

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ КОЛОРИМЕТРА ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИИ В LiF ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ

Е. К. ЗАВАДОВСКАЯ, Н. М. ТИМОШЕНКО

(Представлена семинаром лаборатории ЭнЭЛИС НИИ ФТТ)

Количество и тип дефектов, возникающих в твердом теле при взаимодействии его с излучением, может быть определено при исследовании ряда свойств (оптических, механических, электрических). Однако ни один из этих методов исследований не дает возможности произвести энергетическую оценку нарушений, созданных излучением. Как известно, радиационные нарушения увеличивают потенциальную энергию системы, иными словами, при облучении происходит запасание энергии на дефектах.

Исследование запасенной энергии в твердом теле позволяет в сочетании с другими методами (особенно оптических и электрических) получить более широкую информацию о типе дефектов, их устойчивости, поведении в процессе отжига и т. д. Поэтому, несомненно, представляет как научный, так и теоретический интерес энергетическая оценка радиационных нарушений. Наиболее удобным и целесообразным методом определения запасенной энергии в твердом теле является колориметрический метод.

В наших исследованиях измерение запасенной энергии проводилось методом дифференциально-термического отжига в высокотемпературном вакуумном колориметре [1]. В качестве материала для исследования был выбран LiF по следующим соображениям:

1. Облучение тепловыми нейтронами сопровождается ядерной реакцией



Продукты распада передают кристаллу 4,8 Мэв кинетической энергии, создавая в нем большое количество дефектов.

2. Дефекты в LiF отличаются большой стабильностью.

Кристаллы LiF облучались в реакторе ИРТ-2000 ИЯФ АН Уз. ССР смешанным потоком быстрых и тепловых нейтронов и  $\gamma$ -лучей. В месте облучения поток быстрых нейтронов  $n\nu = 1 \cdot 10^{11}$  нейтр/см<sup>2</sup>. сек; поток тепловых нейтронов  $n\nu = 1,6 \cdot 10^{13}$  нейтр/см<sup>2</sup>. сек.

Отжиг нарушений, наведенных при облучении в реакторе, сопровождается выделением энергии, запасенной на дефектах. В спектре выделения запасенной энергии кристалла LiF, облученного в течение 5 часов (рис. 1, кривая 4), имеется четко выраженный максимум при  $t^\circ = 370^\circ\text{C}$ . Кроме этого максимума, имеются слабо разрешенные пики при температурах 220°C, 270°C и 420°C.

Для кристалла, облученного в реакторе в течение 0,5 час. (кривая 1), четко выраженный максимум наблюдается при температуре 310°C. Увеличение времени облучения сопровождается сдвигом этого максимума в область более высоких температур. Так, при облучении в течение 1 часа дополнительно к максимуму при температуре 310°C появляется максимум при температуре 350°C, который при более длительном облучении переходит в максимум при температуре 370°C.

