

05;07;12

## Разрушение оптически прозрачных кристаллов с макроскопической трещиной под действием импульсов лазера

© В.А. Федоров, И.В. Ушаков, В.П. Шелохвостов

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
392622 Тамбов, Россия

(Поступило в Редакцию 19 февраля 1997 г. В окончательной редакции 30 сентября 1997 г.)

Исследовано влияние макроскопической трещины на механическую прочность монокристаллов NaCl, LiF, CaCO<sub>3</sub>, подвергаемых импульсному лазерному облучению. Оценена вероятность активации роста исходной макротрещины при оптическом пробое образца. Предложен механизм роста исходной макроскопической трещины, в основе которого лежит объединение полостей, микро- и макротрещин, возникающих при нагреве и выгорании поглощающих включений, с исходной трещиной.

Присутствие трещин в прозрачном диэлектрике приводит к уменьшению его оптической прочности по целому ряду факторов: вследствие многократного отражении света от стенок трещины напряженность электрического поля в некоторых точках материала будет существенно превышать напряженность электрического поля падающей волны, что приведет к увеличению вероятности многофотонной ионизации, электронной лавины и др. [1]; поверхность образцов, обработанных методом шлифовки и полировки, состоит из рельефно-поликристаллического, трещиноватого и упруго-деформированного слоев. В поверхностном слое неизбежно присутствуют частицы суспензии. Трещиноватый слой содержит микротрещины, лежащие в различных плоскостях [1]; в результате участия поверхностей трещин в химических реакциях с окружающей средой увеличивается светопоглощение в трещиноватом слое [2]; эмиссия электронов растущими трещинами приводит к снижению порога оптического пробоя у поверхности облучаемого кристалла [3]; рост трещин, вызванный термическими напряжениями, возникающими на поглощающих включениях (ПВ), в итоге может приводить к разрушению кристаллов [4].

В то же время в большинстве прозрачных материалов порог оптического пробоя определяют ПВ. Определения их размеров и результатов воздействия на них лазерного излучения проведены в [1,5,6].

Следствием оптического пробоя является механическое разрушение материала. Остается неясным вклад исходных трещин в процесс разрушения на этом этапе.

Цель работы — исследование разрушения оптически прозрачных кристаллов с исходной макроскопической трещиной под действием импульсного лазерного излучения.

### Методика эксперимента

Исследования проводили на монокристаллах: NaCl, которые в зависимости от количества примесей были разделены на три группы: 1а — Cr<sup>3+</sup>10<sup>-2</sup> wt%, 1b — Cr<sup>3+</sup>10<sup>-3</sup> wt%, 1с — количество примесей по Ca<sup>++</sup>,

Mg<sup>++</sup>, Ba<sup>++</sup> не превышало 10<sup>-3</sup> wt%; LiF, количество примесей в которых по Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ba<sup>++</sup> не превышало 10<sup>-3</sup> wt%; CaCO<sub>3</sub> количество примесей ≈ 10<sup>-2</sup> wt%.

Раскалыванием кристалла размером 15 × 30 × 16 мм получали два идентичных образца (каждый размером 5 × 30 × 8 мм). В один из них вводили макроскопическую трещину длиной 4–6 мм по плоскости {100}. Плоскость (100) образцов ориентировали перпендикулярно направлению распространения излучения. Образцы облучали попарно: один без трещины и один с трещиной.

Использовали лазер ГОС-1001 с λ = 1060 нм. Энергию импульсов варьировали от 40 до 400 Дж, а площадь облучаемой поверхности от 12 до 100 мм<sup>2</sup> (длительность импульса меняется от ≈ 0.6 мс при энергии накачки 40 Дж до ≈ 1.5 мс при энергии накачки 400 Дж). Кристаллы облучали импульсами, начиная с E = 0.7E<sub>th</sub> (E<sub>th</sub> — пороговая энергия импульса), и увеличивали энергию каждого следующего импульса на 10% до разрушения образца.

Размер ПВ в кристаллах группы 1а не превышал 10 мкм. Вид одного из крупных ПВ в кристалле CaCO<sub>3</sub> приведен на (рис. 1).



**Рис. 1.** Два ПВ, состоящие из нитевидных прожилок, расположенные в объеме CaCO<sub>3</sub>. Их толщина в различных точках 0.02–0.04 мм. Помимо показанных на рисунке ПВ кристалл содержит включения с размерами от 5 до 25 мкм.

