

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

14-88-535

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

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

Направлено в журнал "Физика твердого тела"

---

\*Институт кристаллографии АН СССР, Москва

1988

## 1. ВВЕДЕНИЕ

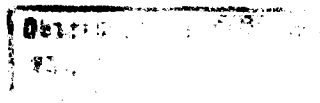
Получение полупроводниковых и диэлектрических материалов с заданными свойствами является актуальной задачей современной технологии. Одним из наиболее перспективных методов для решения этой проблемы служит ионное легирование. Изучению свойств материалов, в том числе и процессов радиационного дефектообразования в условиях ионного легирования с энергиями ионов до 1 МэВ, посвящено большое количество работ /см., например, /1-2//.

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./3/. Такие энергии внедряемых ионов дают возможность модифицировать свойства облучаемых материалов на глубинах порядка нескольких десятков микрон.

В большинстве работ, приведенных в обзоре/4/, изучались электрические и магнитные свойства полупроводников, модифицированных ионной имплантацией. Однако 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 применять для получения информации о радиационных дефектах традиционные методы физики твердого тела - абсорбционную спектроскопию, фото- и катодoluminesценцию 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/4/. 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.



## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Образцы монокристаллов LiF в виде пластинок 10x10x1 мм облучались ионами  $^{136}\text{Xe}$  /118 МэВ/, Ag /225 МэВ, 46,3 МэВ/,  $^{20}\text{Ne}$  /112,5 МэВ/,  $^{22}\text{Ne}$  /26,9 МэВ/ на циклотронах ЛЯР ОИЯИ У-300 и ИЦ-100 до доз  $10^9$ - $5 \cdot 10^{13}$  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 см $^{-2}$ , что и использовалось при облучении образцов<sup>5/</sup>.

После облучения измерялись спектры поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях, а также микротвердость образцов. Спектры определялись с помощью спектрофотометра SPECORD M40. 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.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены характерные спектры поглощения для кристаллов LiF, облученных до двух различных доз ионами  $^{22}\text{Ne}$  /26,9 МэВ/. Видно, что как и в случае воздействия других видов излучения, ионное облучение приводит к появлению полос поглощения, обусловленных образованием F1 и F2 центров окраски. Согласно общепринятой модели<sup>4/</sup>, центр F1 представляет собой анионную вакансию, захватившую электрон, а F2 - систему из двух анионных вакансий и электрона. 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.2. Как видно из рисунка, концентрации центров  $n_{F1}$  и  $n_{F2}$  сложным образом зависят от дозы бомбардирующих ионов. Для ионов  $^{22}\text{Ne}$  и  $^{136}\text{Xe}$  наблюдается тенденция к насыщению величины  $n_{F1}$ , а для ионов Ag /46,3 МэВ/ зависимость  $n_{F1}(D)$ , где D - доза облучения, переходит через максимум.

Для анализа полученных экспериментальных данных следует принять во внимание основные физические процессы, протекающие

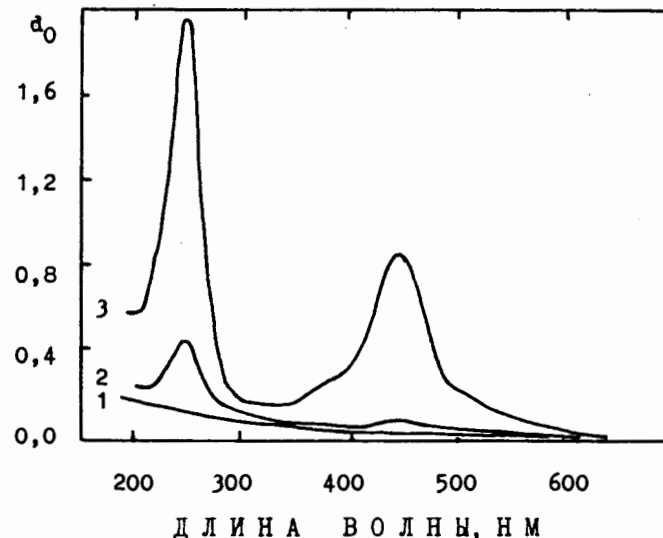


Рис.1. Спектры поглощения кристаллов LiF, облученных ионами  $^{22}\text{Ne}$  /26,9 МэВ/, 1 - исходный, 2 -  $D=2,6 \cdot 10^{11}$  см $^{-2}$ , 3 -  $D = 10^{13}$  см $^{-2}$ .