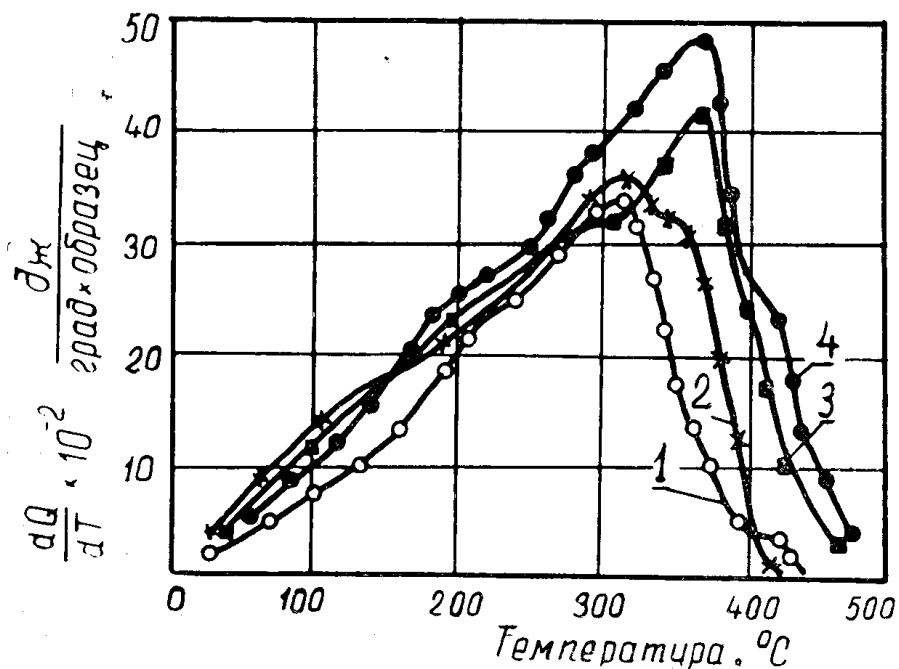


Рис. 1. Спектры выделения запасенной энергии в кристаллах LiF при облучении в реакторе в течение: 1—0,5 часа; 2—1 часа; 3—2 часов; 4—5 часов

Смещение максимумов в область более высоких температур с ростом продолжительности облучения обусловлено, очевидно, или увеличением концентрации дефектов (а следовательно и запаздыванием их отжига при данной скорости нагрева), или увеличением концентрации продуктов ядерной реакции: гелия и трития, которые каким-то образом могут влиять на устойчивость дефектов, или наличием этих двух процессов одновременно.

Интенсивное выделение запасенной энергии при температуре 370°C свидетельствует о том, что при этой температуре происходит интенсивный отжиг дефектов в кристаллах LiF, созданных облучением в реакторе. Дальнейшее нагревание сопровождается спадом запасенной энергии, а следовательно, и уменьшением концентрации дефектов. Прекращение выделения запасенной энергии при температуре 500°C свидетельствует о том, что при нагревании до этой температуры все дефекты, наведенные в LiF облучением в реакторе, полностью отжигаются.

На рис. 2 приведена зависимость запасенной энергии в кристаллах LiF от времени облучения в реакторе. Запасенная энергия растет с увеличением продолжительности облучения в реакторе. Интенсивный рост запасенной энергии при малой продолжительности облучения сменяется тенденцией к насыщению при облучении в течение 5 часов (суммарный

поток тепловых нейтронов  $2,65 \cdot 10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>). При выходе на насыщение запасенная энергия в кристаллах LiF составляет 97 дж/г.

Расчет поглощенной кристаллом энергии при облучении тепловыми нейтронами позволил оценить долю запасенной энергии от поглощенной. При облучении в реакторе в течение 5 часов поглощенная кристаллом энергия составляет  $6,6 \cdot 10^4$  дж/г, а запасается 97 дж/г. Запасенная энергия составляет от поглощенной 0,145%. При облучении в течение 0,5 часа запасенная энергия составляет от поглощенной 0,90%. Иными

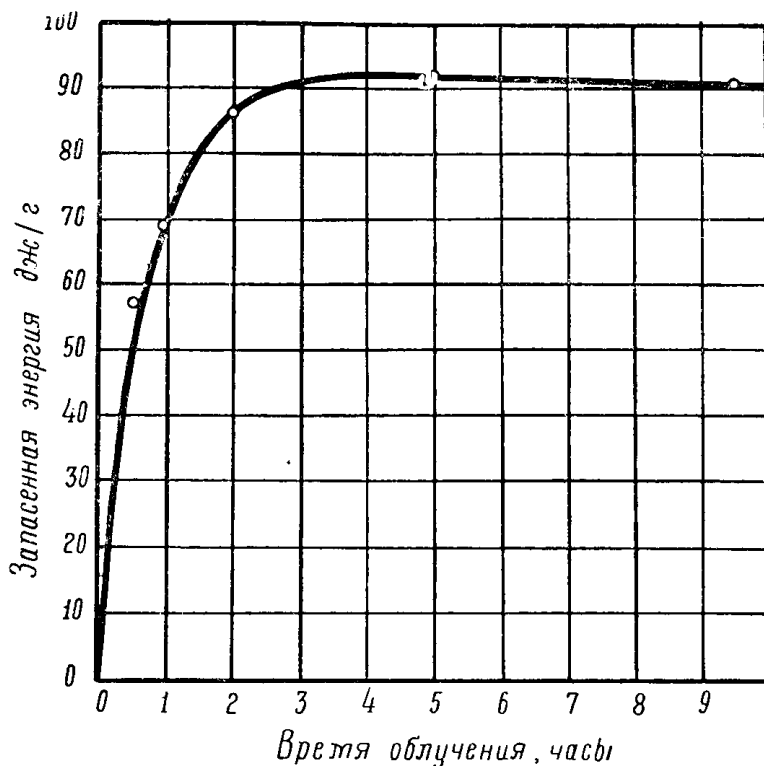


Рис. 2. Зависимость запасенной энергии в LiF от времени облучения в реакторе

словами, с увеличением продолжительности облучения в реакторе величина запасенной энергии возрастает, но доля запасенной энергии от поглощенной уменьшается.

