

УДК 621.039.553 : 539.383

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ И ЯДЕРНЫХ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЕ В КРИСТАЛЛАХ LiF

А. Ю. Дидык, Р. Ц. Оганесян, В. Р. Регель, В. А. Скуратов

Изучены спектры поглощения и механические свойства кристаллов LiF, облученных ионами Xe^{136} (118 МэВ), Ar (225, 46.3 МэВ), Ne^{20} (112.5 МэВ), Ne^{22} (26.9 МэВ) в интервале доз 10^{10} — 10^{14} см⁻². Показано, что число образовавшихся анионных вакансий определяется полными ионизационными потерями тяжелых ионов. Наблюдаемые различия в дозовых зависимостях концентраций точечных дефектов для ионов Хе, Ar и Не, начиная с некоторой дозы облучения, могут быть объяснены перекрытием треков ионов. Изменение механических свойств LiF определяется радиационными дефектами, образованными в результате упругих столкновений бомбардирующих ионов с атомами кристалла.

В настоящее время наряду с традиционной низкоэнергетичной ионной имплантацией существенное развитие получают работы, в которых для создания ионно-легированных заглубленных структур используются тяжелые ионы с энергиями более 1 МэВ/а. е. м. [1]. Такие энергии внедряемых ионов дают возможность модифицировать свойства облучаемых материалов на глубинах порядка нескольких десятков микрон. Помимо изучения важных с практической точки зрения материалов, представляют значительный интерес исследования самих механизмов образования радиационных дефектов. Эти работы целесообразно проводить на наиболее изученных структурах, какими являются ионные кристаллы. Использование в качестве объектов исследований оптически прозрачных кристаллов позволяет широко использовать для получения информации о радиационных дефектах традиционные методы физики твердого тела — абсорбционную спектроскопию, фото- и катодолюминесценцию и др.

Образование радиационных дефектов в кристаллах с ионной связью происходит как вследствие упругих соударений бомбардирующих ионов с атомами мишени, так и в результате электронных и ионных процессов при ионизации атомов [2, 3]. Поэтому представляет интерес определение роли этих двух каналов передачи энергии в формировании дефектной структуры кристаллов, а также в изменении их механических свойств.

В настоящей работе для выяснения этих вопросов изучались спектры поглощения и механические свойства фтористого лития, облученного высокоэнергетичными ионами ксенона, аргона и неона.

1. Методика экспериментов

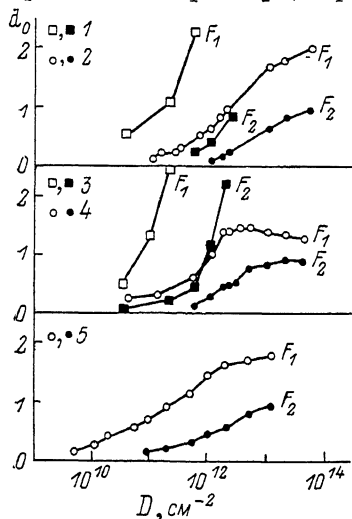
Образцы монокристаллов LiF в виде пластинок $10 \times 10 \times 1$ мм облучались ионами Xe^{136} (118 МэВ), Ar (225 МэВ, 46.3 МэВ), Ne^{20} (112.5 МэВ), Ne^{22} (26.9 МэВ) на циклотронах ЛЯР ОИЯИ У-300 и ИЦ-100 до доз $5 \cdot 10^9$ — $5 \cdot 10^{13}$ см⁻². Плотность потока ионов во всех случаях не превышала $5 \cdot 10^9$ см⁻²·с⁻¹. Образцы приклеивались теплопроводящим клеем на мишенный держатель, представляющий собой медную пластинку, охлаждаемую водой. Температура кристаллов во время облучения находилась

в пределах 25—40 °С. Однородность распределения ионов по площади облучаемых образцов на ускорителе У-300 обеспечивалась сканированием пучка. Вывод ионов электростатическим методом на циклотроне ИЦ-100 позволяет получать однородно распределенный пучок на площади более 100 см², что и использовалось при облучении образцов [4].

