

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 539.12.04:549.541

А.Т.Акилбеков, А.К.Даулетбекова, А.В.Русакова,
М.В.Здоровец, М.Ж.Байжуманов, Ш.К.Шарипова

Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана;
(E-mail: alma_dauletbek@mail.ru)

Радиационные дефекты в кристаллах LiF, облученных ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$ с энергией 150 МэВ

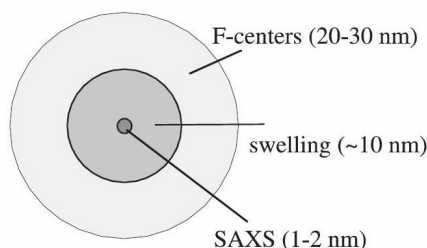
В статье показано, что центры окраски образуют структуру дефектов, которые изучаются в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$ ($E = 150$ МэВ) при комнатной температуре с током в пучке, равном 10 нА/см^2 , и флюенсом от 10^{11} до 10^{14} ион/см² на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Астана, Казахстан). Отмечено, что при флюенсе облучения 10^{11} ион/см² с использованием растрового микроскопа наблюдали вытравленные ионные треки; при облучении выше данного флюенса также наблюдали некоторые структурные модификации в облученном слое, которые проявлялись в наличии дислокаций и наноразмерных зерен. Определено, что роль флюенса в возникновении электронных центров окраски и структурных неоднородностей до сих пор до конца не выяснена.

Ключевые слова: радиационные дефекты, кристаллы, ионы, облучение, ускоритель тяжелых ионов, дислокации.

Введение

Кристаллы LiF имеют ионную связь и простую кубическую решетку типа NaCl. Электронная структура хорошо изучена ($E_g = 14,6$ эВ; анионный экситон 13,6 эВ; катионный экситон ~ 62 эВ). В этом кристалле радиационные дефекты создаются по экситонному механизму, в том числе при возбуждении тяжелыми ионами [1, 2].

При возбуждении тяжелыми ионами образование центров окраски (ЦО) имеет ряд особенностей. Передача энергии от быстрого тяжелого иона (БТИ) в LiF и других щелочно-галогидных кристаллах (ЩГК) происходит в основном путем ионизации за время $\sim 10^{-14}$ сек, что на порядок меньше образования френкелевских пар (F–H-центров). Упругие потери энергии в кристаллах LiF и других ЩГК играют второстепенную роль и имеют место в основном в конце трека. Поглощенная энергия вокруг иона имеет сильный градиент, зависящий от радиуса трека (r^{-2}), в результате чего дефектная структура в центре («core region») сильно отличается от периферии («halo region») (рис. 1) [3].



1 — центральная область трека; 2 — область расширения объема; 3 — область с F-центрами

Рисунок 1. Разные дефектные области ионного трека в кристаллах LiF

Дефектная область центральной части трека («core»), увеличенный объем («swelling») и область («haloregion») с центрами окраски зависят от типа иона и его линейных потерь энергии. Дефектная область в центре («core») образуется только для ионов с $dE/dx \geq 10$ кэВ/нм; увеличенный объем («swelling») образуется при облучении ионами с $dE/dx \geq 6$ кэВ/нм; и для области «halo» нет порога по dE/dx .

В диэлектриках под действием БТИ возникают различные радиационные дефекты: от точечных до агрегатов и фазовых переходов [1]. В кристаллах LiF, в зависимости от градиента энергии иона (dE/dx) и поглощенной энергии (флюенса, Φ), возникают различные ЦО, их агрегаты и продукты радиолитического распада (коллоиды лития; молекулы фтора X_2 и их скопления nX_2) [4]. Исследование природы радиационных повреждений требует использования различных методов анализа: оптической спектроскопии, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии и др.

Образование кристаллитов на поверхности ЦГК при воздействии рентгеновскими или ультрафиолетовыми (УФ) лучами выявлено давно [5, 6]. В кристаллах LiF при облучении нейтронами наблюдали продукты радиолитического распада (коллоиды лития и скопления молекул фтора). Даже при облучении электронами или рентгеновскими лучами при температуре 5 К Хоббс наблюдал дислокационные петли в ЦГК [5–9].

