

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ИМПУЛЬСАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ, И. С. ШИШКИН, М. И. РУДЕНКО, В. М. ТКАЧЕНКО

Изучение вопросов взаимодействия мощных импульсов света с материалами представляет большой интерес для физики твердого тела, а также применительно к решению некоторых научно-технических задач.

Имеется много публикаций, посвященных исследованию процессов взаимодействия лазерного излучения с различными материалами. Круг объектов, подвергнутых лазерному облучению, весьма обширен, при этом основное внимание привлечено к изучению поведения конструкционных [1÷6] и неорганических [7÷13] материалов.

Особое место в исследованиях отводится оптическим монокристаллам и другим прозрачным диэлектрикам, используемым в оптических системах и других устройствах современной техники и относящимся к числу весьма уязвимых для лазерного излучения [14÷17].

Следует отметить, что при всей многочисленности попыток установления связи между характеристиками объектов исследования и условиями облучения в большинстве случаев наблюдения носят описательный характер и затрагивают лишь внешнюю картину видимых нарушений в материалах. По-видимому, в этом причина того, что среди нескольких предположительных механизмов процессов взаимодействия мощных импульсов лазерного излучения с материалами ни один в настоящее время не является предпочтительным [18].

Следствием интереса к прикладным аспектам задачи взаимодействия мощных импульсов света с материалами явилась постановка настоящей работы, посвященной исследованию закономерностей процесса разрушения оптических монокристаллов модулированным и немодулированным излучением лазера на стекле с Nd^{3+} .

Объектами исследования служили образцы монокристаллов NaCl и LiF , выращенные методом Киропулоса на воздухе и затем отожженные в течение 24 ч при температуре $T_{\text{отж}} = T_{\text{плавл}} - 100^\circ\text{C}$, с последующим снижением ее со скоростью 10° мин .

В экспериментах производилось облучение образцов размерами $30 \times 30 \times 7 \text{ мм}^3$, выколотых из центральной части массивных слитков, причем при воздействии на образцы импульсов модулированного излучения последнее фокусировалось в объеме, а при воздействии импульсов немодулированного излучения — на поверхности облучаемых образцов.

Макроскопическая картина нарушений структуры кристаллов, сопровождающих взаимодействие с ними импульсов излучения, представ-

лена на рис. 1. В первом случае в объеме образцов наблюдаются нарушения типа «розеток», лепестки которых расположены вдоль кристаллографических направлений $\{100\}$, $\{010\}$ и $\{001\}$ (рис. 1, а). Наличие упомянутых лепестков у «розеток» свидетельствует о том, что нарушения структуры в облучаемых кристаллах происходят преимущественно вдоль основных кристаллографических осей.

При этом зависимость длины l_i лепестков «розеток» от интенсивности I излучения лазера для монокристаллов исследованных типов имеет линейный характер (рис. 2). Однако величина изменения длины лепестков при одних и тех же условиях облучения в кристаллах NaCl значительно больше, чем в LiF, т. е. кристаллы с большей энергией решетки являются более устойчивыми против излучения лазера. Это является подтверждением идеи о связи физических свойств с энергией решетки, развиваемой в работах [19, 20].

Во втором случае (рис. 1, б) на поверхности облучаемых образцов создается зона сплошного разрушения правильной формы и определенной глубины h_i , а также зона отслоения, характеризующаяся толщиной δ_i отделяемого слоя.

Скалывание образцов, облученных импульсами модулированного излучения, осуществленное таким образом, чтобы плоскость скола проходила через центр фокального пятна, а также визуальное наблюдение дислокационной структуры облученных кристаллов методом химического травления [20] позволили установить, что характер структурных нарушений соответствует описанному ранее [21—22]. (см. также рис. 3а).

Изменение дислокационной структуры облученных образцов вокруг фокальных пятен (рис. 3) указывает на то, что центры фокальных пятен являются зоной мощного тепловыделения, следствием чего оказывается генерация массы хаотически расположенных дислокаций. Их плотность на $2 \div 3$ порядка возрастает по сравнению с имеющей место в необлученных образцах (и равной для всех типов исследованных кристаллов $\approx 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$).

