

УДК 538.951—405

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ РАЗРУШЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

В. А. Калитенко, И. Я. Кучеров, В. М. Перга, В. А. Тхорик

Приведены результаты исследований разрушения монокристаллов фтористого лития под действием непрерывного лазерного излучения. Путем сопоставления данных метода акустической эмиссии с непосредственным наблюдением динамики развития трещины и изменением дислокационной структуры образца исследованы различные стадии разрушения. Показано, что, анализируя форму импульсов акустической эмиссии, можно разделить процессы развития дислокационной структуры и зарождения микротрещин от образования макротрещины. Проведен расчет параметров источников акустической эмиссии, который подтверждает предложенные модели возникновения высокочастотной компоненты акустического излучения.

Для более глубокого понимания процесса разрушения необходима информация о динамике движения и накопления дефектов. Известно, что одним из немногих методов, способных дать такую информацию, является метод акустической эмиссии (АЭ) [1-4]. В исследованиях, выполненных в этом плане, в качестве информативных параметров использовались в основном либо тип АЭ (непрерывная или дискретная) и ее удельная мощность, либо изменение АЭ в процессе возникновения разрушения. В качестве же физического воздействия, приводящего в конечном счете к разрушению монокристаллов, обычно используется статическое механическое нагружение. В то же время известно, что наибольшую информацию об источнике АЭ можно получить, исследуя форму отдельных импульсов [5]. Кроме того, для установления более однозначной связи АЭ с процессом разрушения кристаллов необходимо иметь иную информацию о динамике развития дефектов. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование процесса разрушения путем анализа формы импульсов акустической эмиссии с одновременной регистрацией параметров развивающихся трещин оптическим методом (по интенсивности отраженного от трещины света) и изучение дислокационной структуры образцов.

Объектом изучения служили монокристаллы фтористого лития, которые отжигались при температуре 800 °С с последующим медленным охлаждением. Образцы выкалывались по плоскости скола и имели размеры 30×30×12 мм. С целью выявления дислокационной структуры образцы подвергались травлению в водном растворе хлорного железа. Исходная плотность дислокаций составляла 10^5 см^{-2} . Для исследования формы отдельных импульсов АЭ необходимо их регистрировать без искажения, т. е. наблюдать прямую акустическую волну. А это возможно только в том случае, если известно положение источника АЭ. С этой целью на поверхности образца движущимся индентором наносилась царапина в направлении [100], которая впоследствии служила источником разрушения. Схема эксперимента приведена на рис. 1. Образец 1 располагался на буфере 2 размером 30×70×70 мм, который для улучшения акустического согласования был выполнен из того же материала, что и образец.

Акустический контакт между образцом и буфером осуществлялся с помощью эпоксидной смолы. К противоположной поверхности буфера приклеивался пьезоэлектрический преобразователь 3 для регистрации сигналов акустической эмиссии. Преобразователь представлял собой диск из пьезокерамики ЦТС-19 диаметром 5 и толщиной 0.2 мм, поляризованный по толщине. Он был демпфирован медным цилиндром 4 диаметром 20 и высотой 60 мм с целью осуществления широкополосного приема акустических импульсов [3]. Преобразователь располагался в точке эпипцентра, т. е. непосредственно на линии нормали к поверхности образца, проведенной через точку, где впоследствии возникает источник акустического излучения. Использование образцов и буфера больших размеров позволяет наблюдать прямую акустическую волну от источника в течение 3.6 мкс, после чего появляются первые отраженные от границы раздела образец—буфер волны.

Локализованный очаг разрушения с заранее заданным местом создавался путем воздействия сфокусированного в область царапины 5 (рис. 1) пучка непрерывного лазерного излучения 6 (длиной волны 10.6 мкм). Известно, что относительно просто локализованный

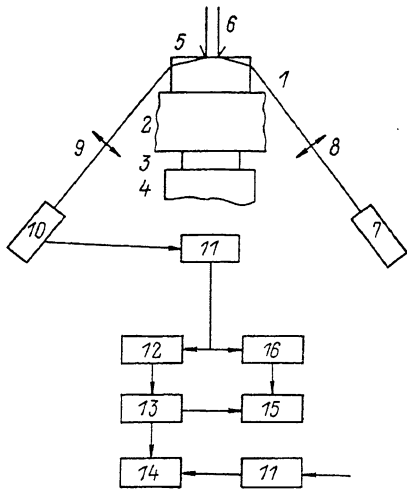


Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — образец, 2 — акустический буфер, 3 — пьезоэлектрический преобразователь, 4 — демпфер, 5 — трещина, 6 — лазерное излучение с длиной волны 10.6 мкм, 7 — гелий-неоновый лазер, 8, 9 — объективы, 10 — фотоэлектронный умножитель, 11 — предусилитель, 12 — дискриминатор, 13 — генератор импульсов, 14, 15 — запоминающие осциллографы, 16 — линия задержки.