Рост запасенной энергии обусловлен увеличением концентрации дефектов; выход запасенной энергии на насыщение после 5 часов облучения свидетельствует о достижении в LiF предельной концентрации дефектов и установлении динамического равновесия между двумя процессами — генерации дефектов и их радиационным отжигом.

Результаты измерений запасенной энергии позволили провести расчеты и оценить вклад, вносимый отдельными видами дефектов (а именно, *F*- и *M*-центрами) в общую величину запасенной энергии. В расчетах мы исходили из следующих предложений [3]:

- а) запасание энергии происходит лишь на *F*- и *M*-центрах,
- б) энергия, выделяемая при разрушении *F*-центра, равна 10 эв.

Можно записать:

$$E = E_F + E_M, \quad (1)$$

где  $E$  — энергия, запасаемая на дефектах и определяемая экспериментально;

$E_F$  и  $E_M$  — энергии, запасаемые соответственно на *F*- и *M*-центрах.

Зная число  $F$ - и  $M$ -центров, образуемых в кристалле при облучении соответствующим потоком тепловых нейтронов [2], мы можем определить энергию, запасаемую на  $F$ -центрах:

$$E_F = e_F \cdot N_F = 10 \cdot N_F \text{ (эв)}, \quad (2)$$

где  $e_F$  — энергия, выделяемая при разрушении  $F$ -центра (мы условились, что  $e_F = 10$  эв);

$N_F$  — общее число  $F$ -центров, накопленных в  $1 \text{ см}^3$  при данном потоке тепловых нейтронов.

Из (2) и (1) можно получить, что

$$E_M = E - E_F = E - 10N_F. \quad (3)$$

Зная концентрацию  $M$ -центров, можно рассчитать энергию, выделяющуюся при разрушении одного  $M$ -центра.

$$e_M = \frac{E_M}{N_M} = \frac{E - 10N_F}{N_M} \text{ (эв)}. \quad (4)$$

Из результатов проведенного нами эксперимента следует, что при двухчасовом облучении (поток тепловых нейтронов равен  $0,96 \cdot 10^7$ ) запасенная энергия составляет:

$$E = 87 \text{ дж/г} = 1,25 \cdot 10^{21} \text{ эв/см}^3.$$

Согласно [2] концентрация дефектов в LiF следующая:

$$N_F = 6,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}, \quad N_M = 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

Тогда

$$E_F = 6,5 \cdot 10^{19} \cdot 10 = 6,5 \cdot 10^{20} \text{ эв},$$

$$E_M = 1,25 \cdot 10^{21} - 0,65 \cdot 10^{21} = 6 \cdot 10^{20} \text{ эв/см}^3.$$

Энергия, приходящаяся на один  $M$ -центр:

$$e_M = \frac{E_M}{N_M} = \frac{6 \cdot 10^{20}}{4 \cdot 10^{19}} = 15 \text{ (эв)}.$$

Рассчитаем долю энергии, приходящейся на  $M$ -центры:

$$\frac{E_M}{E} = \frac{6 \cdot 10^{20}}{1,21 \cdot 10^{21}} = 0,48.$$

Таким образом, для кристаллов LiF при облучении в реакторе при выходе запасенной энергии на насыщение энергия, запасаемая на  $M$ -центрах, составляет почти половину от всей запасенной кристаллом энергии.

Результаты расчета запасенной энергии для других доз находятся в хорошем согласии с результатами эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. К. Завадовская, А. В. Кузьмина, Н. М. Тимошенко, И. С. Шишкин. Приб. и техн. экспер., 5, 1966.
2. Peisl H., Z. Angew. Phys., 14, 529, 1962.
3. Н. М. Тимошенко. Диссертация, Томск, ТПИ, 1966.