

## ВЛИЯНИЕ ТРЕЩИНЫ И ДЕФЕКТНОГО МАТЕРИАЛА В ЕЕ ОКРЕСТНОСТИ НА ЛУЧЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2008 г. **И. В. Ушаков**, канд. физ.-мат. наук.

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов

E-mail: ushakoviv@mail.ru

Работа посвящена изучению влияния трещины на лучевую прочность кристаллов, подвергаемых воздействию мощного лазерного излучения. Выявлены механизмы воздействия трещин на лучевую прочность образцов. Рассмотрена зависимость лучевой прочности от времени существования трещины. Обсуждена методика повышения лучевой и механической прочности прозрачного материала.

Коды OCIS: 160.0160, 350.3390.

*Поступила в редакцию 11.07.2007.*

Разрушение оптических элементов лазерных систем является серьезной проблемой, ограничивающей срок их службы и предельную мощность. В этой связи исследование влияния дефектов на оптическую и механическую прочность является актуальной задачей. Одним из дефектов, приводящих к разрушению оптических элементов, является трещина. Состояние материала вблизи трещины зависит от времени ее существования, условий окружающей среды, характеристик материала и других факторов. Рост трещин в диэлектрике сопровождается эмиссией электронов, пластической деформацией, возникновением областей напряженного состояния [1–4]. Воздействие трещиноватого слоя на оптическую прочность материала подробно рассмотрено в ряде работ [5–8]. Однако технология получения трещиноватого слоя такова, что, помимо трещин, поверхностный слой содержит микронеровности поверхности, инородные включения, структурные дефекты и пр. Таким образом, физические процессы, приводящие к оптическому пробоям на трещине, не отделены от других механизмов инициирования оптического пробоя.

Цели работы: исследование особенностей оптического пробоя на трещине, определение временной зависимости лучевой прочности материала с трещиной, обсуждение принципов повышения лучевой прочности за счет выборочного модифицирования лазерным излучением дефектных областей материала.

### Методика проведения эксперимента

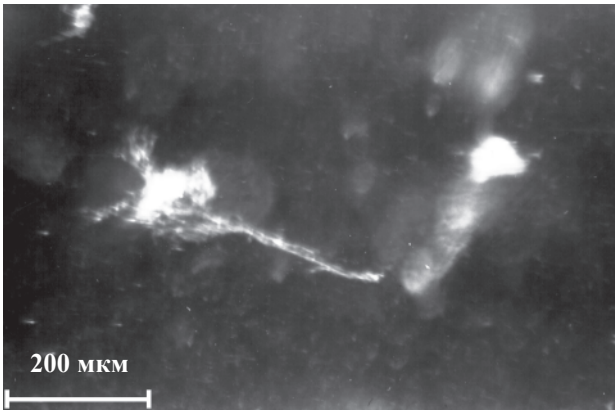
Исследования проводили на монокристаллах NaCl, KCl, LiF, CaCO<sub>3</sub>. Использовали образцы с содержанием примесей от 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-2</sup> вес.% (легированы Cr<sup>3+</sup>).

Для выявления влияния лазерного излучения на дефектную структуру в окрестности трещины из большого монокристалла выкалывали заготовки размером 15×30×16 мм. Каждую заготовку по плоскости спайности (010) раскалывали на две равные части с размерами 15×30×8 мм. В одну из них в плоскости (100) вводили макроскопическую трещину длиной примерно 6 мм, вторую оставляли без изменения. Ориентацию входной поверхности образца (100) к направлению распространения излучения меняли от перпендикулярной до параллельной с шагом 5°. Первую часть – контрольный образец, для выявления дислокационной структуры подвергали химическому травлению; вторую часть сначала облучали импульсами лазера, затем также подвергали травлению. После этого сравнивали дислокационную структуру и место расположения вершины трещины в контрольном и облученном образцах.

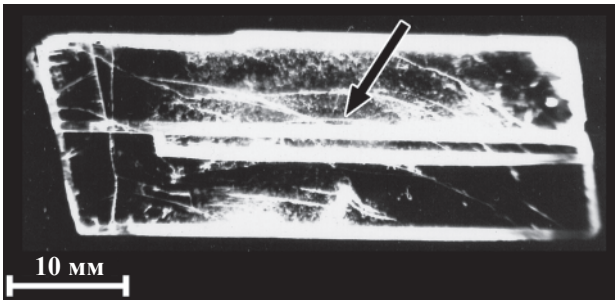
Использовали ОКГ ГОС 1001 (длина волны излучения 1060 нм, длительность импульса  $\tau \approx 1$  мс). Энергию импульсов варьировали от 40 до 500 Дж, а площадь облучаемой поверхности от 12 до 100 мм<sup>2</sup>. Кристаллы облучали импульсами, начиная с  $E = 0,7E_{th}$  ( $E_{th}$  – пороговая энергия) и увеличивали энергию каждого следующего импульса на 10% до разрушения образца. Подробные характеристики излучения приведены в [9].

