

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.039.54:539.3719

А.Т.Акилбеков¹, А.К.Даулетбекова¹, А.В.Русакова¹, Ф.У.Абуова¹,
Е.В.Бихерт¹, З.Т.Уматова¹, М.В.Здоровец²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана;
²Институт ядерной физики Национального ядерного центра РК, Астана
(E-mail: arussakova@gmail.com)

Центры окраски и нанодфекты в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr с энергией 150 МэВ

Изучены изменения структуры, оптические и наномеханические свойства кристаллов LiF после облучения ионами криптона с энергией 150 МэВ и флюенсом 6×10^{12} ион/см² с помощью оптической абсорбционной, сканирующей электронной, атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования. Отмечено, что при оптической спектроскопии происходит насыщение F-центров и образование сравнительно большого числа F_n-центров. Определено, что изображения, сделанные с использованием АСМ и РЭМ, показывают наличие наноструктурированных областей столбчатых кристаллитов (размером 30–90 нм). Наноструктурирование происходит на глубине до 10 мкм, где потери энергии иона превышают критический порог (около 10 кэВ/нм); при увеличении потерь энергии зоны, обогащенной дислокациями, не наблюдается. Доказано, что, структурные изменения сопровождаются существенным увеличением твердости. Были изучены процессы восстановления структуры и свойств кристаллов при отжиге.

Ключевые слова: LiF, облучение, тяжелые ионы, спектры поглощения, наноструктурированная область, АСМ, нанотвердость.

Введение

Облучение быстрыми тяжелыми ионами является перспективным методом для создания наноструктур в твердых телах и тонких пленках. Значительный прогресс был достигнут в создании наноструктур на облученной поверхности. Это так называемые наноразмерные бугорки (hillocks), наноструктуры и нанодфекты, образующиеся на поверхности под влиянием химических травителей и ионного распыления [1, 2]. В широком классе материалов облучение быстрыми ионами приводит к значительным структурным изменениям в объеме. В нанометровом масштабе ионы вызывают различные типы радиационных повреждений, в том числе формирование единичных дефектов и кластеров, скрытых треков, а также образование фазовых переходов, аморфизации поверхности и межфазовые взаимодействия [3–5]. Недавно проведенные исследования показали, что наноструктурирование в объеме твердого тела может быть достигнуто путем облучения высокими дозами, обеспечения насыщения, агрегации и образования радиационных дефектов [6, 7]. Такие исследования проводятся в основном на щелочно-галлоидных кристаллах (ЩГК), которые являются перспективными материалами для разработки объемных наноструктур из-за их высокой устойчивости к аморфизации даже при высокой плотности энергии облучения.

Создание центров окраски в ионных кристаллах под воздействием облучения быстрыми тяжелыми ионами зависит как от энергии ионов, так и от потерь энергии ионов (dE/dx), температуры облучения и флюенса (Φ) [8, 9]. С увеличением плотности энергии при перекрытии ионных треков одиночный F-центр достигает насыщения, и дальнейшее облучение уже не приводит к его росту, а количество комплексных F_n-центров, тем временем, продолжает увеличиваться. Насыщение

F-центров зависит как от энергии налетающих ионов, так и от электронных потерь энергии (dE/dx). При облучении высокоэнергетическими ионами Kr с энергией 150 МэВ это происходит примерно при флюенсе $\Phi \sim 10^{12}$ ион/см², что соответствует объемной концентрации F-центров $N_F \geq 10^{19}$ см⁻³.

Было показано, что создание F-центров сильно зависит от плотности тока (нА/см²) или плотности потока ионного пучка (флякса) (ион/см²·с). При высоких значениях плотности потока ионного пучка увеличивается эффективность создания сложных F_n -центров [10, 11], что приводит к образованию молекулы фтора (nX_2) и в дальнейшем стимулирует образование наноразмерных дефектов [7, 12, 13]. Данный вывод основывается на результатах структурных исследований с использованием атомно-силовой (АС) и растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также на исследованиях наномеханических и оптических свойств кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr с энергией 150 МэВ. Метод изучения оптических спектров поглощения, в свою очередь, был использован для изучения эволюции центров окраски в процессе термических отжигов.