в ионных кристаллах под действием облучения тяжелыми заряженными частицами<sup>4/</sup>. Налетающие ионы возбуждают электронную, анионную, катионную подсистемы в ионных структурах. В области переданных энергий в несколько электронвольт происходит возбуждение электронной подсистемы анионов с образованием экситонов. Такие возбуждения, распадаясь, могут образовывать новые вакансии. При рекомбинации электрона с дыркой возникает френкелевская пара. В щелочно-галогидных кристаллах энергия образования анионных френкелевских пар составляет 3-5 эВ. Таким образом, смещение атома из узла решетки и образование вакансии происходят посредством ионизации иона /подробно образование дефектов вследствие электронных процессов рассмотрено, например, в<sup>6/</sup>/.

Другим каналом генерации радиационных дефектов является, как известно, смещение атомов в результате упругих столкновений с бомбардирующими ионами. При этом пороговая энергия смещения атомов составляет  $\approx 25$  эВ, что значительно выше энергии образования точечных дефектов посредством ионизации. В то же время, при упругом рассеянии возникают первично-выбитые атомы с энергиями, достаточными для развития каскадов и субкаскадов атомных смещений. Следствием каскадных и последующих диффузионных процессов является образование целого спектра радиа-

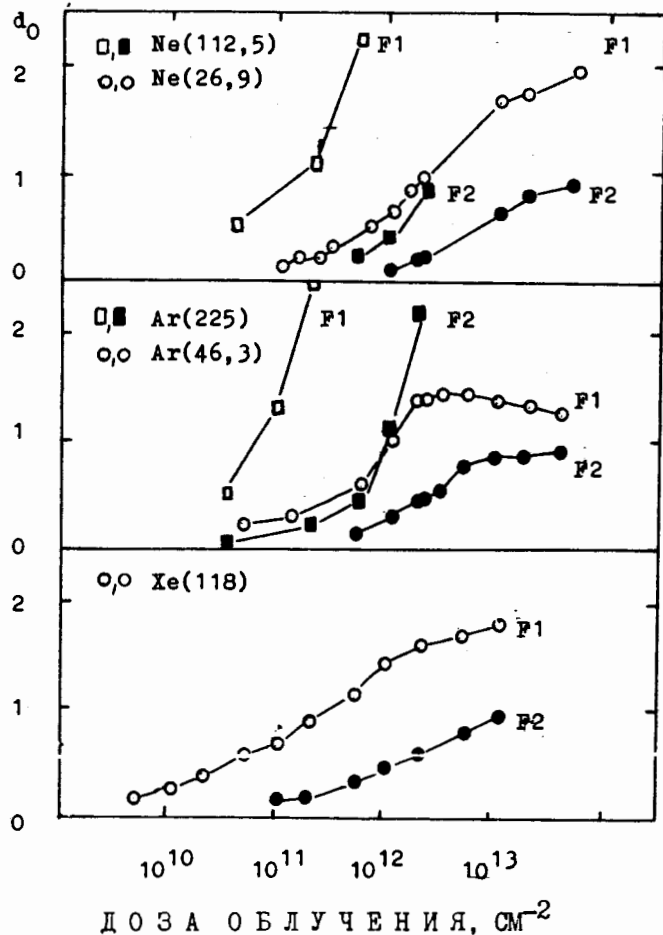


Рис.2. Зависимость оптической плотности в максимуме полос поглощения LiF, облученного тяжелыми ионами, от дозы облучения. В скобках указана энергия частиц в МэВ.

ционных повреждений - одиночных точечных дефектов, их кластеров, петель дислокаций и др.