### Экспериментальные результаты и обсуждение

1. При облучении кристаллов кальцита с крупными поглощающими включениями (рис. 1) импульсами излучения допороговой интенсивности в объеме образцов на месте поглощающих включений возникали области повреждения с размерами до 1 мм. Увеличение энергии импульсов приводи-



**Рис. 1.** Два крупных поглощающих включения неправильной формы, состоящие из нитевидных прожилков, расположенные в объеме  $\text{CaCO}_3$ . Их толщина в различных точках 0,02–0,04 мм. Помимо показанных на рисунке поглощающих включений, кристалл содержит включения с размерами от 10 до 25 мкм.



**Рис. 2.** Объединение лазерно-индуцированной трещины с исходной (последняя показана стрелкой). Поверхность кристалла  $\text{CaCO}_3 - (010)$ . Разрушение кристалла вследствие оптического пробоя на двух крупных поглощающих включениях. Одно из поглощающих включений находилось вблизи поверхности исходной макроскопической трещины. Положение вершины исходной трещины (до облучения) показано стрелкой.

ло к разрушению образцов за счет появления на поглощающих включениях магистральных трещин (рис. 2). Щелочно-галоидные кристаллы (ЩГК), легированные  $\text{Cr}^{3+}$  от  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  вес.%, разрушались вследствие возникновения на поглощающих включениях магистральных лазерно-индуцированных трещин.

Наблюдались случаи, когда в отсутствие крупных очагов разрушения исходная трещина прорастала, становясь магистральной. Вероятность активации роста исходной трещины при лазерно-индуцированном разрушении образца составляет 70–80%.

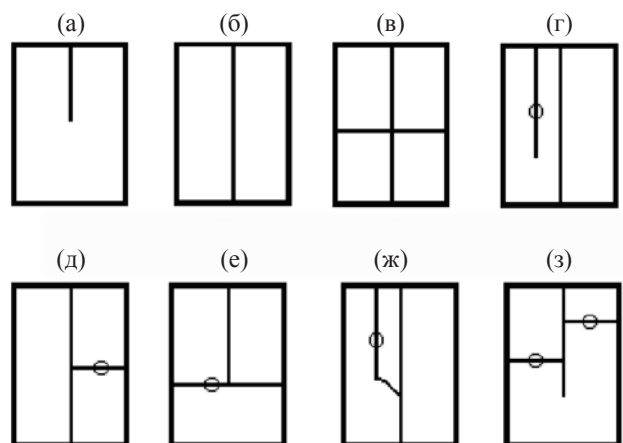
На рис. 3 приведены схемы характерных макрокартин лазерно-индуцированного разрушения об-

разцов с исходной макроскопической трещиной. Причиной подрастания исходной макроскопической трещины могут являться механические напряжения, возникающие в кристалле при распространении в нем мощного импульса лазерного излучения (рис. 3б, 3в); термические напряжения от нагретых поглощающих включений и механические напряжения, сопровождающие рост лазерной трещины (рис. 3г); взаимодействие с лазерно-индуцированной трещиной (рис. 3д–3з).

**2.** На оптическую прочность твердых прозрачных материалов влияет время существования трещин.

К настоящему времени установлено, что примерно в половине твердых прозрачных тел рост трещин сопровождается эмиссией электронов. Снижение лучевой прочности, вызванное свободными электронами, наиболее отчетливо проявляется на материалах, имеющих высокий порог оптического пробоя. Для таких материалов свободные электроны играют роль “затравочных электронов”, инициирующих развитие электронной лавины.

В работах [6, 10] показано, что подсветка ультрафиолетовым светом, приводящая к появлению свободных электронов, может вызывать значительное снижение лучевой прочности с  $q^* \approx 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $q^* \approx 2 \times 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> ( $\lambda = 10,6$  мкм,  $d_k \approx 23$  и 220 мкм). Причиной образования свободных электронов могут быть пластическая деформация и эмиссия электронов растущей трещиной. Порог оптического пробоя деформируемых кристаллов примерно в два раза ниже порога оптического пробоя этих же кристаллов, не подвергаемых деформации



**Рис. 3.** Макрокартины лазерно-индуцированного разрушения образца с исходной макротрещиной. а – исходный образец с макроскопической трещиной, б, в, г, д, е, ж, з – разрушения образца после облучения (пояснения в тексте).