Кристалл LiF был выбран в качестве основного материала мишени из-за его высокой чувствительности к электронным возбуждениям, стабильности радиационных дефектов при комнатной температуре и простоты подготовки образцов путем расщепления.

Принимая во внимание, что самоорганизующиеся наноструктуры под влиянием облучения высокоэнергетическими ионами Kr связаны с ионно-индуцированными напряжениями [6], зависящими от рода налетающей частицы и потерь энергии, облучение ионами Kr ($E = 150$ МэВ) идеально, так как потери энергии (dE/dx) выше критического порога. Как правило, тяжелые ионы (например, U, Pb и Au) вызывают более существенные структурные изменения по сравнению с более легкими ионами [14]. Однако использование частиц легче, чем Kr предпочтительнее из-за снижения нежелательных эффектов, связанных с напряжением.

В данной работе мы исследуем формирование объемных наноструктур для кристаллов LiF, облученных ионами криптона. Оценку термической стабильности полученных наноструктур проводили по спектрам поглощения, снятым с облученных и отожженных кристаллов.

Экспериментальная часть

В качестве основных объектов для исследования были выбраны высококачественные кристаллы LiF, выращенные в вакууме из расплава (Оптический институт (ГОИ), Санкт-Петербург, Россия). Площадь исследуемых кристаллов составляет порядка 10x10 мм². Кристаллы облучались при комнатной температуре по нормали к плоскости (001) высокоэнергетическими ионами криптона с энергией 150 МэВ (диапазон $R = 17,5$ мкм, $dE/dx = 12$ кэВ / нм [15]). Облучение проводили на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Астана, Казахстан). Для исследования были выбраны кристаллы, облученные флюенсом 6×10^{12} ион/см² с плотностью ионного тока в пучке 180 нА/см² (флякс составил 8×10^{10} ион/см²·с). Данный режим был выбран не случайно. Он обеспечивает насыщение F-центров. Измеренная температура во время облучения высокоэнергетическими ионами криптона составила порядка 300 К (при $E = 150$ МэВ, $I = 180$ нА/см²).

Оптические измерения проводили с использованием спектрофотометра СФ-103 в спектральном диапазоне энергий и длин волн 1,8 эВ (700 нм) — 6,2 эВ (200 нм). Выбор диапазона измерений соответствует поглощению основных электронных центров окраски (F, F₂, F₃, F₄) в кристаллах LiF. Пики F- и F₂-центров в спектрах поглощения доминируют [3, 10].

Исследование механических свойств осуществляли на приборе MTS G200 с наноиндентором в виде алмазного наконечника Берковича (кривизна <20 нм). Измерения проводили при частоте 45 Гц и скорости деформации 0,05 с⁻¹, калибровку наноиндентора — на стандартном калибровочном образце из плавленного кварца. Средние значения нанотвердости и модуля Юнга, включая стандартные отклонения, были рассчитаны из экспериментально полученных кривых нагрузки и разгрузки с использованием стандартного программного обеспечения MTS TestWorks 4. Погрешность измерений рассчитывалась как 10 измерений на точку. Испытания механических свойств образцов проводили на облученной поверхности в атмосфере при комнатной температуре.