В кристаллах LiF под воздействием облучения БТИ при комнатной температуре и в большом флюенсе 10^{12} – 10^{13} ион/см² методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) не обнаружены коллоиды лития, хотя были выявлены дефектные области методом малоуглового рассеяния рентгеновского излучения (SAXS) [10] и по увеличению объема («swelling») [3]. По-видимому, морфология дефектной структуры трека (малый радиус центральной части и сильный градиент поглощенной энергии) не позволяет образовываться крупным коллоидам лития. Коллоиды лития были обнаружены только в процессе отжига [10].

Методом химического травления [11–13] в облученных кристаллах LiF были выявлены сильный эффект механического напряжения ($\sigma \sim 5$ ГПа) и образование дислокаций за пределами пробега ионов (R) [14, 15].

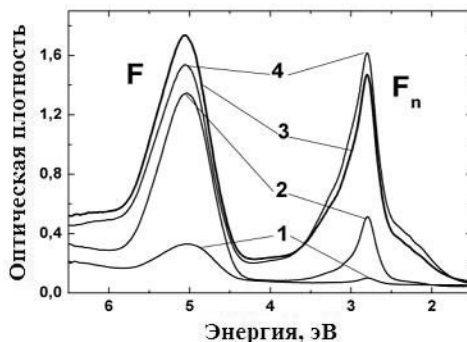
Совсем недавно в работах И.Маника и Я.Маникс [14–16] были показаны нанокристаллиты и призматические дислокации в кристаллах LiF, облученных различными тяжелыми ионами. Фрагментация кристаллов с формированием нанокристаллитов была обнаружена как на поверхности облученных кристаллов, так и на поперечных сколах вдоль направления ионного трека. Наноструктурирование и образование призматических дислокаций зависят как от электронных потерь энергии ионов (dE/dx), так и от флюенса (т.е. поглощенной энергии). Например, в кристаллах LiF, облученных ионами ^{12}C ($E_{\text{ion}} = 130$ МэВ; $\langle dE/dx \rangle = 0,5$ кэВ/нм), были обнаружены только дислокации, тогда как при облучении ионами ^{197}Au ($E_{\text{ion}} = 13$ МэВ; $\langle dE/dx \rangle = 4,2$ кэВ/нм) обнаружены нанокристаллиты. Эти результаты явно показывают влияние флякса (ион/см²·с) на образование наноструктур. По-видимому, порог dE/dx для образования нанодефектов зависит как от флюенса, так и от флякса частиц.

Таким образом, в работе исследовано влияние флюенса на образование наноструктур в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами криптона.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве основных материалов для исследования использовались кристаллы LiF, выращенные в вакууме из расплава (Оптический институт ГОИ, Санкт-Петербург, Россия). Толщина образцов находилась в пределах 1 мм, площадь облучения составляла 10×10 мм². Облучение проводили на ускорителе ДЦ-60 (г. Астана, Казахстан) высокоэнергетическими тяжелыми ионами криптона $^{84}\text{Kr}^{+14}$ (длина пробега $R = 17,5$ мкм) с энергией 150 МэВ и током в пучке 10 нА/см² (флякс $\phi = 4,46 \cdot 10^9$ ион/см²·с). Облучение проводили при комнатной температуре, флюенс составлял 10^{11} – 10^{14} ион/см².

Для измерения спектров поглощения (определения концентрации F- и F_n-центров окраски) использовали спектрофотометр УФ-ВИС с длиной волны в диапазоне от 190 до 900 нм (1,4–6,5 эВ). Спектры поглощения, измеренные для различных флюенсов, представлены на рисунке 2.



$E = 150$ МэВ; флякс $4,46 \times 10^9$ ион/см²·с; флюенсы: 1 — 10^{11} ; 2 — 10^{12} ; 3 — 10^{13} ; 4 — 10^{14} ион/см²

Рисунок 2. Спектры поглощения в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$

При флюенсе облучения 10^{11} ион/см² спектры показывают только поглощение F- и F₂-центров, тогда как при флюенсе 10^{12} ион/см², кроме поглощения F₂-центров, появляются и новые комплексные F₃- и F₄-центры окраски. Концентрация F-центров может быть оценена с использованием формулы Смакулы [17]

$$n_F [\text{см}^{-2}] = 9,48 \times 10^{15} D_{opt}(F), \quad (1)$$

где $D_{opt}(F)$ — оптическая плотность в максимуме поглощения F-центров (см. табл.)