очаг разрушения может быть создан с использованием мощного импульсного лазера [6], однако в этом случае применение методики акустической эмиссии затруднено, поскольку происходит генерация акустического импульса чисто фотоупругой природы, выделить на фоне которого акустический отклик весьма затруднительно.

С целью определения параметров, возникающих при разрушении трещин, боковая поверхность образца освещалась однородным по сечению плоскопараллельным пучком лазерного излучения от вспомогательного лазера 7 (длина волны излучения 6328 Å). При образовании трещины благодаря полному внутреннему отражению на границе трещины с воздухом возникает отраженный пучок, интенсивность которого пропорциональна площади раскрытия трещины и измеряется при помощи фотоумножителя 10 (ФЭУ-100) [7]. Сигналы с пьезопреобразователя и ФЭУ усиливаются усилителями 11 и записываются на экране запоминающих осциллографов 14 и 15.

Для установления связи импульсов АЭ с определенным процессом разрушения необходимо осуществить синхронизацию сигналов, снимаемых с пьезопреобразователя и ФЭУ. Синхронизация установки осуществлялась импульсами с ФЭУ (запуск генератора синхроимпульсов 13 происходил в начальный момент образования трещины). Чтобы можно было наблюдать АЭ и в некотором интервале времени, предшествующем началу образования трещины, акустический сигнал дополнительно задерживался буфером 2. Общая задержка сигналов АЭ в образце и в буфере составляла 6.1 мкс. Для одновременного наблюдения на экране осциллографа сигнала с ФЭУ он дополнительно задерживается линией задержки 16.

В результате проведенных исследований было показано, что при мощности лазерного излучения, превышающей некоторую пороговую величину 20 Вт/см², попадание луча в область царапины приводит к возник-

новению трещины и генерации сигналов АЭ. Развитие трещины в большинстве случаев происходит в направлении, перпендикулярном царпине, и в глубь образца. Сигналы АЭ, возникающие в предразрушающем состоянии в момент зарождения и развития трещины, различаются как по величине, так и по длительности. В предразрушающем состоянии они имеют длительность порядка 0.2 мкс, а при образовании трещины и ее развитии — порядка 2–4 мкс. Амплитуды их отличались примерно как 1 : 10 соответственно. На рис. 2 приведена осциллограмма, отображающая развитие трещины (1) и генерируемую при этом акустическую эмиссию (2). Из рисунка видно, что развитие трещины происходит скачкообразно, что согласуется с данными [7]. Причем каждый скачок сопровождается излучением акустических волн; видно также, что акустический импульс

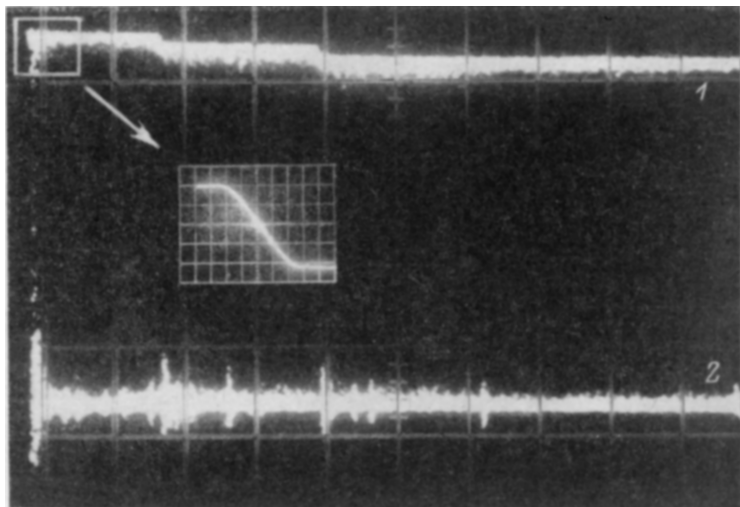


Рис. 2. Кинетика развития трещины и сопутствующее акустическое излучение. Сигнал с ФЭУ (1) и импульсы акустической эмиссии (2). Скорость развертки — 0.1 с/дел, масштаб по вертикали — 10 мВ/дел. На вставке — начальный скачок в развитии трещины. Скорость развертки — 1 мкс/дел, масштаб по вертикали — 1 мВ/дел.