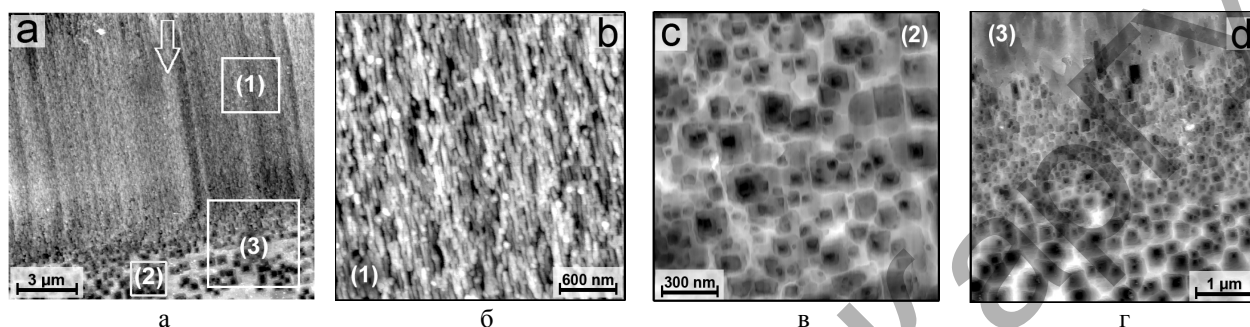
Структурные дефекты на облученной поверхности и сколе образца были выявлены в результате короткого (~1 с) селективного химического травления в насыщенном водном растворе FeCl₃. Топографию поверхности изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа (JSM 7500F) и атомно-силового микроскопа СРП (Veeco). Для просмотра поверхности и сколов исследуемых образцов в РЭМ наносили проводящий слой Pt толщиной порядка 8 нм; АСМ-изобра-

жения были получены в контактном режиме, с использованием стандартных датчиков кремния с наконечниками, радиусом <math><10\text{ нм}</math>.

Результаты и их обсуждение

Структурные исследования. Исследования структурных изменений после облучения были проведены на сколах предварительно расщепленных образцов (нормаль к расщепленной поверхности (100)). Скол образца после облучения не показал каких-либо структурных изменений.

Результаты исследований облученной поверхности с использованием АСМ после химического травления представлен на рисунке 1.



(а) — общий вид, стрелкой показано направление падающего ионного пучка;
 (б) — наноструктурированная зона; (в) — зона, богатая дислокациями;
 (г) — промежуточная зона между зоной (1) и (2)

Рисунок 1. Топография поверхности кристаллов LiF, облученных ионами Kr, с энергией 150 МэВ и флюенсом 6×10^{12} ион/см², после химического травления

Существенные изменения в структуре наблюдаются на глубине до 17,5 мкм. Данная глубина совпадает с глубиной проникновения ионов (R). Далее мы наблюдаем зоны, отличающиеся друг от друга структурными составляющими: в одной из зон отчетливо видна наноструктурированная поверхность, состоящая из мелких столбчатых зерен (зона 1), другая зона состоит из многочисленных квадратных ямок травления (зона 2), которые являются типичными призматическими дислокациями. Между наноструктурированной областью и зоной, богатой дислокациями, мы наблюдаем некую переходную область, толщиной примерно 2 мкм (рис. 1г).

АСМ-изображения наноструктурных зон с большим увеличением представлены на рисунке 1б. Размеры зерен были оценены по топографическим фотографиям и составили порядка 30–90 нм.

Рисунок 1в детально показывает зону, богатую дислокациями. Средняя плотность протравленных дислокационных ямок в этой зоне составляет порядка 5×10^9 см⁻². Часть дислокационных ямок травления содержит плоское дно, что свидетельствует о том, что их можно отнести к призматическим дислокациям типа внедрения. Известно, что призматические дислокационные петли образуются в кристаллах LiF (и других ЦГК) при скоплении междоузлий и вакансий, которые в избытке создаются в процессе облучения. Призматические дислокационные петли в ЦГК при облучении их электронами также наблюдали в [16, 17] с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ).

Измерения размеров ямок травления осуществляли вдоль падения пучка ионов (рис. 1г). Различия в размерах призматических дислокаций связаны с дисперсией скорости травления.

Результаты структурных изменений вдоль траектории падения ионного пучка по сравнению с потерями энергий представлены на рисунке 2. Для кристаллов LiF, облученных ионами Kr с энергией 150 МэВ, доминируют электронные потери энергии. Наноструктурированная зона появляется в образцах, облученных ионами с энергией выше пороговой энергии — 10 кэВ/нм. В самом конце пути ионов, где потери энергии снижаются ниже данного предела, образования структур, богатых дислокациями, не наблюдается.

Для образования наноструктур значительна роль и концентрации внутренних напряжений, которые облегчают процесс упорядочения дефектов и фрагментацию в сильно облученных кристаллах LiF [6].