Т а б л и ц а

Параметры центров окраски в зависимости от флюенса

Φ , ион/см ²	$d_{\text{ион}}$, нм	$n_F \times 10^{16}$, см ⁻²	$N_F \times 10^{18}$, см ⁻³	d_{F-F} , нм	A_{F_n} , ед. изм.
10^{11}	36	0,31	1,78	8,0	0,44
10^{12}	11	1,28	7,29	5,2	2,27
10^{13}	3,5	1,64	9,40	4,7	6,50
10^{14}	1	1,46	8,32	4,9	7,14

Концентрация F-центров N_F (см⁻³) может быть вычислена как $N_F = n_F/R$, где R — радиус повреждения, а n_F — концентрация F-центров (см⁻²). Расстояние между ионными возбуждениями определяется следующим уравнением:

$$d_{\text{ион}} = 2(1/\pi\Phi)^{1/2}.$$

Среднее расстояние между F-центрами вычисляется по формуле

$$d_{F-F} = (1/N_F)^{1/3}.$$

Концентрация всех F_n-центров может быть вычислена из интеграла поглощения (A_{F_n}) в диапазоне поглощенных энергий от 1,5 до 4,2 эВ [4]. Результаты оптической спектроскопии представлены на рисунке 2 и в таблице. Насыщение F-центров происходит при флюенсе 10^{13} ион/см², когда объемная концентрация F_n-центров $N_F \sim 10^{19}$ см⁻³ (рис. 2). Используем радиус «halo» 6 нм, радиус «core» 1 нм. При таком флюенсе имеется сильное взаимодействие между соседними треками, их перекрытие (рис. 3).

Расстояние от границы ионной бомбардировки есть среднее расстояние между F-центрами ($d_{\text{ион}} \sim d_{F-F} = 4,7$ нм, табл.). Как результат, концентрация единичных F-центров уменьшается, а количество агрегатов возрастает $F+F \rightarrow F_2$, $F+F_2 \rightarrow F_3$. Данные результаты хорошо согласуются с известными ранее [17, 18]. При флюенсе 10^{12} – 10^{13} ион/см² в большом количестве образуются F_n-центры окраски, что выражается в увеличении площади под кривой A_{F_n} (табл.).

С увеличением флюенса 10^{13} – 10^{14} ион/см² ($d_{\text{ион}} \approx d_{F-F}$) происходит взаимодействие электронных и дырочных центров окраски (формирование агрегатов или их рекомбинация), как только образуются структурные повреждения [19].

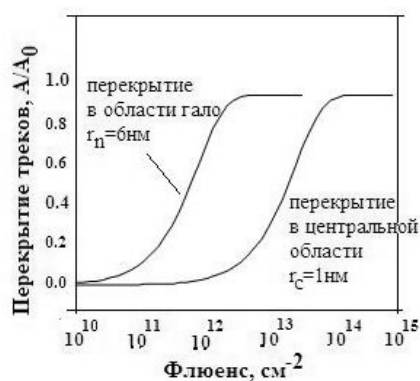
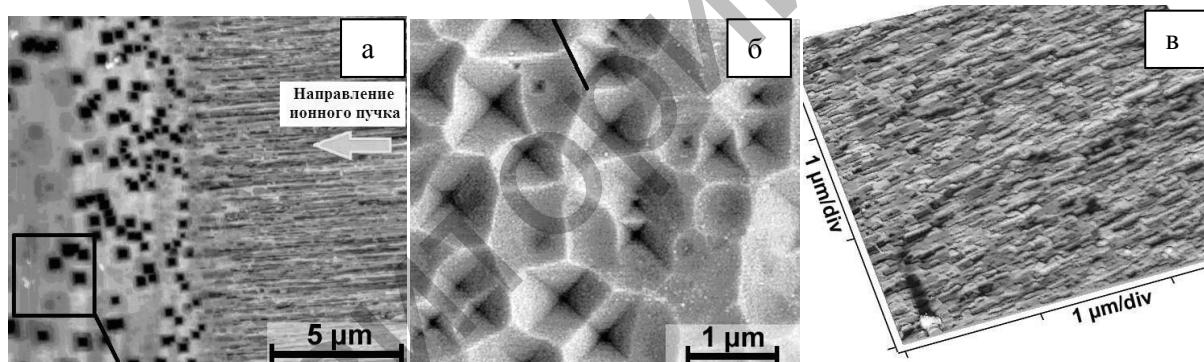