наибольшей амплитуды возникает в момент начального скачка, т. е. в момент зарождения трещины. Более детально картина развития трещины в момент начального скачка показана на рис. 2. Сопоставление размеров образовавшейся трещины с картиной ее развития позволяет определить абсолютное приращение площади трещины в результате каждого скачка. Если предположить, что трещина растет самоподобным образом, то можно оценить скорость ее развития. Так, например, данные одного из экспериментов следующие: радиус образовавшейся трещины 3 мм, амплитуда начального скачка составила 1/8 от сигнала с ФЭУ, соответствующего развившейся трещине, а время развития начального скачка 2.7 мкс. Таким образом, средняя скорость развития трещины 140 м/с, что согласуется с литературными данными для фтористого лития [7].

Возвращаясь к рис. 2, следует отметить, что наряду с акустическими импульсами, возникающими в моменты скачкообразного развития трещины, наблюдается генерация АЭ, когда трещина не движется. На рис. 3 показан вид акустических импульсов, генерируемых до появления трещины (1), а также начало импульса, обусловленного последующим образованием макротрещины (2). Из указанных рисунков следует, что наряду с длинными акустическими импульсами длительностью порядка нескольких микросекунд имеют место короткие (0.2 мкс) импульсы меньшей амплитуды, которые возникают до появления трещины. Это указывает на то, что существует еще один механизм излучения звука при разрушении, причем не связанный с развитием берегов трещины.

Методом двойного травления производилось изучение дислокационной структуры образца с введенной царапиной до и после лазерного воздействия. Было установлено (рис. 4), что плотность дислокаций вблизи образовавшейся трещины возрастает примерно на 2 порядка по сравнению с исходной и составляет 10^7 см^{-2} (а в отдельных местах и более). На рис. 4

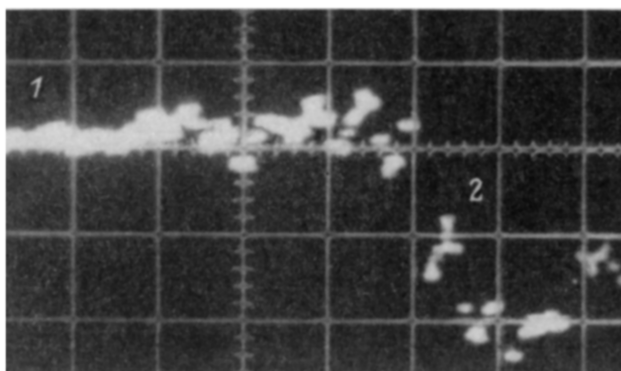


Рис. 3. Высокочастотная компонента акустической эмиссии (1) наряду с импульсом от трещины (2); скорость развертки — 1 мкс/дел, масштаб по вертикали — 0.1 В/дел.

большие рамки травления соответствуют ростовым дислокациям, имевшим место в кристалле до возникновения трещины, а маленькие — возникшим в процессе разрушения. Таким образом, наряду с образованием трещины происходит активное размножение дислокаций. Последнее, как известно, может приводить к генерации акустической эмиссии [8], поэтому есте-

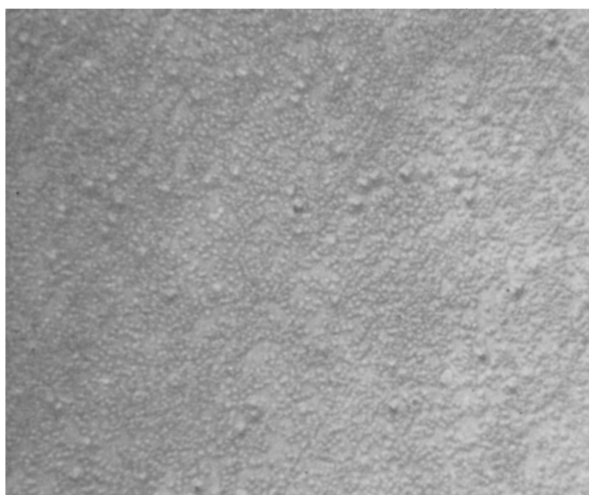


Рис. 4. Фигура травления поверхности кристалла фтористого лития вблизи трещины.

ственно предположить, что короткие акустические импульсы связаны как раз с процессами зарождения и движения дислокаций.

Для проверки этого предположения проведем оценку параметров источников АЭ, исходя из наблюдаемой формы акустических сигналов. Известно [9], что площадь акустического импульса, генерируемого в результате развития дефекта, пропорциональна величине образующегося объема. Обычно для определения объема источника излучения необходимо точно измерить смещение в акустической волне калиброванным широкополосным приемником (например, емкостным датчиком). Однако

в данном случае можно избежать этой трудоемкой процедуры, поскольку один из наблюдаемых акустических импульсов возбуждается источником с известным объемом (трещиной). Площадь излучаемого при этом акустического импульса рассчитывается по осциллограмме. Таким образом, может быть найден коэффициент пропорциональности между этими величинами. Импульс от трещины выполняет роль калибровочного.