После облучения измерялись спектры поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях, а также микротвердость образцов. Спектры определялись с помощью спектрофотометра «SPECORD» М40. Измерение микротвердости по Виккерсу H_V проводилось на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0.5 Н. Глубина проникновения индентора в материал составляла 0.2—0.4 от величины пробега ионов в LiF. Это дает основание считать, что измерявшаяся микротвердость характеризовала механические свойства облученного слоя кристалла.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Как и в случае воздействия других видов излучения, ионное облучение приводит к появлению в спектрах полос поглощения, обусловленных образованием F_1 - и F_2 -центров окраски. Дозовые зависимости оптической



плотности $d_0(D)$ в максимуме полос поглощения, отражающие кинетику накопления указанных выше радиационных дефектов, поскольку $d_0 \sim n_F$, приведены на рис. 1. Видно, что концентрации центров n_{F_1} и n_{F_2} сложным образом зависят от дозы бомбардирующих ионов. Для ионов Ne²² и Xe¹³⁶ наблюдается тенденция к насыщению величины n_{F_1} , а для ионов Ag (46.3 МэВ) зависимость $n_{F_1}(D)$, где D — доза облучения, переходит через максимум.

Рис. 1. Зависимость оптической плотности в максимуме полос поглощения LiF, облученного тяжелыми ионами, от дозы облучения.

1 — Ne (112.5), 2 — Ne (26.9), 3 — Ag (225), 4 — Ag (46.3), 5 — Xe (118). В скобках указана энергия частиц в МэВ.

Количество F -центров можно оценить из спектров поглощения с помощью уравнения Смакулы [5]

$$fn_F = 1.31 \cdot 10^{17} \mu_{\max} H n / (n^2 + 2)^2 \text{ см}^{-3},$$

f — сила осциллятора (из экспериментальных данных для ЩГК принимают $f=0.7 \div 0.8$); n — коэффициент преломления; H — ширина полосы поглощения в максимуме F -полосы на середине ее высоты; μ_{\max} — коэффициент поглощения в максимуме F -полосы; $\mu_{\max} = 2.302 d_0/x_p$, где x_p — толщина облученного слоя кристалла, равная проективному пробегу ионов. Оценки показывают, что концентрации центров окраски в интервале флюенсов ионов $5 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ составляют $5 \cdot 10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что значительно больше концентраций дефектов, образованных по каналу упругого рассеяния.

В табл. 1 приведены полные потери энергии ионов на ионизацию S_E , упругое рассеяние S_N , проективные пробеги R_p , определенные с помощью программы E-DEP-1 (версия 1985 г.) [6] и на основе метода, предложенного в работах [7, 8].

Таблица 1

Ион	Энергия, МэВ	S_E , МэВ	S_N , МэВ	R_p , мкм
Ne ²⁰	112.5	112.36	0.14	59.39
Ne ²²	26.9	26.78	0.12	10.49
Ar ⁴⁰	225	224.58	0.42	52.6
	46.3	45.94	0.36	8.75
Xe ¹³⁶	118	116.3	1.70	13.39

Считая, что процессы образования вакансий определяются энергией ионов, расходуемой на возбуждение электронной подсистемы, и исходя из характерной величины необходимой для этого энергии (3—5 эВ), можно получить, что за счет таких процессов образуется 10^{18} — 10^{19} точечных дефектов (в см³) для указанного выше диапазона флюенсов ионов. Это согласуется с ранее выполненными оценками и подтверждает определяющую роль ионизационных потерь энергии в образовании центров окраски.