Количество F-центров можно оценить из спектров поглощения с помощью уравнения Смакулы<sup>6/</sup>:

$$fn_F = 1,31 \cdot 10^{17} \mu_{\max} N n / (n^2 + 2)^2 \text{ см}^{-3},$$

где  $f$  - сила осциллятора. Из экспериментальных данных для щелочно-галогидных кристаллов принимают  $f = 0,7-0,8$ ;  $n$  - коэффициент преломления;  $N$  - ширина полосы поглощения в максимуме

F-полосы на середине ее высоты;  $\mu_{\max}$  - коэффициент поглощения в максимуме F-полосы, равный:  $\mu_{\max} = 2,302 d_0/x_p$ , 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 на несколько порядков больше концентраций дефектов, образованных по каналу упругого рассеяния.

В таблице 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 года<sup>7/</sup> на основе метода, предложенного в работах<sup>8,9/</sup>.

Таблица

Ион	Энергия, МэВ	$S_E$ , МэВ	$S_N$ , МэВ	$R_p$ , мкм
$^{20}\text{Ne}$	112,5	112,36	0,14	59,39
$^{22}\text{Ne}$	26,9	26,78	0,12	10,49
$^{40}\text{Ar}$	225	224,58	0,42	52,6
$^{40}\text{Ar}$	46,3	45,94	0,36	8,75
$^{136}\text{Xe}$	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  $\text{см}^3$ , для указанного выше диапазона флюенсов ионов. Это согласуется с ранее выполненными оценками и подтверждает определяющую роль ионизационных потерь энергии в образовании центров окраски.

На рис.3 приведены значения оптической плотности для F1 центров, нормированные на величину  $S_E$  в зависимости от дозы облучения. Из рисунка видно, что в области доз до  $10^{12} \text{ см}^{-2}$  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 тя-

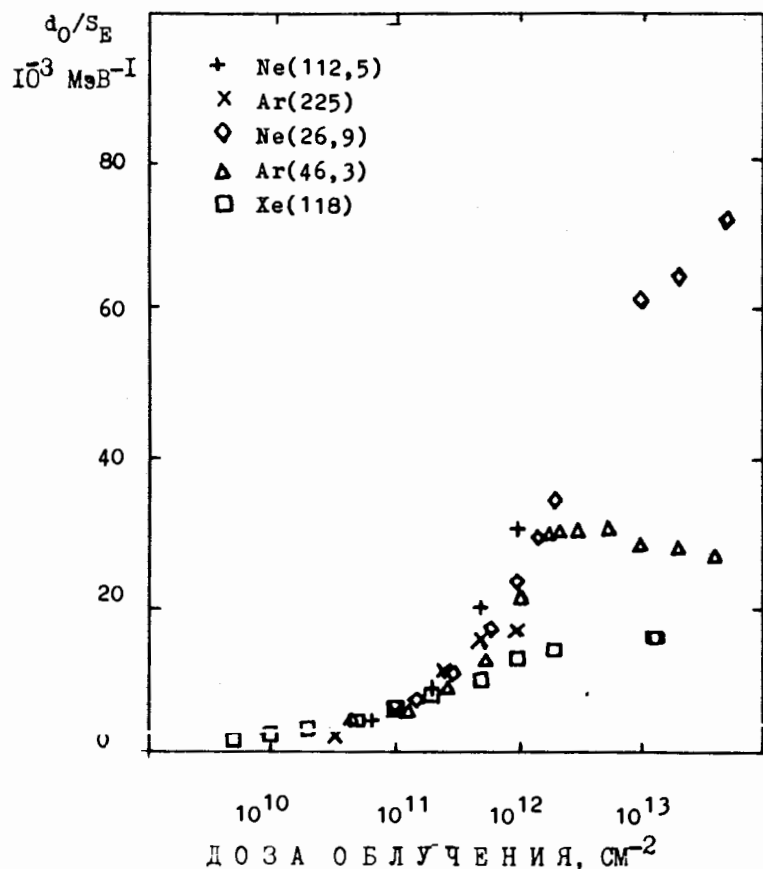


Рис.3. Зависимость оптической плотности для F1-центров, нормированной на величину полных ионизационных потерь энергии, от дозы облучения.

жельх 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<sup>/10/</sup>.

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, если исходить из дозы  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, дает разумную величину  $3 \cdot 10^{-6}$  см.

Экспериментально anomальная зависимость радиационной повреждаемости от атомного номера ионов была обнаружена в работе<sup>/11/</sup>, 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<sup>/11/</sup> 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 и 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<sup>/4/</sup>, микротвердость LiF монотонно возрастает с дозой облучения, выходя на насыщение в области больших значений доз.