Рисунок 3. Расчет трещиновых перекрытий области гало и сердцевин в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$

Изучение структуры

Структурные дефекты в облученных кристаллах выявляются в результате селективного химического травления в насыщенном растворе FeCl_3 . Топография поверхности облученных и протравленных образцов была изучена с использованием растрового электронного микроскопа JSM-7500F (JEOL) и атомно-силового микроскопа СРП (Veeco). Изучение структурных образований в облученной зоне проводили на сколах исследуемых протравленных образцов (cross-sections). Скол делали по нормали (направление (100)) к поверхности образца. Общий вид облученной поверхности показан на рисунке 4а.



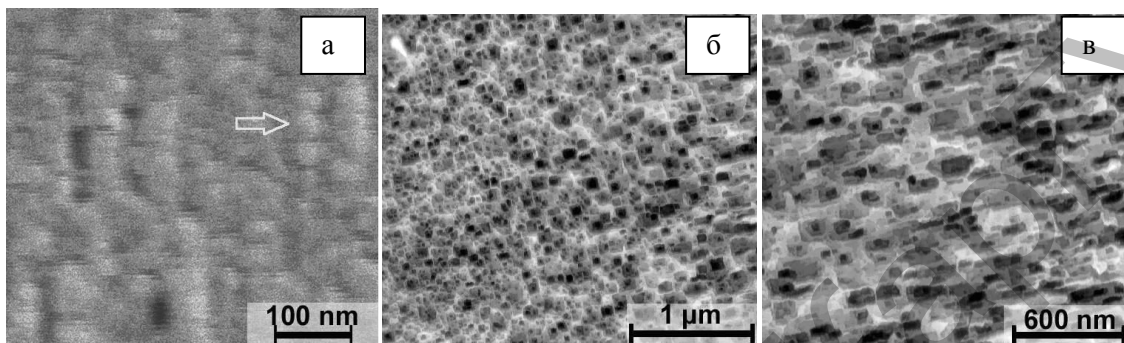
а — общий вид (АСМ-изображение); б — зона, богатая дислокациями; в — наноструктурированная зона; облучение проведено до флюенса 10^{12} ион/см 2 (а, в); 10^{13} ион/см 2 (б)

Рисунок 4. Внешний вид скола образцов кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$

Наиболее значимые изменения наблюдаются в структуре, формирующейся на глубине до 17,5 мкм (совпадает с глубиной проникновения ионов). Две зоны представляют собой различные типы структур: (1) наноструктурированная зона, состоящая из маленьких столбиков нанозерен, и (2) зона, богатая призматическими дислокациями (ямками травления). Между наноструктурированной областью и зоной, богатой дислокациями, находится некий переходной слой толщиной порядка 2 мкм. При увеличении в микроскопе границы нанозерен имеют диаметр 30–50 нм (рис. 4в и 5а), а также содержат небольшое количество дислокаций (рис. 5в), наблюдающихся в наноструктурированной зоне.