[7] ( $d_{\text{фок}} = 0,25$  мм,  $\lambda = 10,6$  мкм, снижение  $q^*$  с  $170 \pm 20$  МВт/см<sup>2</sup> до 90 МВт/см<sup>2</sup>). Свидетельством роли свободных электронов в иницировании оптического пробоя в твердых прозрачных материалах является экспериментально фиксируемый оптический пробой при распространении лазерного излучения вдоль поверхности деформируемого кристалла [7] ( $d_{\text{фок}} = 0,5$  мм,  $\lambda = 10,6$  мкм, снижение  $q^*$  с  $170 \pm 20$  МВт/см<sup>2</sup> до 90 МВт/см<sup>2</sup>). Таким образом, в процессе роста трещин предельная лучевая прочность определяется наличием свободных электронов, образующихся на поверхностях трещин.

Наибольшая динамическая плотность зарядов на поверхностях растущей трещины может быть на несколько порядков больше величины остаточных зарядов и достигать  $10^3$ – $10^4$  мкКл/м<sup>2</sup>, что соответствует концентрации электронов  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup> [11]. Электрические разряды между берегами растущих трещин отмечены в полупроводниках [12], щелочно-галоидных кристаллах [13, 14], пьезо-, пиро-, ферро-, сегнетоэлектриках [4]. В то же время снижение оптического пробоя, вызванное эмиссией электронов, может наблюдаться не только при образовании трещин, но и под действием пластической деформации. Интенсивная эмиссия электронов, вспышки люминесценции наблюдаются при деформировании материала [15].

Свободные электроны (образовавшиеся вследствие роста трещины и сопутствующей пластической деформации) могут сохраняться в течение часов и даже дней [16]. Однако для большинства прозрачных материалов, находящихся в нормальных условиях, свободные электроны могут заметно влиять на лучевую прочность материала в течение  $t \approx 100$  с после прекращения деформации.

Вклад свободных электронов в снижение лучевой прочности прозрачного материала зависит от оптического совершенства материала. Чем выше порог оптического пробоя в отсутствие свободных электронов, тем значительнее снижение лучевой прочности при их появлении.

Для материалов, имеющих порог оптического пробоя  $q^* \approx 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> и выше, лучевая прочность заметно снижается (до 6 раз) при появлении в зоне облучения “затравочных электронов” [6]. На материалах с порогом оптического пробоя порядка  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> и ниже, облучаемых излучением допороговой интенсивности, единичные электроны не окажут заметного влияния на лучевую прочность. На таких материалах оптический пробой будет иницироваться за счет нагрева лазерным излучением поглощающих включений, а формирующиеся трещины и свободные электроны оказывают влияние на следующие стадии развития оптического пробоя и механического разрушения.

Таким образом, в первый период существования трещины доминирующим фактором, определяющим предельное значение лучевой прочности, является эмиссия электронов, образующихся при росте трещины и сопровождающей ее пластической деформации. Время, в течение которого свободные электроны оказывают влияние на лучевую прочность, зависит от свойств материала и окружающей среды.

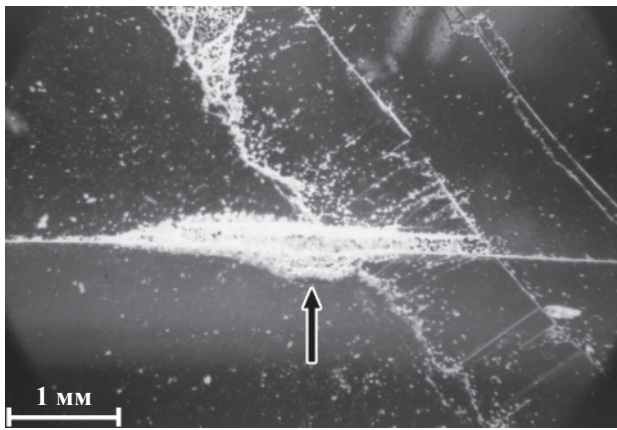
В данной работе образцы облучали примерно через 5 мин после введения макротрещины, когда практически завершаются эмиссия электронов и релаксация высоких механических напряжений. В то же время эффект старения поверхностей трещины не сказывался на лучевой прочности [5]. Этому периоду соответствует наибольшее значение лучевой прочности, когда вклад трещины в ее снижение минимален и обусловлен интерференционными явлениями.