## Экспериментальные результаты

1) В ходе экспериментов обнаружен рост исходных макротрещин под действием импульсного лазерного облучения. В табл. 1 приведены экспериментальные данные о вероятности лазерно-индуцированного роста исходной макротрещины при облучении образцов. В табл. 2 дана статистика разрушения кристаллов с макротрещиной и кристаллов без нее при воздействии серии лазерных импульсов. Для оценки деградации образцов при их облучении серией лазерных импульсов в таблице используется коэффициент  $C = n_T/n_\sigma$ .

2) Как правило, разрушение образцов является следствием образования на ПВ лазерно-индуцированных трещин, объединяющихся с исходной.

Лазерно-индуцированная трещина может зародиться в плоскости, параллельной плоскости исходной трещины, и объединиться с ней благодаря переходам по плоскостям  $\{110\}$  и  $\{100\}$  (рис. 2, *a*). Объединение достаточно развитой лазерно-индуцированной трещины (лежащей в плоскости  $(001)$ ) с исходной зачастую приводило к отколу части кристалла (рис. 3, *a*).

**Таблица 1.** Статистика роста исходной макротрещины при лазерно-индуцированном разрушении образцов

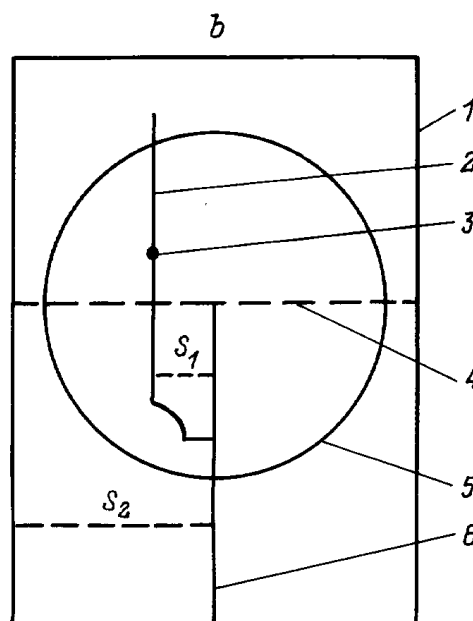
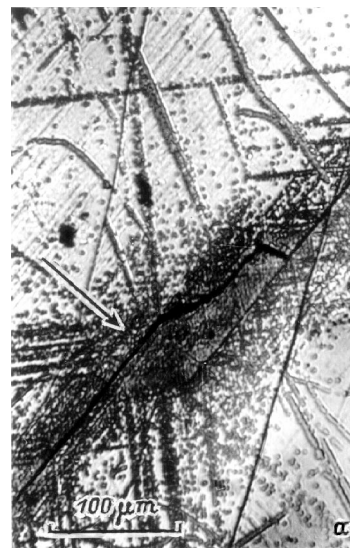
№ группы кристаллов	При разрушении кристалла исходная трещина проросла, став магистральной	При разрушении кристалла исходная трещина подросла на 2–3 мм	Кристалл разрушился без роста исходной трещины	$P$
NaCl (1a)	78.6%	7.14%	14.28%	0.88
NaCl (1b)	80%	Не фиксировали	20%	0.8
NaCl (1c)	37.5%	37.5%	25%	0.7
CaCO <sub>3</sub>	60%	Не фиксировали	40%	0.6

**Примечание.**  $P$  — вероятность активации роста исходной трещины при оптическом пробое, вызвавшем разрушение образца (в том числе в случае, если разрушение образца обусловлено только ростом исходной трещины).

**Таблица 2.** Статистика лазерно-индуцированного разрушения образцов с исходной трещиной и без трещины

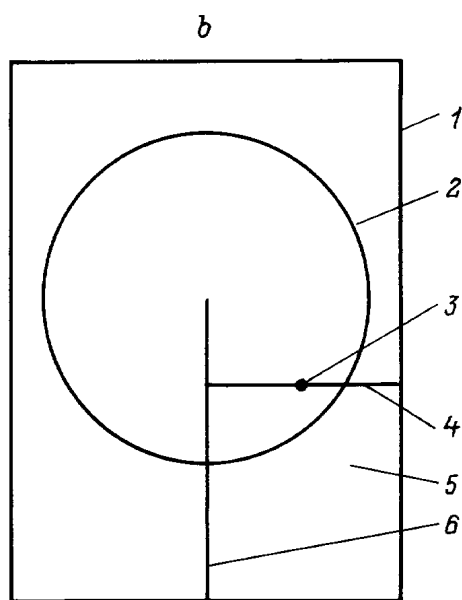
№ группы кристаллов	1	2	3	$C$
NaCl (1a)	25	25	50	1.03
NaCl (1b)	15	65	20	0.75
NaCl (1c)	30	40	30	0.9
CaCO <sub>3</sub>	50	17	33	0.96

