

УДК 539.211.2:621.378.9

ФИЗИКА

Н. Е. КАСК, Л. С. КОРНИЕНКО, Г. М. ФЕДОРОВ

О ТЕПЛОМ МЕХАНИЗМЕ РАЗРУШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

(Представлено академиком А. М. Прохоровым 10 XI 1972)

Общепринятой гипотезой о механизме разрушения твердых прозрачных диэлектриков под воздействием лазерного излучения миллисекундной длительности является тепловая гипотеза, согласно которой причиной разрушения являются температурные напряжения, возникающие при тепловом расширении однородного объема диэлектрика ⁽¹⁾ или поглощающего дефекта ⁽²⁻⁴⁾. По данным работы ⁽¹⁾, в случае режима свободной генерации причиной разрушения оптического стекла являются термоупругие напряжения, возникающие внутри каустики фокусирующей линзы. В ⁽¹⁾ для оценки разрушающего термоупругого напряжения получено значение ~ 700 кг/см², что значительно ниже теоретической прочности стекла $2,5 \cdot 10^5$ кг/см² ⁽⁵⁾ и экспериментального значения для прочности стекла с неповрежденной поверхностью $3,5 \cdot 10^4$ кг/см² ⁽⁶⁾. Именно с этими значениями необходимо сравнивать напряжения, возникающие при разрушении объема.

В настоящей работе исследования проведены с помощью импульсного ОКГ на неодимовом стекле. Энергия в импульсе достигала 2 кдж, а длительность импульса менялась в диапазоне 1–10 мсек. ОКГ работал как в режиме хаотических пульсаций, так и в режиме квазинепрерывного импульса с глубиной модуляции менее 5%. Излучение ОКГ фокусировалось в объем или на поверхность образца из оптического стекла с помощью линзы ($F = 80$ мм). Под пороговой плотностью энергии понималась плотность энергии, прошедшей до возникновения световой вспышки в области фокуса линзы, сопровождающей разрушение образца.

На рис. 1 приведены зависимости пороговой плотности энергии разрушения стекла К-8 в объеме в зависимости от длительности воздействия лазерного излучения. Как следует из рис. 1, для исследуемого диапазона длительностей в беспичковом режиме генерации (кривая 1) порог разрушения определяется энергией излучения, а в режиме хаотических пульсаций (кривая 2) на начальном участке кривой разрушение наступает при достижении определенного уровня мощности. Для достаточно большого времени воздействия пороговые плотности энергии совпадают для двух упомянутых выше режимов генерации. Аналогичный характер имеют зависимости для пороговой плотности энергии при фокусировании излучения на поверхность образца. В случае режима беспичковой генерации пороговая плотность энергии разрушения поверхности образца равна $1 \cdot 10^6$ дж/см².

Естественно предположение, что различие в зависимостях, приведенных на рис. 1, связано с тонкой структурой распределения излучения в фокальной области. В квазиконцентрическом резонаторе, соответствующем беспичковому режиму генерации, одновременно возбуждалось до 10^5 поперечных мод. В этом случае излучение в каждый момент времени равномерно распределено по всей фокальной области ⁽⁷⁾. В плоскопараллельном резонаторе, когда генерация происходит в виде нерегулярных шпиков, в каждом из них возбуждается одна поперечная мода ⁽⁸⁾, диаметр пере-

тяжки каустики которой значительно меньше интегрального фокального пятна, измеряемого экспериментально *. Проведенные оценки показывают, что плотность энергии отдельного пика в ~ 5 раз меньше пороговой плотности энергии, имеющей место для режима беспичковой генерации. Возможной причиной роста плотности энергии отдельного пика до порогового значения является самофокусировка излучения, о наличии которой

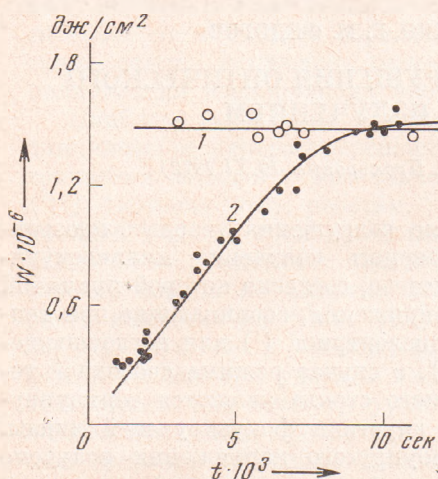


Рис. 1. Зависимость пороговой плотности энергии от длительности воздействия лазерного излучения. 1 — гладкая генерация, 2 — пичковая генерация

свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1, в частности, зависимость пороговой плотности энергии от фокусного расстояния линзы.