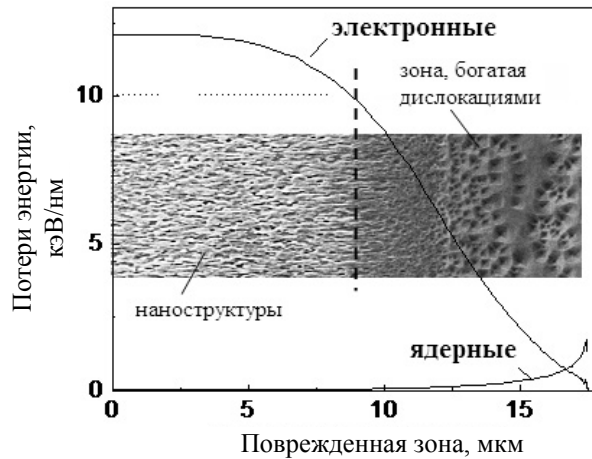


Рисунок 2. Глубина распределения электронных и ядерных потерь энергии для кристаллов LiF, облученных ионами Kг, с энергией 150 МэВ, рассчитанная по программе SRIM.2008.04. В график вставлено изображение профиля облученной области, сделанное с использованием РЭМ

Хорошо известно, что в кристаллах LiF при потерях энергии выше 10 кэВ/нм траектории треков при ионном облучении могут быть выявлены химическим травлением за счет локализации напряженных полей [3]. Очевидно, что накопление внутренних напряжений при облучении флюенсом 6×10^{12} ион/см² облегчает наноструктурирование. Воздействие напряжений проявляется также в наличии столбчатых наноразмерных форм, вытянутых вдоль направления потока ионов.

Структура в зоне 2 (рис. 1в) формируется треками, находящимися только в зоне гало. При флюенсе облучения 6×10^{12} ион/см² происходит перекрытие областей гало, что приводит к насыщению и агрегации одиночных дефектов. Структурные исследования показывают образование дислокаций в данной области. В таком случае используют более низкие флюенсы для создания наноструктурированной области и перемещения ее к границам зерен.

Подобные столбчатые наноструктуры наблюдались и в кристаллах LiF, облученных большей энергией (ГэВ) ионами урана и золота. Однако не было проведено экспериментов по облучению ионами углерода в связи с тем, что он обладает ионизационными потерями энергии существенно ниже порога, необходимого для повреждения активной зоны [18]. С использованием рентгеновского дифрактометра был проведен анализ наноструктур, индуцированных ионами урана и золота, которые имели мозаичную структуру с малыми границами между доменами. Подобный тип наноструктур формируется также и при облучении ионами криптона с энергией 150 МэВ.

Исследование механических свойств. Для исследования механических характеристик кристаллов LiF хорошо подходит наноиндентирование как структурно-чувствительная методика для измерения нанотвердости. Измерения нанотвердости и модуля Юнга проводили на образцах, облученных ионами Kг флюенсом 6×10^{12} ион/см² и фляксом 8×10^{10} ион/см²·с. Измерения механических характеристик на облученной поверхности образцов показывают сильное увеличение твердости (рис. 3), что характерно для высокого флюенса облучения кристаллов LiF быстрыми тяжелыми ионами [14].

Относительное увеличение твердости по сравнению с необлученными образцами составило порядка 200 %, тогда как увеличение модуля Юнга — только 20 %. Это может быть объяснено с точки зрения последствий напряжений, вызванных нагружением образцов. Увеличение твердости подтверждает наличие существенных структурных изменений в образце, в то время как постоянство модуля Юнга указывает на стабильность кристаллических образцов после облучения.

Измерения механических свойств на сколах облученных образцов показывают наличие упрочнения как в зонах, богатых наноструктурами, так и в зонах, где преобладают дислокации (рис. 4). Максимальное же упрочнение наблюдается в наноструктурированной и переходной зоне. Начиная с глубины около 11 мкм от облученной поверхности твердость постепенно уменьшается и в конце облученной области достигает значений твердости необлученных кристаллов.