На рисунках 4б и 5б детально показана зона, богатая дислокациями. Плотность дислокаций в этой зоне увеличивается с увеличением флюенса. Также наблюдается расширение промежуточной зоны с увеличением флюенса. При самом большом флюенсе облучения (10^{14} ион/см 2) средняя плотность дислокационных ямок травления составляет порядка $5 \cdot 10^9$ см $^{-2}$. Как известно, призматические дислокационные петли формируются в щелочно-галлоидных кристаллах через взаимодействие агрегатов или вакансий, которые образуются в процессе облучения. Дислокационные петли, образовавшие-

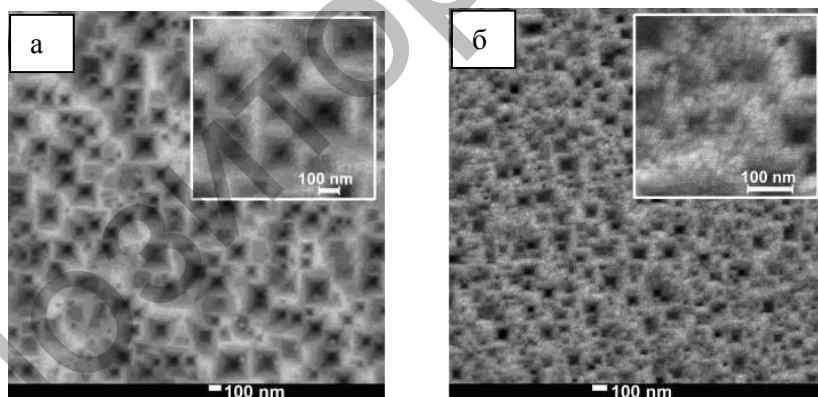
ся в процессе облучения, ранее наблюдали с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) в работе [6]. В процессе облучения призматические дислокации межузельного типа внедрения доминируют и являются основными при комнатной температуре облучения. Мы сравнивали результаты структурных неоднородностей вдоль падения ионного пучка и рассчитывали энергию падения ионов. При облучении высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$ с энергиями 150 МэВ доминируют электронные потери энергии. Результаты показывают образование наноструктур на глубине, равной глубине электронных потерь энергии при потерях энергии выше, чем 10 кэВ/нм. В конце траектории трека, где снижается энергия налетающего иона, наблюдается зона, богатая дислокациями.



a — вид наноструктурированной области с высоким увеличением; видны нанозерна;
б — скопление дислокаций в конце пробега иона;
в — дислокационные ямки травления в наноструктурированной области

Рисунок 5. Внешний вид скола образцов кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$

Изучение структуры проводили не только на сколах, но и на облученной поверхности образцов (рис. 6). После облучения на поверхности наблюдали многочисленные пирамидальные ямки травления, которые типичны для ионных треков или дислокаций [13].



Энергия ионов 150 МэВ, флюенс: *a* — 10^{11} ион/см²; *б* — 10^{13} ион/см²

Рисунок 6. РЭМ-изображение поверхности кристалла LiF, облученного высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$

Однако плотность ямок травления уменьшается с увеличением флюенса. Этот эффект может быть объяснен перекрытием части треков с увеличением флюенса падения ионов. При флюенсе 10^{12} – 10^{14} ион/см² на облученной поверхности наблюдаются малые границы зерен (несколько десятков нм), которые указывают на ионно-индуцируемую наноструктуаризацию (рис. 4в). При облучении флюенсом 10^{11} ион/см² на поверхности облученных образцов наноструктур не наблюдается. Полученные результаты позволяют нам заключить, что наноструктуры наблюдаются при облучении флюенсом выше, чем 10^{11} ион/см². В работе [20] были проанализированы типы наноструктур, формирующиеся под влиянием быстрых тяжелых ионов методами анализа карт обратного пространства. В наноструктурах были найдены углы наклона зерен, а также межплоскостные расстояния. Предпо-

лагается, что призматические дислокации влияют на межплоскостные расстояния нанозерен. В работе также была оценена роль малоугловых дислокаций в формировании наноструктур мозаичного типа. Фрагментацию и уменьшение размеров связанных доменов наблюдали с использованием дифракционного анализа электронов в работе [21], при облучении кристаллов LiF потоками нейтронов. Роль дислокационных процессов в ионно-индуцированной дислокационной зоне является значительной. Главными факторами образования внутренне сгруппированных ионных фрагментаций являются ионно-индуцируемые внутренние напряжения [22] и дефекты (ионные треки и дислокации), которые имеют локальные поля напряжений и определяют межплоскостные расстояния кристаллов. При флюенсе облучения выше 10^{13} ион/см² идет перекрытие областей «halo» и в треках возникают области «core» (рис. 3), которые облегчают процессы агрегации.