Необходимо указать, что исследуемые импульсы существенно различаются по спектральному составу, поэтому могут по разному искажаться в результате частотно-зависимого затухания при распространении акустических волн в образце и буфере. Однако для используемых нами отожженных монокристаллов фтористого лития в исследованном диапазоне частот 0—10 МГц затухание ультразвука мало (декремент $\sim 3 \cdot 10^{-4}$) [10], что позволяет пренебречь им и применять указанный способ калибровки.

Учитывая вышеизложенное, а также основываясь на данных рис. 3 и величине объема трещины 10^4 мкм³, получим, что объем источника, излучающего короткие акустические импульсы, равен 100 мкм³. В соответствии с предполагаемым механизмом излучения рассчитаем число дислокационных полупетель, которые должны возникнуть для создания источника требуемого объема. Будем считать, что развитие всех полупетель происходит за время, равное длительности акустического импульса, т. е. 0.2 мкс. Согласно [11], скорость движения дислокаций в кристаллах фтористого лития при напряжениях, близких к порогу образования трещины, по порядку величины равна 50 м/с, что соответствует радиусу дислокационной полупетли 10 мкм. Тогда необходимое количество одновременно движущихся дислокаций составляет $3 \cdot 10^3$. Возможность кооперативного движения такого числа дислокаций подтверждается исследованием фигур травления поверхности образца (рис. 4), а также согласуется с результатами независимых экспериментов [9, 12]. Заметим, что при столь большой локальной плотности дислокаций вполне вероятно зарождение микротрещин. Поэтому часть импульсов АЭ может быть обусловлена именно этим процессом. Сравнение величины рассчитанного выше объема источника с данными работы [13], где измерены размеры образующихся в монокристаллах фтористого лития микротрещин (длиной 25 мкм), показывает, что они удовлетворительно согласуются.

Следовательно, наиболее вероятными источниками излучения высокочастотной компоненты АЭ будут зарождение и движение дислокаций, а также возникновение микротрещин.

Укажем, что из вида осциллограмм трудно заключить, какой из коротких импульсов соответствует микротрещине, а какой имеет дислокационную природу. Необходимы дополнительные исследования для разделения акустического излучения, соответствующего каждому в отдельности из указанных механизмов.

Таким образом, в настоящей работе исследована динамика развития разрушения в монокристаллах фтористого лития, а также изучены особенности возникающего при этом акустического излучения. Использование оптической методики для наблюдения за состоянием очага разрушения позволило определить момент зарождения трещины и проследить динамику ее прорастания. Показано, что амплитуда и длительность импульсов акустической эмиссии, возникающих на различных стадиях разрушения, резко различаются. Последнее позволяет решить методом АЭ обратную задачу, т. е. восстановить тип развивающихся дефектов на основании измерения параметров сопутствующего акустического излучения.

Л и т е р а т у р а

- [1] Ogura M., Adashi Y., Ikoma T. J. Appl. Phys., 1979, vol. 50, N 11, p. 6745—6749.
- [2] Лексовский А. М., Азимов Ш. Ш. Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 5, с. 306—309.
- [3] Rouby D., Fleishmann P., Duvergier D. Phil. Mag. A, 1983, vol. 47, N 5, p. 689—705.
- [4] Scruby C. B., Collingwood I. C., Wadley H. N. G. J. Phys. D, 1978, vol. 11, p. 2359—2369.

- [5] Куксенко В. С., Станциц С. А., Томилин Н. Г. Механика композиц. материалов, 1983, № 3, с. 536—543.
- [6] Алексеев Н. И., Волкова Н. В., Лихачева В. А., Шестопалов Л. Н. ФТТ, 1968, т. 10, № 8, с. 2403—2407.
- [7] Финкель В. М., Тялин Ю. И., Головин Ю. И. и др. ФТТ, 1979, т. 21, № 7, с. 1943—1947.
- [8] James D. R., Carpenter S. H. J. Appl. Phys., 1971, vol. 42, N 12, p. 4685—4697.
- [9] Scruby C. B., Wadley H. N. G., Rusbridge K., Stockham-Jones D. Metal Science, 1981, vol. 15, N 11—12, p. 599—608.
- [10] Физическая акустика. Применение физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела / Под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1969, т. 4. 436 с.
- [11] Gutmans E. Y. J. Phys., 1976, vol. 37, N 12, p. 595—600.
- [12] Головин Ю. И., Шибков А. А. ФТТ, 1986, т. 28, № 11, с. 3492—3499.
- [13] Журков С. Н., Новак И. И., Порецкий С. А., Якименко И. Ю. ФТТ, 1987, т. 29, № 1, с. 156—164.

Киевский государственный
университет им. Т. Г. Шевченко
Киев

Поступило в Редакцию
11 апреля 1988 г.
В окончательной редакции
18 июля 1988 г.