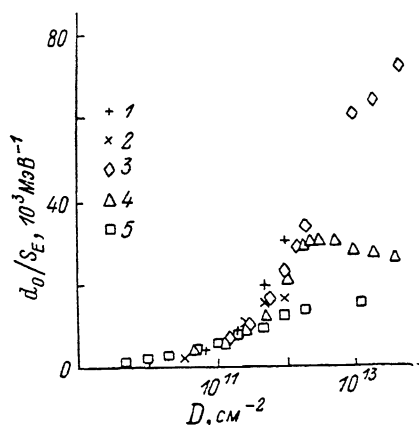


Рис. 2. Зависимость оптической плотности для F_1 -центров, нормированной на величину полных ионизационных потерь энергии, от дозы облучения. 1 — Ne (112.5), 2 — Ar (225), 3 — Ne (26.9), 4 — Ar (46.3), 5 — Xe (118).

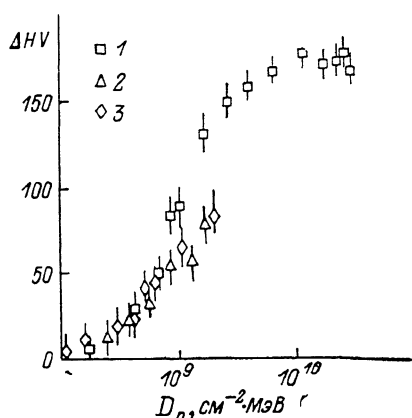


Рис. 3. Зависимость радиационного упрочнения LiF, облученного ионами Xe (1), Ar (46.3 МэВ) (2), Ne²² (26.9 МэВ) (3), от дозы повреждений.

На рис. 2 приведены значения оптической плотности для F_1 -центров, нормированные на величину S_E , в зависимости от дозы облучения. Видно, что в области доз до 10^{12} см⁻² значения нормированной оптической плотности примерно равны для всех ионов. При более высоких дозах, выше некоторой «пороговой», наблюдаются существенные различия в ходе дозовых зависимостей. При этом величина d_0/S_E тем больше, чем меньше масса и энергия бомбардирующих ионов.

Наличие «пороговой» дозы и зависимость концентрации точечных дефектов от массы и энергии ионов могут быть объяснены усилением процессов радиационного и термического отжига точечных дефектов и их скоплений в результате перекрытия треков тяжелых ионов, начиная с некоторой дозы облучения. Известно, что в треках высокоэнергетичных многозарядных ионов возникают локальные перегревы, приводящие к генерации термоупругих напряжений, которые, по приближенным оценкам, могут превышать прочность материала и в комбинации с перегревами могут существенно влиять на процессы дефектообразования [9].

Следовательно, рекомбинация точечных дефектов должна характеризоваться величиной удельных ионизационных потерь энергии и быть

максимальной для ионов Хе, что и наблюдается в нашем случае. Отметим, что оценка радиуса трека, исходя из дозы 10^{12} см⁻², дает разумную величину $3 \cdot 10^{-6}$ см.

Экспериментально аномальная зависимость радиационной повреждаемости от атомного номера ионов была обнаружена в работе [10], в которой методом эффекта теней изучалось образование радиационных дефектов в монокристалле германия, облучаемого ионами Хе (121 МэВ) и Аг (24 МэВ). Было установлено, что повреждающая способность ионов Хе почти в 10 раз меньше, чем ионов Аг. Этот результат авторы [10] объясняют включением нового механизма взаимодействия ионов с монокристаллической средой, состоящего в плавлении микроскопической области кристалла вдоль трека и последующей ее рекристаллизации при облучении ионами Хе, что может иметь место также для кристаллов LiF.