**Примечание.** 1 — количество образцов с трещиной и без трещины, разрушившихся при равном числе облучений (%); 2 — количество образцов с трещиной, разрушившихся при меньшем числе облучений, чем соответствующие образцы без трещины (%) (см. методику эксперимента); 3 — количество образцов без трещины, разрушившихся при меньшем числе облучений, чем образцы с трещиной (%);  $C = n_T/n_\sigma$  — где  $n_T$  — количество облучений кристаллов с исходной трещиной до их разрушения,  $n_\sigma$  — количество облучений кристаллов без исходной трещины до их разрушения.



**Рис. 2.** *a* — объединение лазерно-индуцированной трещины с исходной (последняя показана стрелкой); поверхность кристалла LiF (010); лазерно-индуцированная трещина образовалась вследствие нагрева ПВ, расположенного перед вершиной исходной трещины; исходная и лазерно-индуцированная трещины расположены в плоскости  $(100)$ ; *b* — схема роста исходной трещины за счет объединения с лазерно-индуцированной: 1 — кристалл, 2 — лазерно-индуцированная трещина, 3 — ПВ, 4 — сечение  $S$ , 5 — зона облучения, 6 — исходная макротрещина.

Возникновение значительного разрушения (образование больших лазерно-индуцированных трещин, а в эпицентре оптического пробоя крошева из осколков материала) практически всегда затрагивает исходную трещину. В то же время наблюдали случаи, когда в отсутствие крупных очагов разрушения исходная трещина прорастала, становясь магистральной.



**Рис. 3.** *a* — объединение лазерно-индуцированной трещины с исходной (последняя показана стрелкой); поверхность кристалла LiF (010); ПВ, на котором образовалась лазерно-индуцированная трещина, расположено до вершины исходной трещины; плоскость залегания трещин (100); *b* — схема объединения лазерно-индуцированной трещины с исходной: 1 — кристалл, 2 — зона облучения, 3 — ПВ, 4 — лазерно-индуцированная трещина, 5 — отколовшаяся часть кристалла, 6 — исходная макротрещина.

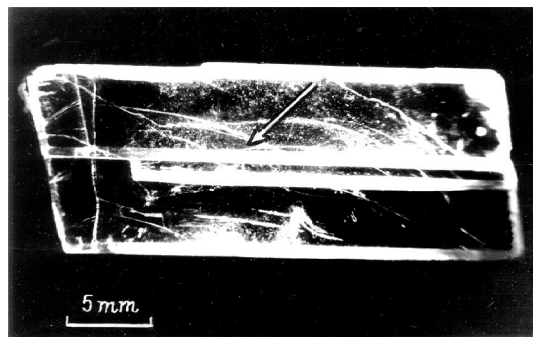
Если трещина в процессе своего роста меняла плоскость распространения с {100} на {110}, то это всегда приводило к появлению скопления дислокаций вблизи ее вершины. Но такие участки роста трещины незначительны по длине. Магистральные трещины возникали в плоскостях {100}. Трещины, расположенные в плоскостях {110}, достаточно развиты только непосредственно вблизи области оптического пробоя.

## Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты позволяют предположить, что существует интервал напряжений, возникающих на ПВ,  $\sigma_n \leq \sigma \leq \sigma_v$  ( $\sigma_n$  — предел упругости;  $\sigma_v$  — напряжение, достаточное для разрушения кристалла), при которых разрушение образца обусловлено активацией роста исходной трещины. Из нелинейного характера нарастания термических напряжений на ПВ, при превышении интенсивностью света некоторого критического значения [7] следует, что возникающие напряжения могут быть как ниже  $\sigma_n$ , так и выше  $\sigma_v$ . При этом 1) значительные разрушения образца, как правило, сопровождаются ростом исходной трещины; 2) вероятность активации роста исходной трещины при лазерно-индуцированном разрушении образца достигает 80% (табл. 1), при  $\sigma \gg \sigma_v$  разрушение происходит за счет появления на ПВ лазерно-индуцированных трещин, в этом случае велика вероятность их взаимодействия и объединения с исходной; 3) отсутствует четкая тенденция уменьшения прочности облучаемого кристалла исходной трещиной (табл. 2, коэффициент С).

Для кристаллов NaCl (табл. 2) установлена определенная тенденция: по мере уменьшения содержания примесей в образце увеличивается роль макротрещины в деградации материала при импульсном облучении.