В данной работе экспериментально показано влияние одной макроскопической трещины на картину распределения интенсивности излучения. Вероятность появления повреждения на выходной поверхности прозрачного материала выше, чем на входной. В результате наложения света, падающего и отраженного от плоскости трещины, возможно возникновение интерференционной картины. В местах интерференционных максимумов иницируется оптический пробой, захватывающий затем всю облучаемую область.

Зона облучения выходной поверхности, в которой возможно иницирование оптического пробоя, сильно зависит от ориентации плоскости трещины относительно направления распространения излучения.

В зависимости от угла падения излучения на трещину, толщины трещины, состояния поверхностей трещины возможны различные процессы: оптический пробой на трещине, частичное прохождение излучения сквозь трещину, распространение излучения вдоль плоскости трещины, если она ориентирована параллельно направлению распространения излучения или под углом полного внутреннего отражения. Для использованных кристаллов с искусственно введенной макроскопической трещиной вероятность оптического пробоя на выходной поверхности максимальна, если излучение падает на трещину под углом, близким к углу полного внутреннего отражения. В этом случае следует ожидать многократного повышения плотности мощности излучения в области его выхода из кристалла, что хорошо проявляется на кристаллах кальцита. Характерный вид зоны оптического пробоя для этого случая показан на рис. 4.

В процессе эксплуатации оптических элементов снижается порог оптического пробоя их поверхно-



**Рис. 4.** Разрушение на трещине, ориентированной под малым углом к направлению распространения излучения. Стрелкой показана область разрушения.

сти. В работе [5] наблюдали двух-, трехкратное снижение лучевой прочности за счет адсорбции влаги в поверхностном трещиноватом слое. Адсорбция воды проходила не во всем поврежденном слое, а только в трещиноватом. Как правило, на поверхности начинаются процессы перекристаллизации, термического разложения материала.

Таким образом, в третий период существования трещины предельная лучевая прочность материала определяется увеличением коэффициента поглощения поверхностей трещин вследствие их контакта с окружающей средой.

3. В вершине свежей трещины обычно присутствуют поля механических напряжений. В окрестности вершины трещины для образцов, способных деформироваться за счет трансляционного скольжения, повышена плотность дислокаций.

Подобные неоднородности структуры, как правило, приводят к снижению лучевой прочности. В то же время известно, что в зависимости от интенсивности, продолжительности излучения и его спектрального состава возможно протекание процессов релаксации механических напряжений. В определенных условиях возможны аннигиляция дислокаций и частичное залечивание макроскопических дефектов. Обратимое движение дислокаций в лучах дислокационной розетки трещины объясняет ее пластическое закрытие [3].

Следовательно, можно усовершенствовать известный метод лазерного упрочнения оптических материалов, согласно которому выгорание поглощающих включений при облучении образца излучением допороговой интенсивности приводит к повышению лучевой прочности.

Последовательная обработка области у вершины трещины мощными импульсами допороговой

интенсивности с промежуточной обработкой низкоэнергетическим лазерным излучением позволяет осуществить мягкое разрушение поглощающих включений, а затем понизить плотность дислокаций за счет разблокирования стопоров и стимулирования обратного движения, а также понизить общий уровень механических напряжений и ликвидировать опасные концентраторы в окрестности формирующихся трещин.

Для образцов с исходной макроскопической трещиной, находящейся на втором и третьем периодах ее существования, в результате указанной обработки отмечено повышение лучевой и механической (в условиях оптического пробоя) прочности. Повышение лучевой прочности ЦГК на образцах с высоким содержанием примесей ( $10^{-2} - 10^{-3}$  вес.%) достигает 3–5-кратного значения (например, с  $3 \times 10^8$  до  $7 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> для ЦГК, легированных  $\text{Cr}^{3+}$   $10^{-3}$  вес.%), что связано с тем, что лучевая прочность определяется не только содержанием поглощающих примесей, но и в большей степени тем, в каком состоянии (в каких конгломератах) находятся эти примеси. Существенное повышение лучевой прочности обусловлено хорошей способностью ЦГК к пластическому деформированию и возможностью эффективного перевода поглощающих включений в неопасное состояние. Наблюдается также увеличение механической прочности в условиях оптического пробоя. Для образцов, подвергнутых обработке по указанной методике, вероятность активации роста трещины при лазерном разрушении снижалась с 70–80 до 20–30% в зависимости от типа образцов.