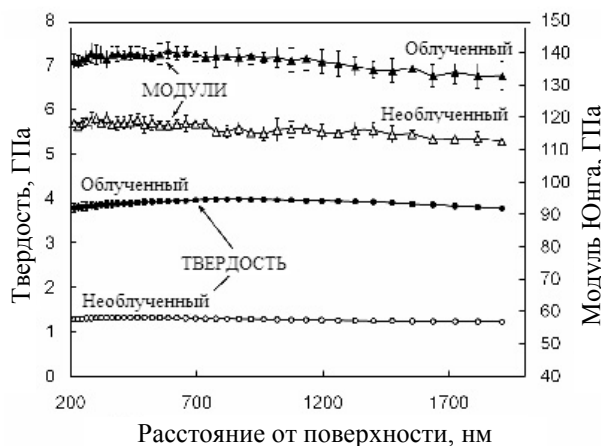


Рисунок 3. Графики твердости и модуля Юнга, измеренные на поверхности кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr, с энергией 150 МэВ и флюенсом 6×10^{12} ион/см². Для сравнения показаны также кривые механических испытаний для необлученных кристаллов

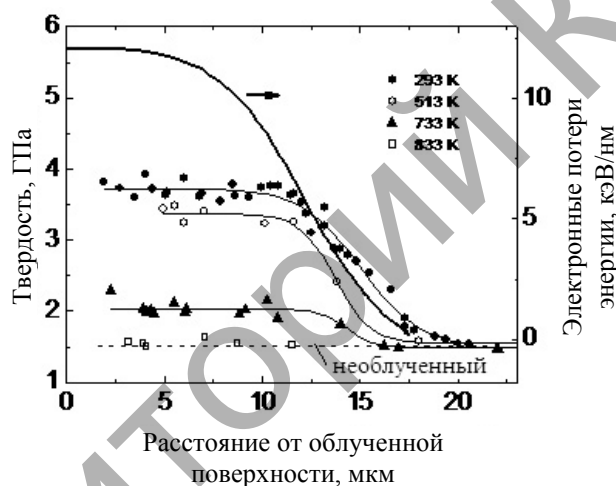


Рисунок 4. Глубина распределения профилей нанотвердости для кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr с энергией 150 МэВ и флюенсом 6×10^{12} ион/см², после термических отжигов при 513, 733 и 833 К в течение 20 минут

Сравнение результатов механических испытаний, полученных с поверхности и со сколов облученных образцов (рис. 3 и 4), показывает, что быстрые ионы больше всего упрочняют облученную поверхность, нежели скол. Это может быть связано, например, с распылением поверхности, вызывающим изменение химического состава образца, а также с миграцией радиационных дефектов. Похожий результат наблюдался и при облучении тяжелыми ионами в работе [14]. В большинстве случаев механические испытания дают представление о наличии сложных препятствий в образце, таких как дислокации, зерна, границы зерен. Механизмы упрочнения подробно исследуются и анализируются в работах [14, 18].

Термический отжиг образцов. Термическая стабильность различных дефектов в кристаллах LiF, облученных тяжелыми ионами, зависит от потерь энергии иона и плотности ионного тока [19]. Во время термической обработки происходит два разных процесса: 1 — разложение V_3 -центров с образованием H-центров; 2 — диффузия единичных F-центров с образованием сложных электронных центров окраски по следующим реакциям: $F + F_n \rightarrow F_{n+1}$, $F + F \rightarrow F_2$, $F + F_2 \rightarrow F_3$ и т.д.

Изменения, происходящие в кристаллах в процессе отжига, зависят от исходной структуры дефектов в облученных кристаллах, а также от температуры отжига. Оптические спектры поглощения кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr с энергией 150 МэВ после различных этапов термического отжига, показаны на рисунке 5.