Вероятность активации роста исходной трещины зависит от величины термических напряжений, возникающих на ПВ, и от места расположения ПВ относительно трещины. Если нагрев ПВ, находящегося перед вершиной исходной трещины, вызовет появление лазерно-индуцированной, лежащей в плоскости исходной, то в вершине исходной трещины они объединятся. В общем случае (рис. 2, *a, b*) плоскость лазерно-индуцированной трещины будет находиться на некотором расстоянии  $S_1$  от плоскости исходной. При достижении лазерно-индуцированной трещиной сечения  $S$  (рис. 2, *b*) возникает вероятность того, что растущая трещина изменит плоскость распространения на (110) или (010) и соединится с исходной. Согласно Гилману [8], вероятность



**Рис. 4.** Разрушение кристалла CaCO<sub>3</sub> вследствие оптического пробоя на двух крупных ПВ. Одно из ПВ находилось вблизи поверхности исходной трещины. Положение вершины исходной трещины (до облучения) показано стрелкой.

такого объединения особенно велика, если расстояние  $S_1 < 0.3S_2$  [8].

При оптическом пробое на ПВ, расположенном вблизи поверхности исходной трещины, последняя подрастает за счет давления образующегося газа (плазмы), действующего на поверхность трещины (рис. 4).

Хотя при  $S_1 < 0.3S_2$  вероятность объединения трещин высокая, это условие не является достаточным. Вероятность объединения трещин будет увеличиваться по мере уменьшения  $S_1$  и увеличения длины лазерно-индуцированной трещины.

Рост трещины в твердом теле определяется уравнением:  $\sigma \geq \sigma_{cr} = (\alpha\gamma E/L_{max})^{1/2}$  [9], где  $\alpha$  — коэффициент;  $\gamma$  — эффективная поверхностная энергия;  $E$  — модель Юнга;  $\sigma_{cr}$  — минимальное напряжение, необходимое для роста трещины, обратно пропорциональное длине  $L_{max}$  трещины. Рост лазерно-индуцированной трещины сопровождается падением механических напряжений за счет (в основном) остывания газа или плазмы, образовавшейся при нагреве ПВ, и пластической деформации сопровождающей рост трещины. Вследствие этого рост трещины может прекратиться (в работе отмечено появление достаточно больших, до 5–8 мм, трещин, которые при этом не становились магистральными). Объединение лазерно-индуцированной трещины с исходной уменьшает величину  $\sigma_{cr}$ , необходимую для ее роста, что способствует превращению такой трещины в магистральную.

Образование лазерно-индуцированной трещины (на ПВ, расположенном до вершины исходной трещины) в плоскости (001) (рис. 3, *a, b*) приведет к отколу части кристалла.

При воздействии импульсов излучения постоянной энергии трещины и полости, возникшие на месте ПВ, могут стабилизироваться [5]. Присутствие исходной трещины обеспечивает высокую вероятность объединения возникающих разрушений с ней и друг с другом, что способствует разрушению образца, т.е. исходная макротрещина дестабилизирует макроразрушения, возникающие в объеме образца.

## Выводы

1) Для монокристаллов  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{NaCl}$  и  $\text{LiF}$  с указанным выше содержанием примесей доминирующей причиной активации роста исходной макротрещины являются ПВ, расположенные в объеме материала.

2) Вероятность активации роста исходной трещины зависит от величины термических напряжений, возникающих на ПВ, и от места расположения ПВ относительно ее вершины.

3) Лазерно-индуцированные разрушения, возникающие в объеме образца, дестабилизируются за счет их объединения с исходной макротрещиной.

## Список литературы

- [1] Бахарев М.С., Миркин Л.И., Шестериков С.А., Юмашева М.А. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 224 с.
- [2] Билибин С.В., Егоров В.Н., Кацнельсон А.А. и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 9. С. 1912–1915.
- [3] Смирнов В.Н. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 4. С. 316–321.
- [4] Feodorov V.A., Ushakov I.V., Shelohvostov V.P. // The Influence of Structure Defects on the Damage Threshold of Transparent Dielectrics. VIII Intern. Symposium. Braunschweig (Germany), 1997. ISBN 3-9801433-8-4. WPB2-17.
- [5] Крутякова В.П., Смирнов В.Н. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 4. С. 844–852.
- [6] Крутякова В.П., Смирнов В.Н. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 4. С. 323–326.
- [7] Анисимов С.И., Макшанцев Б.И. // ФТТ. 1973. Т. 15. Вып. 4. С. 1090–1095.
- [8] Гилман Дж.Дж. // Атомный механизм разрушения. М.: Металлургия, 1963. С. 220–250.
- [9] Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.