баренблатта и Б. Я. Зельдовича за ценные советы при постановке работы и обсуждении результатов, а также В. В. Кирееву, Г. Ф. Кузьмина, О. Е. Марина за помощь при проведении экспериментов.

Ин-т проблем механики АН СССР  
НИИ механики МГУ

Поступила 7 I 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аверьянова Т. М., Миркин Л. И., Пилипецкий Н. Ф., Рустамов А. Р. Действие интенсивных световых пучков на поверхность металла. ПМТФ, 1965, № 6.
2. Аверьянова Т. М., Миркин Л. И., Пилипецкий Н. Ф. Действие светового луча на дислокационную структуру кристаллов. ПМТФ, 1966, № 1.
3. Миркин Л. И., Пилипецкий Н. Ф. Упрочнение сталей при воздействии светового луча лазера. Металловедение и термическая обработка металлов, 1966, № 3.
4. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф. Поле лазерного излучения, сфокусированное реальными системами. Изв. высш. учебн. завед., Радиофизика, 1966, № 1.
5. Chiao R. Y., Garmire E., Townes C. H. Self-trapping of optical beams. Phys. Rev. Lett., 1964, vol. 13, № 15.
6. Hercher M. Laser-induced damage in transparent media. J. Opt. Soc. Amer., 1964, vol. 54, № 4.
7. Harper D. H. Laser damage in glasses, British. J. Appl. Phys., 1965, vol. 16, № 5.
8. Аскарьян Г. А. Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы. Ж. эксперим. и теор. физ., 1962, т. 42, вып. 6.
9. Миркин Л. И., Пилипецкий Н. Ф. Основные виды разрушения органического стекла при воздействии импульсных световых лучей лазера. Механика полимеров, 1966, № 4. }