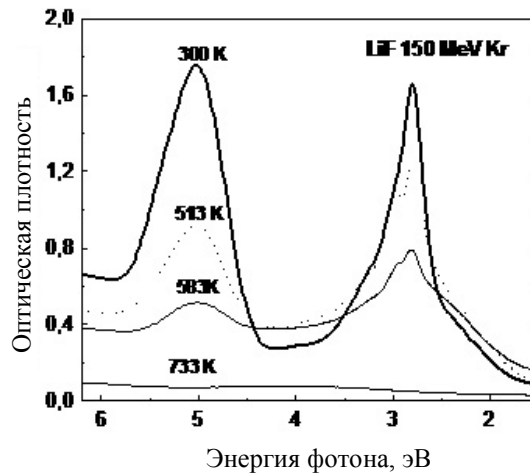


Рисунок 5. Спектры поглощения в кристаллах LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr, с энергией 150 МэВ и флюенсом 6×10^{12} ион/см², после термических отжигов при 513, 583 и 733 К в течение 20 минут

При температуре отжига менее 500 К F-центры не являются подвижными и разложение V_3 -центров приводит к рекомбинации электронных центров: $F + H \rightarrow 0$. С увеличением температуры отжига, кроме рекомбинации электронных центров окраски, с H-центрами происходит слияние электронных и дырочных центров ($F + F_n \rightarrow F_{n+1}$ или $H + H \rightarrow X_2$). Нагрев при температуре 733 К приводит к полному отжигу F- и F_n -центров. Присутствует только остаточное поглощение примесных центров (Li и другие возможные загрязнения).

Исследования с использованием атомно-силового микроскопа облученных и отожженных кристаллов показывают, что наноструктуры, созданные в образцах под влиянием облучения ионами криптона, являются термически стабильными при температуре отжига до 500 К (рис. 6а). При более высоких температурах отжига наноструктуры превращаются в зоны, богатые дислокациями (рис. 6б), дальнейшее же повышение температуры приводит к восстановлению структуры за счет уменьшения плотности дислокаций (рис. 6с).

Восстановление твердости при отжиге начинается при температуре отжига выше 500 К и завершается к 833 К (рис. 4). График восстановления твердости по Аррениусу (изменение твердости в % в зависимости от $(1/T)$) дает энергию активации для $0,2 \pm 0,03$ эВ в диапазоне температур от 513 до 833 К. Это значение энергии активации близко к энергии активации для H-центров, наблюдаемых авторами в [20, 21]. В случае F-центров энергия активации выше ($\sim 1,5$ эВ). Полученные данные доказывают, что дефекты играют большую роль в образовании галогенов при термическом отжиге. Так как H-центры становятся подвижными при низких температурах, стабильные конфигурации межзвездных галогенных дефектов при комнатных температурах есть агрегаты H-центров. Отжиг выше 530 К приводит к термическому разложению агрегатов H-центров. Единичный H-центр может аннигилировать с F-центрами, которые являются менее подвижными и могут распадаться на поверхности, выделяя нейтральный атом галогена или молекулы.

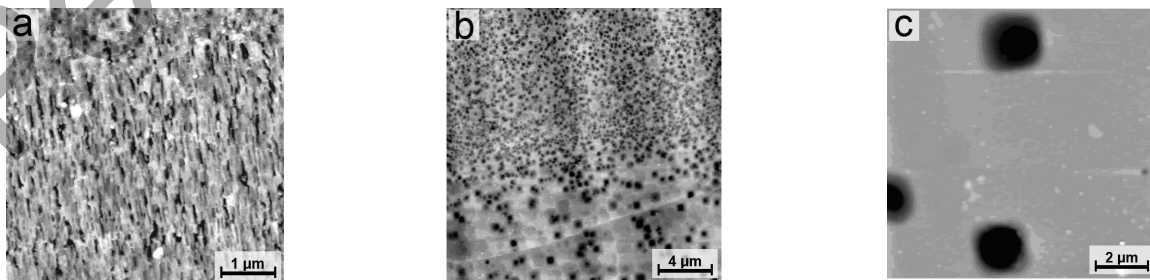


Рисунок 6. Топография поверхности с использованием атомно-силового микроскопа для кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr, с энергией 150 МэВ и флюенсом 6×10^{12} ион/см², после термических отжигов при 513 (а), 733 (б) и 833К (в) в течение 20 минут

С учетом нагрева образцов под ионным пучком результаты отжига также имеют большое значение для дальнейшего выбора параметров облучения, таких как флюенс и плотность ионного тока. Из полученных данных следует, что повышения температуры до 360К во время облучения недостаточно для отжига дефектов.