При появлении внутренних напряжений дислокации выстраиваются в определенном направлении и начинают образовываться границы зерен, происходит главный шаг в формировании наноструктур.

Заключение

В данной работе было рассмотрено образование наноструктур в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$ с энергией 150 МэВ. Установлено, что наноструктуры в кристаллах LiF состоят из нанозерен размером 30–50 нм. Полученные результаты показывают, что наноструктуры появляются при высоком флюенсе облучения, когда идет насыщение F-центров (объемная концентрация 10^9 см⁻³), и наблюдаются только в зонах, где потери энергии превышают пороговые значения (>10 кэВ/нм). Определение порогового значения флюенса находится между 10^{11} см⁻² и 10^{12} см⁻². Структурные изменения, происходившие в результате облучения высокоэнергетическими ионами $^{84}\text{Kr}^{+14}$, наблюдаются во всех поврежденных слоях.

Список литературы

- 1 Schwartz K., Trautmann C., Neumann R. Electronic excitations and heavy-ion-induced processes in ionic crystals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2003. — Vol. 209. — P. 73–84.
- 2 Луцук Ч.Б., Битол И.К., Элэнго М.А. Распад электронных возбуждений на радиационные дефекты в ионных кристаллах // Успехи физических наук. — 1977. — Vol. 122. — С. 223–251.
- 3 Trautmann C., Schwartz K. et al. Radiation defects in LiF crystals induced by heavy ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 1998. — Vol. 146. — P. 367–378.
- 4 Schwartz K., Sorokin M.V. et al. Color center creation in LiF crystals irradiated with 5- and 10-MeV Au ion // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2008. — Vol. 266. — P. 2736–2740.
- 5 Hobbs L.W. Transmission Electron Microscopy of Defects in Alkali Halides // Journal De Physique: Colloque C. — 1973. — Supplément au n° 11–12, Vol. 34. — P. 227.
- 6 Kawamata Y. The formation of dislocation loops and the outgrowth of crystallites by electron irradiation of thin alkali halide foils // Journal De Physique: Colloque C. — 1976. — Supplément au n° 12, Vol. 37. — P. 7–502.
- 7 Hobbs L.W. Transmission electron microscopy of defect aggregates in non-metallic crystalline solids // Defects and their structure in nonmetallic solids / Ed. B.Henderson and A+E. A.E.Hughes. — N.Y.: Plenum Press, 1976. — 481 p.
- 8 Hobbs L.W. et al. Direct observation of alkali metal colloids in alkali halide crystals // Nature. — 1974. — Vol. 252, No. 5482. — P. 383–385.
- 9 Hobbs L.W. et al. A study of interstitial clusters in irradiated alkali halides using direct electron microscopy // Proc. Roy. Soc. London A332. — 1973. — No. 1598. — P. 167–185.
- 10 Schwartz K., Volkov A., Sorokin M. et al. Effect of irradiation parameters on defect aggregation during thermal annealing of LiF irradiated with swift ions and electrons // Physical Review B. — 2010. — Vol. 82. — P. 144–116.
- 11 Gilman J.J., Johnston W.G. Dislocations, Point-Defect Clusters, and Cavities in Neutron Irradiated LiF Crystals // Journal of Applied Physics. — 1958. — Vol. 29. — P. 877–888.
- 12 Young D.A. Etching of radiation damage in lithium fluoride // Nature. — 1958. — Vol. 182. — P. 375–377.
- 13 Trautmann C., Schwartz K., Geiss O. Chemical etching of ion tracks in LiF crystals // Journal of Applied Physics. — 1998. — Vol. 83. — P. 3560–3564.
- 14 Manika I., Maniks J. et al. Hardening and long-range stress formation in LiF induced by energetic ions // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. — 2003. — Vol. 209. — P. 93–97.
- 15 Manika I. et al. Swift-ion-induced hardening and reduction of dislocation mobility in LiF crystals // Journal of Physics D: Applied Physics — IOP science. — 2008. — Vol. 41. — 074008 (5).
- 16 Maniks J., Manika I. et al. Nanostructuring and hardening of LiF crystals irradiated with 3–15 MeV Au ions // Applied Physics A: Materials Science and Processing. — 2011. — Vol. 104. — P. 1121–1128.
- 17 Perez A., Balanzat E., Dural J. Swelling of insulators induced by swift heavy ions // Physical Review B. — 1990. — Vol. 41. — P. 3943.

