

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

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОВАЯ САМОФОКУСИРОВКА В СТЕКЛЕ ЖС-12

В настоящей работе исследуется тепловая самофокусировка лазерного излучения миллисекундной длительности в стекле ЖС-12 с энергией ниже пороговой энергии разрушения.

Характер действия лазерного излучения на стекло зависит от плотности энергии падающего на образец пучка света. При плотностях энергии выше некоторой пороговой происходит разрушение стекла. В различных диапазонах длительности импульса разрушение вызывается разными механизмами; так, в миллисекундном диапазоне общепринятым является тепловой механизм разрушения. Однако изменения свойств стекла в области действия лазерного излучения в этом диапазоне длительностей начинают наблюдаться при энергиях гораздо ниже пороговой [1]. Эти изменения не сопровождаются разрушением стекла, но могут быть обнаружены при оптическом исследовании образцов, подвергшихся облучению лазерным пучком.

Исследования проведены с помощью импульсного неодимового ОКГ на стекле ($\lambda_0 = 1,06$ мкм) с энергией импульса в несколько сотен джоулей и длительностью $\tau_n = 10$ мсек. ОКГ работал в режиме квазинепрерывного импульса. Излучение фокусировалось в объем или на поверхность образца с помощью линз с $F = 8, 18,5$ и $41,5$ см.

Уже при энергиях, в несколько раз меньших пороговой энергии разрушения, в образце наблюдались области пластических деформаций. В темном поле микроскопа эти области имеют вид полос, симметричных относительно оси лазерного пучка. Длина и диаметр их растут с увеличением энергии, падающей на образец, и ростом фокусного расстояния используемой линзы.

На определенном этапе увеличения энергии, при значениях ее, примерно в 2 раза меньших пороговой энергии разрушения, на оси пучка образуется проплавление — прозрачное образование, по форме напоминающее веретено [1].

Пропаивания наблюдались при любых положениях фокуса линзы в образце. Размеры проплавлений увеличиваются с ростом энергии импульса и с переходом к линзам с большими фокусными расстояниями. Так, для линзы с $F = 8$ см длина проплавления менялась от 3,5 до 8 мм при увеличении энергии от 30 до 70 Дж, а для линзы с $F = 41,5$ см — от 8 до 26 мм при увеличении энергии от 70 до 100 Дж. Минимальный и максимальный диаметры проплавлений практически не менялись при переходе от одной линзы к другой и составляли соответственно 0,1 и 0,5 мм.

Зависимость объема проплавления от энергии оказалась линейной, причем четко наблюдался пороговый характер образования проплавления. Порог растет с увеличением фокусного расстояния линзы и при переходе от линзы с $F = 8$ см к линзе с $F = 41,5$ см увеличивается примерно в два раза.

При фокусировании излучения на поверхности образца линзой $F = 8$ см проплавление выходило на поверхность, и в этом случае поверхность вспучивалась, а при использовании двух других линз проплавления появлялись только внутри образца и не выходили на переднюю поверхность ни при каких значениях энергии вплоть до порога разрушения.

На рисунке представлена экспериментальная зависимость положения проплавления в образце стекла ЖС-12 (L) от расстояния между фокальной плоскостью линзы $F = 18,5$ см и передней гранью образца (l). Прямая $L = nl$ показывает положение геометрического фокуса линзы, а вертикальные отрезки прямых — положения проплавления при данных положениях геометрического фокуса. Точка 0 на оси x соответствует положению фокуса линзы на передней поверхности образца. Возле каждого проплавления указано значение энергии импульса, при котором этот проплавление получено.