Выводы

Исследования, проведенные с использованием атомно-силовой и растровой электронной микроскопии для кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими ионами Kr, с энергией 150 МэВ, подтвердили наличие объемных наноструктур, состоящих из столбчатых зерен с наноразмерными зернами порядка 30–90 нм. Наноструктурные формы, образовавшиеся после облучения с высоким флюенсом (6×10^{12} ион/см²), привели как к насыщению F-центров, так и к образованию агрегатов радиационных дефектов.

Результаты, полученные при проведении термических отжигов образцов, с последующей регистрацией спектров поглощения, являются новыми. Структурные исследования показали, что наноструктуры термически стабильны, вплоть до температуры отжига 500 К. Дальнейшее повышение температуры приводит к переходу от наноструктур до структур дислокационного вида, которые восстанавливаются при температуре около 830 К. При этой же температуре восстанавливаются механические свойства образцов.

Сравнивая полученные результаты с уже имеющимися данными, приходим к выводу, что наноструктурирование можно рассматривать как упорядочение ионных дефектов и их скоплений.

Поля напряжений выявляют область поврежденной зоны и тем самым играют важную роль в образовании наноструктурирования.

При энергии облучения ниже пороговой ($dE/dx < 10$ кэВ/нм) создаются только призматические дислокации.

References

- 1 *Toulemonde M., Trautmann C., Balanzat E. et al.* Track formation and fabrication of nanostructures with MeV-ion beams // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2004. — Vol. 216(1). — P. 960–967.
- 2 *Neumann R.* Scanning probe microscopy of ion-irradiated materials // Nucl. Instr. and Meth. B. — 1999. — Vol. 151(42). — P. 4029–4032.
- 3 *Schwartz K., Trautmann C., Steckenreiter T. et al.* Defect production and annealing induced by electronic energy loss in pure metal // Phys. Rev. B. — 1998. — Vol. 58. — P. 1920–1928.
- 4 *Abu Saleh S., Eyal Y.* Core structure of latent heavy-ion tracks // J. Appl. Cryst. — 2007. — Vol. 40(71). — P. 700–702.
- 5 *Jain I.P., Agarwal G.* Ion beam induced surface and interface engineering // Surface Science Reports. — 2011. — Vol. 66(77). — P. 2963–2971.
- 6 *Kumar M., Singh F., Khan S. A. et al.* Heavy ion induced damage in NaCl and KCl crystals // Phys. D: Appl. Phys. — 2005. — Vol. 38(367). — P. 7497–7499.
- 7 *Maniks J., Manika I., Grants R. et al.* Nanostructuring and hardening of LiF crystals irradiated with 3–15 MeV Au ions // Appl Phys A. — 2011. — Vol. 104(1121). — P. 1014–1018.
- 8 *Itoh N., Duffy D.M., Khabakshouri S. et al.* Making tracks: electronic excitation roles in forming swift heavy ion tracks // J. Phys.: Condens. Matter. — 2009. — Vol. 21(474205). — P. 1075–1087.
- 9 *Schwartz K., Volkov A.E., Sorokin M.V. et al.* Color center creation in LiF crystals irradiated with 5- and 10-MeV Au ions // Nucl. Instrum. Meth. B. — 2008. — Vol. 266(2736). — P. 2202–2206.
- 10 *Dauletbekova A., Akilbekov A., Zdorovets M.* Electron color center creation in LiF irradiated with Kr ions // Phys. Status Solidi B. — 2010. — Vol. 247(1227). — P. 1174–1183.
- 11 *Dauletbekova A., Akilbekov A., Zdorovets M. et al.* Dislocation mobility study of heavy ion induced track damage in LiF crystals // Nucl. Instr. Meth. B. — 2010. — Vol. 268(3005). — P. 341–346.
- 12 *Schwartz K., Sorokin M.V., Lushchik A. et al.* Effect of electronic energy loss and irradiation temperature on color-center creation in LiF and NaCl crystals irradiated with swift heavy ions // Nucl. Instr. Meth. B. — 2008. — Vol. 266(2736). — P. 149–159.
- 13 *Lidiard A.B.* Ab Initio Effective Core Potentials for Molecular Calculations // Zeitschrift für Physikalische Chemie. — 1998. — Vol. 208(219). — P. 2997–3013.
- 14 *Manika I., Maniks J., Schwartz K.* Swift-ion-induced hardening and reduction of dislocation mobility in LiF crystals // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2008. — Vol. 41(074008). — P. 341–346.
- 15 *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. — Pergamon, New York, 1985. — P. 151.