Упомянутое локальное выделение тепла высокой плотности, происходящее практически мгновенно (длительность импульсов излучения не превышала 20 нс), приводит к генерации термомеханических напряжений. В свою очередь, проявлением последних является наблюдаю-

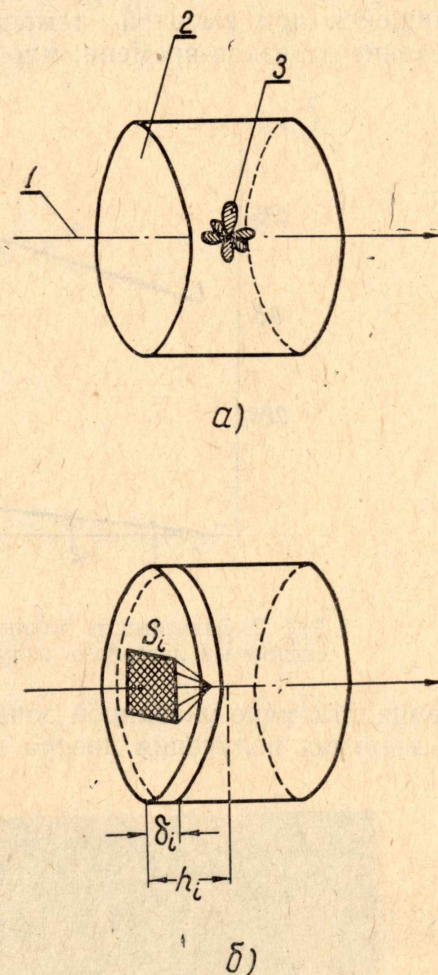


Рис. 1. Картина разрушения образцов оптических монокристаллов импульсами лазерного излучения: а) модулированного (1 — направление движения импульса, 2 — поверхность облучаемого образца, 3 — «розетка»); б) в режиме свободной генерации (S_i — площадь зоны сплошного разрушения на поверхности кристалла, h_i — глубина зоны сплошного разрушения на поверхности кристалла, δ_i — толщина зоны отслоения)

щееся экспериментально резкое увеличение плотности дислокаций в области фокальных пятен и появление микротрещин (рис. 3а).

Рассмотрение микроскопической картины структурных нарушений в облученных образцах оптических монокристаллов позволило обнаружить существование центральной зоны в области фокальных пятен, находящейся при высокой температуре в квазиравновесном состоянии в течение отрезков времени, много больших длительности импульсов из-

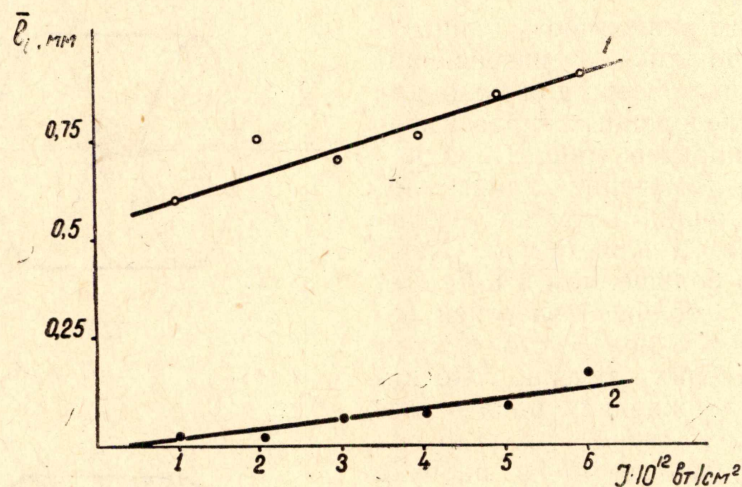


Рис. 2. Зависимость длины l_i лепестков «розеток» от интенсивности I лазерного излучения: 1 — для NaCl, 2 — для LiF