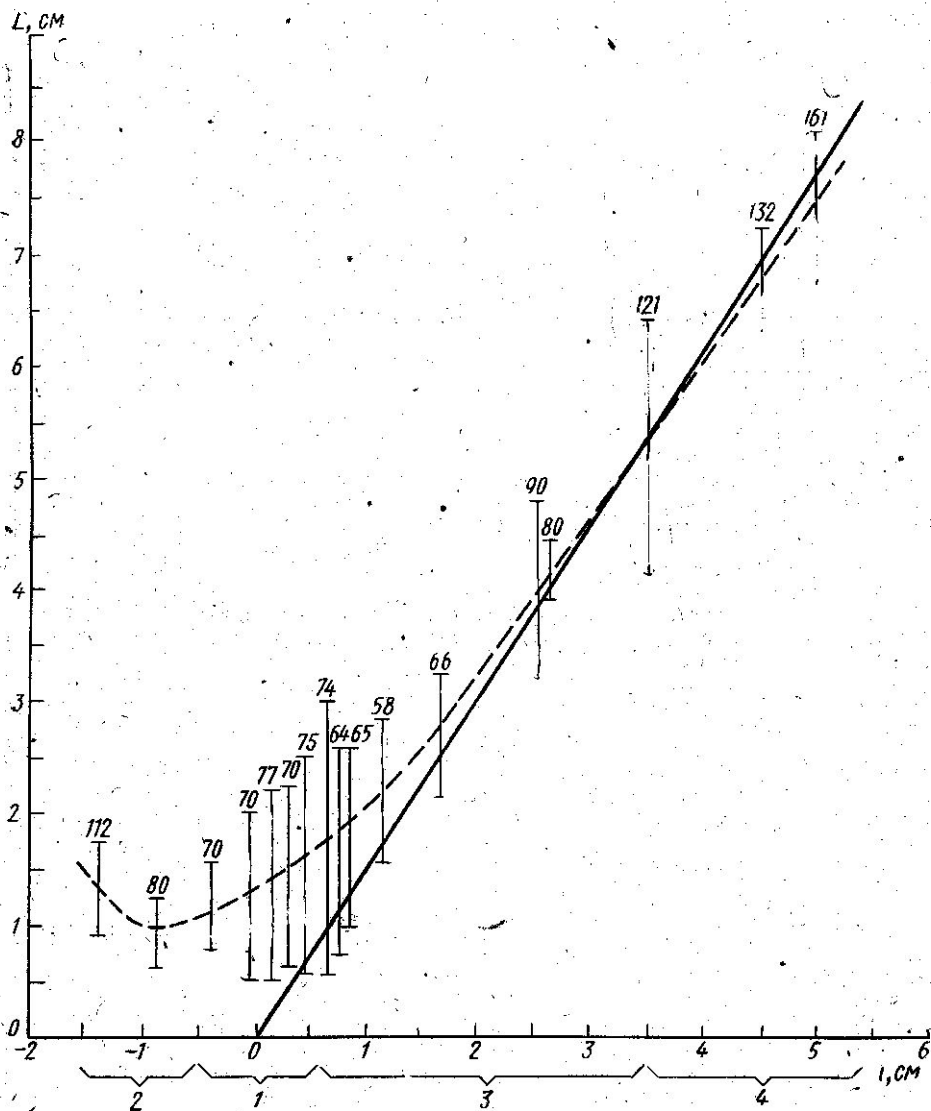
Рассмотрим различные участки зависимости, изображенной на рисунке, отвечающие различным положениям фокуса линзы.

На участке 1 передняя поверхность образца лежит в фокальной области линзы, поэтому падающий на стекло пучок можно считать параллельным. Если оценить температуру на оси лазерного пучка, используя результаты [2], и учесть, что часть поглощенной энергии тратится на создание термоупругих напряжений, то оказывается, что в фокальной области линзы $F = 8$ см достигается температура, достаточная для плавления стекла. Для двух других линз даже в фокусе температура оказывается недостаточной для образования проплавления. Пропаивание в этом случае может образоваться после сжатия пучка в среде вследствие самофокусировки, и положение его опреде-

ляется длиной самофокусировки. В миллисекундном диапазоне длительностей импульса решающую роль играет тепловой механизм самофокусировки. В данном случае мы имеем дело с нестационарной тепловой самофокусировкой, так как для используемых линз выполняется условие

$$\tau_{\text{н}} \ll \frac{a_0^2}{4\kappa}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{н}}$ — длительность импульса, κ — коэффициент температуропроводности стекла, a_0 — радиус пучка на входе в среду.