## Выводы

1. Вероятность оптического пробоя на макроскопической трещине зависит от ориентации трещины относительно направления распространения излучения и от характера поглощающих включений в материале. Возможность активации роста трещины в условиях облучения связана с взаимодействием поля механических напряжений в вершине трещины и полей механических напряжений, возникающих при прохождении излучения через прозрачный материал.

2. В первый период существования трещины доминирующими факторами снижения лучевой прочности являются эмиссия электронов и электрические явления на трещине. Во второй период вклад трещины в уменьшение лучевой прочности облучаемых образцов в основном определяется интерференционными явлениями. В третий период доминирующим фактором снижения лучевой прочности является увеличение коэффициента поглощения поверхностей трещин.



3. Установлены режимы лазерной обработки оптически прозрачных материалов, основанные на селективном модифицировании дефектных областей, позволяющие повысить лучевую и механическую (в условиях лазерного облучения) прочность. Экспериментально установлено, что последовательное инициирование очагов разрушения (деформирования) импульсами допороговой интенсивности с последующей обработкой излучением с низкой плотностью мощности позволяет ликвидировать снижающие лучевую и механическую прочность дефекты за счет их мягкого разрушения и перевода в неопасное состояние, осуществить частичное залечивание дефектов и снижение механических напряжений за счет обратимого движения дислокаций.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-01-00215.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корнфельд М.И. Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении // Успехи физических наук. 1975. Т. 116. № 2. С. 327–339.
2. Гилман Дж.Дж. Скол, пластичность и вязкость кристаллов // Атомный механизм разрушения. М.: Металлургия, 1963. С. 220–250.
3. Чиванов А.В. Залечивание трещин в ЦГК воздействием малых доз ионизирующего излучения // Канд. дисс. Тамбов. 2004. 160 с.
4. Тялин Ю.И. Механоэлектрические явления при разрушении неметаллических кристаллов // Канд. дисс. Тамбов. 1991. 153 с.
5. Билибин С.В., Егоров В.Н., Кацнельсон А.А., Ковалев В.И., Колесова Н.С., Сидоров Ю.С., Ткаченко Н.Л., Файзуллов Ф.С. Влияние параметров оптической обработки и процесса естественного старения на глубину нарушенного слоя и лучевую прочность поверхности монокристаллов KCl // Квант. электрон. 1982. Т. 9. № 9. С. 1912–1915.
6. Горшков Б.Г., Данилейко Ю.К., Маненков А.А., Прохоров А.М., Сидорин А.В. Размерный эффект и статистика лазерного разрушения ЦГК на  $l = 10,6$  мкм // Квант. электрон. 1981. Т. 8. № 1. С. 148–154.
7. Смирнов В.Н. Снижение порога оптического пробоя вблизи поверхности пластически деформируемого кристалла // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 4. С. 316–321.
8. Бебчук А.С., Громов Д.А., Нечитайло В.С. Мера дефектности поверхности и оптическая прочность прозрачных диэлектриков // Квант. электрон. 1976. Т. 3. № 8. С. 1814–1816.
9. Федоров В.А., Ушаков И.В., Шелохвостов В.П., Толстова М.А. Морфология повреждений монокристаллов кальцита при оптическом пробое в широком интервале температур // Вестник Тамбовского гос. ун-та. 1997. Т. 2. № 3. С. 286–290.
10. Бломберген Н. Электрический пробой в твердых телах под действием лазерного излучения // Квант. электрон. 1974. Т. 1. № 4. С. 786–805.
11. Дерягин Б.В., Мецик М.С. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 297 с.
12. Meyer K., Obrikat D., Rossberg M. Progress in triboluminescence of alkali halides and doped zink sulphides (II) // Krist. Techn. 1970. V. 5. № 2. P. 181–205.
13. Боев С.Г., Фурса Т.В. О механизме электризации монокристаллов лития при раскалывании // Физика твердого тела. 1986. Т. 28. № 7. С. 2177–2180.
14. Финкель В.М., Головин Ю.И., Середа В.Е., Куликова Г.П., Зуев Л.Б. Электрические эффекты при разрушении кристаллов LiF в связи с проблемой управления трещиной // Физика твердого тела. 1975. Т. 17. № 3. С. 770–776.
15. Маркова-Осоргина И.А., Сенчуков Ф.Д., Шмурак С.З. Деформационная люминисценция кристаллов KCl-Ag // Физика твердого тела. 1972. Т. 14. № 5. С. 1441–1443.
16. Zakrevskii V.A., Shuldiner A.V. Electron emission and luminescence owing to plastic deformation of ionic crystals // Philosophical Magazine B. 1995. V. 71. № 2. P. 127–138.