лучения. Наличие указанной зоны при всех используемых в экспериментах энергиях излучения лазера подтверждает, что поглощение энергии

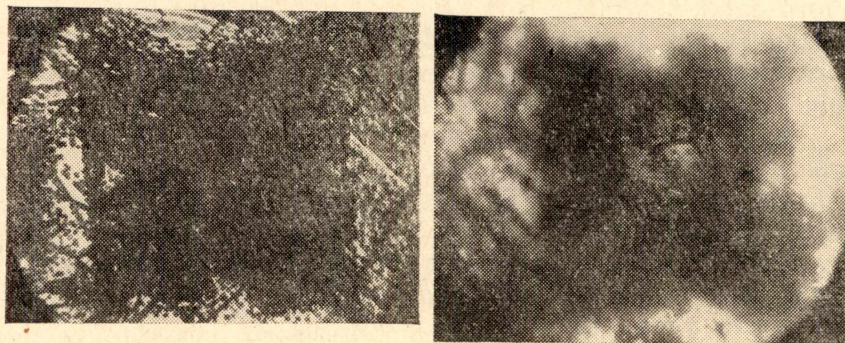


Рис. 3. Микроструктура образца: а) в области фокального пятна; б) на оконечности лепестка «розетки» (увеличение 100*)

и, следовательно, разрушение кристаллов происходит в пределах фокальных пятен.

Признаком наличия в центральной зоне фокальных пятен упомянутых термических «пиков» явилось полное оплавление и даже частичное испарение вещества в этих зонах при интенсивностях излучения лазера, превышающих систематически исследованный диапазон $10^{10} \div 10^{12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$.

Существенно отличным от описанного является характер структурных нарушений в монокристаллах, имеющий место при воздействии на них импульсов лазерного излучения в режиме свободной генерации. Масштаб структурных нарушений в последнем случае резко возраста-

ет, причем их параметры h_i , S_i и δ_i (рис. 1, б) по порядку величины становятся соизмеримыми с размерами облучаемых образцов.

Наличие в облученных кристаллах зоны сплошного разрушения подтверждает, что и в этом случае взаимодействие материала оптических монокристаллов с лазерным излучением сопровождается их высокотемпературным нагревом и испарением продуктов разрушения, причем направление выброса вещества перпендикулярно поверхности облучаемых образцов кристаллов.

Параметры, количественно описывающие картину разрушения монокристаллов, находятся в определенной связи с энергией лазерного излучения в импульсе (рис. 4). Наличие такой зависимости позволяет,

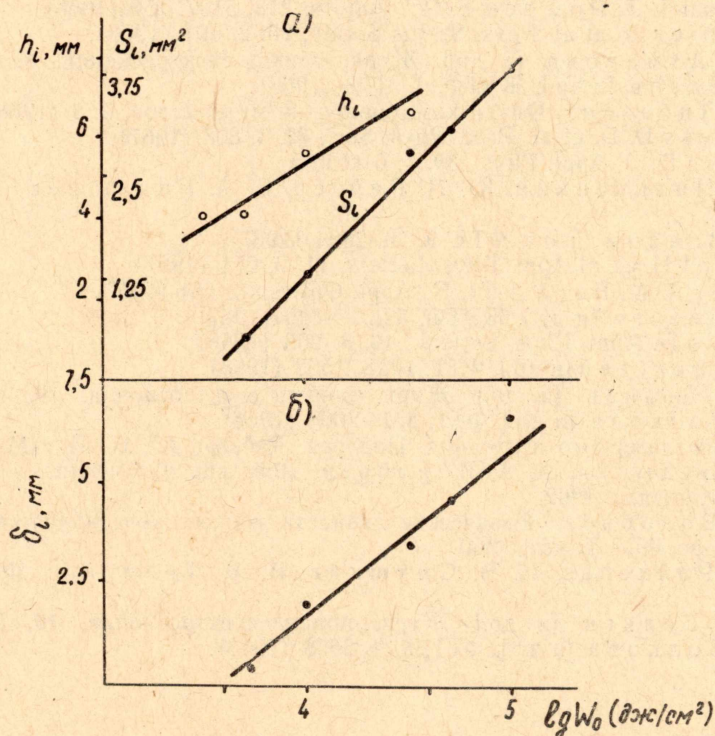


Рис. 4. Зависимость параметров, описывающих картину разрушения монокристаллов NaCl, от плотности энергии лазерного излучения ω_0 : а) глубины h_i и площади S_i зоны сплошного разрушения; б) толщина δ_i зоны отслоения