Нестационарная тепловая самофокусировка рассмотрена наиболее полно в работах [3, 4]. Согласно этим работам на определенном этапе сжатия параллельного пучка образуется фокальная точка, которая затем трансформируется в область, расширяющуюся в обе стороны вдоль пучка. Положение ближнего к входной поверхности конца проплава определяется положением ближней фокальной точки в момент окончания импульса.

$$Z_{\Phi} = 1,22R_d \sqrt{\frac{W_{кр}}{P_0 \tau_p}}, \quad (2)$$

здесь Z_{Φ} — положение ближней фокальной точки в момент окончания импульса, R_d — дифракционная длина пучка, R_0 — мощность пучка, $W_{кр} = P_{кр} \tau_p$, $P_{кр}$ — критическая мощность для случая стационарной тепловой самофокусировки, $\tau_p = \frac{a_0^2}{4\kappa}$ — время релаксации нелинейности.

Выражение для $P_{кр}$ в случае стационарной тепловой самофокусировки приводится в работе [5]:

$$P_{кр} = \frac{\lambda_0 K}{dn} \left(1 + \frac{2}{\pi} \frac{1}{\alpha R_d} \right), \quad (3)$$

K — коэффициент теплопроводности среды, α — ее коэффициент поглощения. Подставив в (2) экспериментальные значения Z_{Φ} для различных линз, стекла ЖС-12, получим

$$\frac{dn}{dT} = (2,7 \div 3,2) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}.$$

На участке 2 фокус линзы находится вне образца, т. е. пучок приходит к поверхности расходящимся и имеет диаметр $d > d_0$. Длина самофокусировки при этом увеличивается, и проплав отодвигается от поверхности.

На участке 4 фокус линзы расположен глубоко в образце, и мы имеем дело с самофокусировкой сходящегося пучка. Радиус сходимости его соответствует фокусному расстоянию линзы в стекле $F' = nF$.

Расчет, проведенный нами на основе развитой в работе [4] теории, показал, что сходящийся пучок схлопывается практически в геометрическом фокусе, а затем в процессе действия импульса нелинейной фокус перемещается к входной поверхности, формируя проплав перед геометрическим фокусом.

Оценки величины максимального сжатия пучка вследствие самофокусировки [6] показывают, что в области нелинейного фокуса существенную роль начинает играть стационарная тепловая самофокусировка, так как $\tau_p \rightarrow 0$.

На участке 3 картина в общих чертах та же, только радиус сходимости пучка здесь не постоянен, а уменьшается от ∞ до R' по мере удаления фокуса линзы от входной поверхности образца.

В заключение отметим, что в работе [7], где было проведено исследование смещения очага разрушения в нелинейной среде под действием самофокусировки, получены результаты, качественно отличающиеся от зависимости, приведенной на рисунке. Очевидно, положение очага разрушения определяется не только нелинейными свойствами среды, но и изменением ее прочности по мере удаления от поверхности. Исследования допорогового воздействия излучения, приведенные в настоящей работе, позволяют более корректно рассмотреть вопрос о влиянии поверхности на положение фокуса в нелинейной среде.

Авторы благодарны С. А. Габову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каск Н. Е., Корниенко Л. С., Федоров Г. М. ЖТФ, 63, 2388, 1973.
2. Brugger K. «J. Appl. Phys.», 43, 577, 1972.
3. Khachatryan A. M., Sukhorukov A. P. «Opto-electronics», 3, 49, 1971.
4. Алешкевич В. А., Ахманов С. А., Сухоруков А. П., Хачатрян А. М. «Письма в ЖЭТФ», 13, 55, 1971.
5. Ахманов С. А., Горохов Ю. А., Криндач Д. П., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В. ЖЭТФ, 57, 16, 1969.
6. Сухоруков А. П. «Успехи физических наук», 101, 81, 1970.
7. Бойко Ю. И., Емец А. К. ДАН СССР, 206, 319, 1972.