Для исследуемого диапазона длительностей в оптическом стекле К-8 при плотности энергии, примерно в два раза меньшей пороговой, обнаружены проплавы в фокальной области. С изменением фокусного расстояния линзы поперечный размер проплава практически остается неизменным (см. табл. 1). Если излучение фокусируется на поверхность, то для короткофокусных линз наблюдается ее вспучивание. В случае длиннофокусных линз образование проплава рядом с передней поверхностью не происходит.

Поскольку перед разрушением стекла в фокусе линзы наблюдается появление проплава, для которого резко меняются коэффициенты теплового расширения и теплоемкость, то при оценке напряжений, возникающих при прогреве фокальной области линзы, необходимо рассматривать два этапа. На первом этапе, до образования проплава, оцениваются термоупругие напряжения и температура в твердом стекле, исходя из выражения для плотности энергии термонапряженной изотропной среды (см., например, (1)). Так как в центре каустики еще до разрушения происходит размягчение стекла, то

Таблица 1

Фокусное расстояние линзы, мм	Режим хаотических пульсаций, длительность воздействия 5 мсек				
	диаметр фокального пятна (эксперимент), мм	длина фокальной области, мм	диаметр проплава, мм	длина проплава, мм	пороговая плотность энергии разрушения $W \cdot 10^{-6}$, Дж/см ²
80	0,17	1,3	0,23	3	$1,1 \pm 0,07$
175	0,22	3,9	0,23	12	$1,1 \pm 0,2$
415	0,60	25	0,23	45—70	$0,35 \pm 0,06$

мы предполагаем, что зарождение трещины происходит на границе между жидким и неразмягченным стеклом в результате действия гидростатического давления. На втором этапе рассматриваются явления, связанные с прогревом жидкого стекла. Выражение для плотности энергии можно записать в виде

$$kW = c_p \rho T_{cp} + P \Delta V / V, \quad (1)$$

* Тонкая структура в мгновенном распределении излучения по фокальному пятну в случае режима хаотических пульсаций, очевидно, может объяснить явно заниженное значение для разрушающего напряжения, полученного в работе (1).

где левая часть — энергия, поглощенная в 1 см^3 ; W — падающая плотность энергии (в дж/см^2), k — линейный коэффициент поглощения, $k = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$; первый член в правой части (1) — плотность тепловой энергии: $T_{\text{ср}}$ — усредненное по проплаву приращение температуры, c_l и ρ_l — соответственно теплоемкость и плотность стекла в жидком состоянии. P — гидростатическое давление, а объемная деформация $\Delta V/V = 3\alpha_l T_{\text{ср}}$, где α_l — коэффициент линейного расширения для жидкого стекла.

Когда проплав выходит на поверхность, то $P \cong 1 \text{ кг/см}^2$. В этом случае получим, что при пороговой плотности энергии разрушения поверхности последняя нагревается до температуры $\sim 2000^\circ$, что согласуется с критической температурой до разрыва связи SiO—O . Отметим, что в нашей интерпретации коэффициент поглощения поверхностного слоя является линейным и не отличается по своей величине от объемного коэффициента поглощения (ср. (4)).

При разрушении объема испарению препятствует высокое давление. Величину этого давления можно оценить, используя выражение для коэффициента сжимаемости, который для жидкого стекла можно определить из условия непрерывности температуры при переходе от твердого стекла к жидкому на оси каустики. Используя экспериментальное значение пороговой плотности энергии для разрушения стекла в объеме, мы получили, что величина гидростатического давления, приводящего к разрушению, равна $6 \cdot 10^4 \text{ кг/см}^2$ и хорошо согласуется с пределом прочности бездефектного стекла (6).

Авторы выражают глубокую благодарность акад. А. М. Прохорову за интерес к работе и плодотворные обсуждения.

Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
13 X 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. Г. Басов, О. Н. Крохин и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 6, 44 (1971).
- ² Ю. К. Данилейко, А. А. Маненков и др., ЖЭТФ, 58, № 1, 31 (1970).
- ³ R. W. Horner, D. R. Uhlmann, J. Appl. Phys., 41, № 10, 4023 (1970).
- ⁴ И. В. Алешин, А. М. Бонч-Бруевич и др., ЖТФ, 41, № 4, 820 (1971).
- ⁵ I. Nagay-Szabo, J. Ladik, Nature, 188, № 4746, 226 (1960).
- ⁶ Механические свойства новых материалов, М., 1966.
- ⁷ С. А. Ахманов, Ю. Д. Голяев, В. Г. Дмитриев, ЖЭТФ, 62, № 1, 133 (1972).
- ⁸ А. М. Леонтович, В. Л. Чуркин, ЖЭТФ, 59, № 1, 7 (1970).