- 16 *Kawamata Y.* Colloid absorption bands associated with implanted alkaly ions MgO single crystals // *Journal de Physique*. — 1976. — Vol. 37(C7–502). — P. 641–650.
- 17 *Hobbs L.W.* Position annihilation studies in alkali halides // *Journal de Physique*. — 1973. — Vol. 34(C9–227). — P. 813–816.
- 18 *Maniks J., Manika I., Zabels R.* Luminescence of aggregate centers in lithium fluoride irradiated with high energy heavy ions // *Nucl. Instr. Meth. B*. — 2011. — doi10.1016/j.nimb.2011.08.042.
- 19 *Schwartz K., Volkov A.E., Sorokin M.V.* Effect of irradiation parameters on defect aggregation during thermal annealing of LiF irradiated with swift ions and electrons // *Phys. Rev. B*. — 2010. — Vol. 82(144116). — P. 633–640.
- 20 *Seifert N., Husinsky W., Betz G.* High-energy ionoluminescence of LiF // *Phys. Rev. B*. — 1991. — Vol. 43(6723). — P. 442–451.
- 21 *Manika I., Maniks J., Kulis P.L.* Hardening in LiF induced by fast Ni ions and recovery of properties under annealing // *Proc.SPIE, Optical Materials and Applications; A.Rosental; Ed., 5946 (2005) 81.*

А.Т.Ақылбеков, А.К.Даулетбекова, А.В.Русакова, Ф.У.Әбуова,
Е.В.Бихерт, З.Т.Уматова, М.В.Здоровец

Энергиясы 150 МэВ жоғары энергетикалық Kr иондарымен сәулелендірілген LiF кристалдарындағы бояу орталықтары мен наноақаулар

Мақалада 150 МэВ энергиямен және 6×10^{12} ион/см² флюенсте криптон иондарымен сәулелендірілген LiF кристалдарындағы оптикалық және наномеханикалық құрылымының өзгеруі оптикалық абсорбионды, сканирлеуші электронды, атомдық күштік микроскоп және наноиндентірлеу әдістерінің көмегімен зерттелді. Оптикалық спектроскопия F орталықтарының қанығуын және салыстырмалы түрде көп мөлшердегі F_n орталықтарының пайда болатындығын көрсетті. АҚМ және РЭМ көмегімен жасалынған суреттер тік кристаллиттердің нанокұрылымдық аймақтарының бар екенін көрсетті (өлшемі 30–90 нм). Сонымен қатар қыздыру кезінде кристалдың құрылымының және қасиеттерінің қайта қалпына келуі қарастырылды.

A.T.Akilbekov, A.K.Dauletbekova, A.V.Russakova, F.U.Abuova,
Y.V.Bikhert, Z.T.Umatova, M.V.Zdorovets

Color centers and nanodfects in LiF crystals irradiated with 150 MeV Kr ions

The modifications of structure, optical and nano-mechanical properties of LiF crystals after irradiation with 150 MeV Kr⁺¹⁴ ions at a fluence of 6×10^{12} ions/cm² have been studied using optical absorption spectroscopy, scanning electron and atomic force microscopy, and nanoindentation. Optical spectroscopy shows the saturation of F centers and a comparatively high number of F_n centers. AFM and SEM imaging reveals a nanostructured region with columnar nanocrystallites (size 30–90 nm). The recovery processes of structure and properties under annealing have been studied.