в частности, прогнозировать масштабы микроскопических структурных нарушений в образцах кристаллов в более широком диапазоне плотностей энергии лазерного излучения, чем использованные в настоящей работе.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При воздействии на образцы NaCl и LiF импульсов модулированного излучения лазера наблюдаются нарушения типа «розеток», лепестки которых расположены вдоль кристаллографических направлений $\{100\}$, $\{010\}$, $\{001\}$.

Импульсы немодулированного лазерного излучения на поверхности облучаемых образцов создают зоны сплошного разрушения и отслоения.

2. Зависимость длины l_i лепестков «розеток» от интенсивности модулированного излучения лазера для NaCl и LiF имеет линейный характер.

3. Фокальные пятна, возникающие при облучении импульсами модулированного лазерного излучения, являются зоной мощного тепловыделения.

4. Изменение параметров S_i , δ_i и h_i , описывающих картину разрушения монокристаллов, в зависимости от логарифма энергии в импульсе немодулированного лазерного излучения носит линейный характер.

5. Кристаллы с большей энергией решетки являются более устойчивыми против излучения лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Бонч-Бруевич [и др.]. ЖТФ, 38, 5, 851 (1968).
2. Baston T. J., Powden F. P., Nature, 218, 5137, 150 (1968).
3. Cauthier R. et al. Phys. Status Solidy, 25, 2, 691 (1968).
4. М. В. Ахманова [и др.]. Журн. прикл. спектроскопии, 8, 4, 584 (1968).
5. Н. Г. Басов [и др.]. ЖЭТФ, 4, 1073 (1968).
6. М. Н. Либенсон. Физ. и хим. обработки материалов, 2, 3 (1968).
7. Burgess D. D. et al. Proc. Phys. Soc., 92, 3, 805 (1967).
8. Olness D. J. Appl. Phys., 39, 1, 6 (1968).
9. Н. Ф. Пилипецкий, Ю. П. Райзер, В. А. Упадышев. ЖЭТФ, 54, 4, 1964 (1968).
10. В. И. Владимиров. ФТТ, 9, 10, 2804 (1967).
11. Dupont H. et. al Appl. Phys. Letters, 11, 9, 271 (1967).
12. Miller R. A., Bogelli N. F. Appl. Optics., 6, 164 (1967).
13. Р. М. Зверев [и др.]. ЖЭТФ, 53, 6, 1849 (1967).
14. Olness D. Appl. Phys. Letters., 10, 8, 283 (1966).
15. Н. И. Алексеев [и др.]. ФТТ, 10, 8, 1503 (1968).
16. Л. М. Беляев [и др.]. Журн. прикл. спектроскопии, 10, 5, 750 (1968).
17. Н. В. Волкова [и др.]. ФТТ, 8, 9, 2668 (1966).
18. Действие лазерного излучения. Под ред. Райзера Ю. П. М., «Мир», 1968.
19. Б. В. Будылин, А. А. Воробьев. Действие излучения на ионные структуры. М., Госатомиздат, 1962.
20. А. А. Воробьев. Физические свойства ионных кристаллических диэлектриков. Кн. 1, Изд-во ТГУ, Томск, 1960.
21. Е. И. Райхельс, И. В. Смушков, В. М. Трембач. ФТТ, 9, 5, 1505 (1967).
22. Л. М. Беляев [и др.]. Журн. прикл. спектроскопии, 10, 5, 750 (1968).
23. Н. В. Волкова [и др.]. ФТТ, 8, 9, 2668 (1966).