18 Schwartz K., Trautmann C., El-Said A.S., Neumann R. Color center creation in LiF under irradiation with swift heavy ions: Dependence on energy low and fluence // *Physical Review B*. — 2004. — Vol. 70. — 184104.

19 Dauletbekova A., Maniks J., Manika I., Zabels R., Aklibekov A.T., Zdorovets M.V., Bikert Y.V., Schwartz K. Color centers and nanodefects in LiF crystals irradiated with 150 MeV Kr ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. doi: 10.1016/j.nimb.2011.12.030.

20 Maniks J., Manika I., Zabels R., Grants R., Tamanis E., Schwartz K. Nanostructuring and strengthening of LiF crystals by swift heavy ions: AFM, XRD and nanoindentation study // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. — 2012. — Vol. 282(1). — P. 81–84.

21 Kubo K., Hamaguchi Y., Motohashi H. X-ray study on the radiation damage in LiF crystals // *Journal of the Physical Society of Japan*. — 1964. — Vol. 19. — P. 1105–1109.

22 Kumar M., Singh F., Khan S.A., Tripathi A., Avasthi D.K., Pandey A.C. Studies of swift heavy ion induced color centres in LiF thin films deposited on silica substrates // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2006. — Vol. 39, No. 14. — P. 2935–2940.

А.Т.Ақылбеков, А.Қ.Даулетбекова, А.В.Русакова,
М.В.Здоровец, М.Ж.Байжұманов, Ш.Қ.Шәріпова

Энергиясы 150 МэВ $^{84}\text{Kr}^{+14}$ иондарымен сәулеленген LiF кристалдарындағы радиациялық ақаулар

Мақалада бөлме температурасында шоқтағы тоғы 10 нА/см^2 және флюенсі $10^{11}–10^{14}$ ион/см² болатын жоғары энергиялы $^{84}\text{Kr}^{+14}$ ($E = 150 \text{ МэВ}$) иондарымен сәулелендірілген кезде LiF кристалдарында туындайтын бояу орталықтары түзетін ақаулар жүйесі зерттелді. Сәулелендіру ДЦ-60 ауыр иондар үдеткішінде (Астана, Қазақстан) жүргізілді. 10^{11} ион/см² флюенспен сәулелендірілген кристалды растрлі микроскоппен қарағанда ионды тректер, ал бұл көрсеткіштен жоғары флюенспен сәулелендіргенде ақаулардың дислокациялары мен наноөлшемді дәндер түріндегі құрылымдық модификациялары байқалды. Электронды ақаулар мен құрылымдық әркелжіліктердің пайда болуындағы флюенстің рөлі әлі де болса толық анықталған жоқ.

А.Т.Акилбеков, А.К.Даулетбекова, А.В.Русакова,
М.В.Здоровец, М.Ж.Байжұманов, Ш.К.Шарипова

Radiation defects in crystals LiF induced by 150 MeV $^{84}\text{Kr}^{+14}$ ions

Color centers and evolution of structure defects were investigated in LiF crystals irradiated at room temperature with 150 MeV $^{84}\text{Kr}^{+14}$ ions with a beam current of 10 нА/см^2 in the fluence range $10^{11}–10^{14}$ ions/cm² at the cyclotron accelerator DC-60 (Astana, Kazakhstan). At the fluence of 10^{11} ion/cm² SEM imaging revealed mainly formation of etchable ion tracks. Above this fluence, severe structural modifications in the irradiated layer were observed which include the ion-induced formation of dislocations and grains with nano-scale dimensions. The role of fluence in the concentration of electronic color centers and structural modifications is discussed.