Рассмотрим теперь результаты измерений механических свойств кристаллов LiF, облученных тяжелыми ионами. Как и после воздействия других видов облучения, например нейтронов и легких ионов [3], микротвердость LiF монотонно возрастает с дозой облучения, выходя на насыщение в области больших значений доз. При одинаковых дозах облучения наибольший эффект радиационного упрочнения наблюдается для ионов Хе и наименьший для ионов Не, что характерно также и в случае облучения металлов [11]. Как известно, подобная зависимость для металлов объясняется различием в величине энергии, передаваемой при упругом рассеянии ионов. Поэтому на рис. 3 изменение микротвердости представлено как функция величины D_n , равной DS_n , где S_n — энергия, теряемая одним ионом на упругие столкновения на входе в мишень (использование общепринятых единиц повреждающей дозы — смещений на атом — в данном случае затруднено тем, что неизвестны пороговые энергии образования смещений для компонентов кристалла). Как видно из рис. 2, в пределах точности измерений микротвердости и дозы облучения степень радиационного упрочнения практически одинакова для всех ионов при равных дозах повреждений. Построение зависимости $\Delta HV(DS_n)$ не приводит к аналогичному результату. Это говорит о том, что изменение механических свойств LiF обусловлено в основном радиационными дефектами, образующимися в результате упругих столкновений ионов с атомами кристалла. Для сравнения ядерные и электронные удельные потери энергии на входе в мишень, где измерялась микротвердость, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ион	Энергия, МэВ	S_n , МэВ/мкм	S_e , МэВ/мкм
Хе ¹³⁶	118	0.025	10.7
Аг ⁴⁰	46.3	0.00364	7.8
Не ²²	26.9	0.0011	6.1

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. На примере исследований кристаллов LiF, облученных высокоэнергетичными тяжелыми ионами Хе, Аг, Не, оценено относительное влияние ионизационных и ядерных потерь энергии на дефектообразование в монокристаллах ЦГК.

2. Исследована кинетика накопления F_1 - и F_2 -центров с дозой облучения. Показано, что концентрация точечных дефектов определяется полными потерями энергии на ионизацию. Значительные отличия в концентрациях центров окраски для различных ионов, начиная с некоторой дозы облучения, объясняются перекрытием треков частиц при больших дозах.

3. Показано, что изменение механических свойств облученных кристаллов LiF (увеличение микротвердости с дозой облучения) связано в основном с потерями энергии на упругие соударения с атомами кристалла, хотя относительная доля потерь энергии ионами по этому каналу составляет менее 1 %.

Список литературы

- [1] Ziegler J. F. // Nucl. Ins. and Meth. 1985. V. B6. P. 270—282.
- [2] Лущик Ч. Б., Витол Н. К., Элонго М. А. // УФН. 1977. Т. 122. № 2. С. 223—251.
- [3] Ботаки А. А., Воробьев А. А., Ульянов В. Л. Радиационная физика ионных кристаллов. М.: Атомиздат, 1980. С. 207.
- [4] Флеров Г. Н. и др. // Тр. IX Всес. совещ. по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1985. Т. 2. С. 86—90.
- [5] Воробьев А. А., Центры окраски в ЩГК кристаллах. Книга II. Томск: Изд-во ТГУ, 1968. С. 390.
- [6] Davisson S. M., Manning I. // Comp. Phys. Comm. 1986. V. 42. P. 137—147.
- [7] Бардош Д., Гавриленко Г. М. // Препринт ОИЯИ P17-84-371. Дубна, 1984.
- [8] Бардош Д. // Сообщение ОИЯИ P17-84-754. Дубна, 1984.
- [9] Давыдов А. А., Калининченко А. И. // ВАНТ, сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 1985. В. 3 (36). С. 27—30.
- [10] Карамьян С. А., Рыхлюк А. В., Бугров В. Н. // Кр. сообщ. ОИЯИ. 1987. № 5 [25]. С. 18—24.
- [11] Дидык А. Ю. и др. // Препринт ОИЯИ 14-86-4. Дубна, 1986.

Объединенный институт
ядерных исследований
Дубна

Поступило в Редакцию
2 августа 1988 г.
В окончательной редакции
28 декабря 1988 г.