References

- 1 Schwartz K., Trautmann C., Neumann R. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2003, 209, p. 73–84.
- 2 Lushik Ch.B., Bitol I.K., Elango M.A. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1977, 122, p. 223–251.
- 3 Trautmann C., Schwartz K. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1998, 146, p. 367–378.
- 4 Schwartz K., Sorokin M.V. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2008, 266, p. 2736–2740.
- 5 Hobbs L.W. *Journal De Physique: Colloque C*, 1973, 11–12, 34, p. 227.
- 6 Kawamata Y. *The Journal De Physique: Colloque C*, 1976, 12, 37, p. 7–502.
- 7 Hobbs L.W. *Defects and their structure in nonmetallic solids*, Ed. B.Henderson and A+E. A.E.Hughes, N.Y.: Plenum Press, 1976, 481 p.
- 8 Hobbs L.W. *Nature*, 1974, 252, 5482, p. 383–385.
- 9 Hobbs L.W. *Proc. Roy. Soc. London A332*, 1973, 1598, p. 167–185.
- 10 Schwartz K., Volkov A., Sorokin M. *Physical Review B*, 2010, 82, p. 144–116.
- 11 Gilman J.J., Johnston W.G. *Journal of Applied Physics*, 1958, 29, p. 877–888.
- 12 Young D.A. *Nature*, 1958, 182, p. 375–377.
- 13 Trautmann C., Schwartz K., Geiss O. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83, p. 3560–3564.

- 14 Manika I., Maniks J. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2003, 209, p. 93–97.
- 15 Manika I. *Journal of Physics D: Applied Physics — IOP science*, 2008, 41, 074008 (5).
- 16 Maniks J., Manika I. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2011, 104, p. 1121–1128.
- 17 Perez A., Balanzat E., Dural J. *Physical Review B*, 1990, 41, p. 3943.
- 18 Schwartz K., Trautmann C. *Physical Review B*, 2004, 70, 184104.
- 19 Dauletbekova A., Maniks J., Manika I., Zabels R., Aklibekov A.T., Zdorovets M.V., Bikert Y.V., Schwartz K. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. doi:10.1016/j.nimb.2011.12.030.
- 20 Maniks J., Manika I., Zabels R., Grants R., Tamanis E., Schwartz K. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2012, 282(1), p. 81–84.
- 21 Kubo K., Hamaguchi Y., Motohashi H. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1964, 19, p. 1105–1109.
- 22 Kumar M., Singh F., Khan S.A., Tripathi A., Avasthi D.K., Pandey A.C. *Studies Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39, 14, p. 2935–2940.

Сведения об авторах

Акилбеков Абдираш Тасанович — декан физико-технического факультета доктор физико-математических наук, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана.

Даулетбекова Алма Кабденовна — кандидат физико-математических наук, доцент, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана.

Русакова Алёна Викторовна — докторант PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана.

Здоровец Максим Владимирович —руководитель Астанинского филиала Института ядерной физики НЯЦ РК кандидат физико-математических наук, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана.

Байжуманов Муратбек Жанатович — докторант PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана.

Шарипова Шамкен Кайратовна — магистрант, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана.

Information about authors

Akilbekov Abdirash Tasanovich — Dean of Physical-Technical faculty, Doctor of physical-mathematical sciences, Professor, Eurasian National University named after L.N.Gumilev, Astana.

Dauletbekova Alma Kabdenovna — Candidate of physical-mathematical sciences, Docent, Eurasian National University named after L.N.Gumilev, Astana.

Rusakova Alena Viktorovna — PhD doctorate, Eurasian National University named after L.N.Gumilev, Astana.

Zdorovets Maxim Vladimirovich — Candidate of physical-mathematical sciences, Head of Astana branch of the Institute of nuclear physics NNC, Eurasian National University named after L.N.Gumilev, Astana.

Baizhumanov Muratbek Zhanatovich — PhD doctorate, Eurasian National University named after L.N.Gumilev, Astana.

Sharipova Shamken Kairatovna — Undergraduate, Eurasian National University named after L.N.Gumilev, Astana.