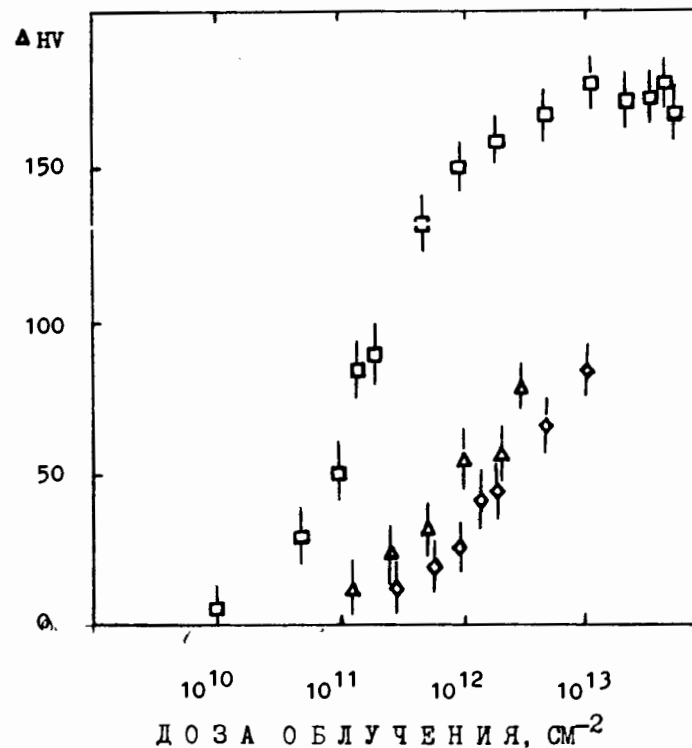
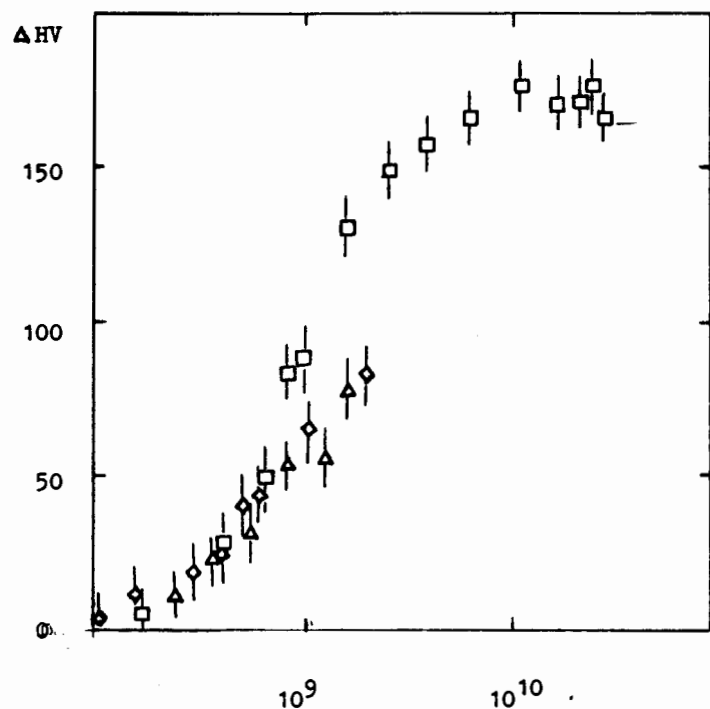


Рис.4. Зависимость радиационного упрочнения LiF от дозы облучения ионами Хе - □, Аг /46,3 МэВ/ - Δ, <sup>22</sup>Ne /26,9 МэВ/ - ◇.



ДОЗА ПОВРЕЖДЕНИЯ,  $\text{CM}^{-2}$  МЭВ

Рис.5. Зависимость радиационного упрочнения LiF, облученного ионами Xe - □, Ar /46,3 МэВ/ - Δ,  $^{22}\text{Ne}$  /26,9 МэВ/ - ◇, от дозы повреждений.

Зависимость прироста микротвердости от дозы для всех типов ионов представлена на рис.4. Видно, что при одинаковых дозах облучения наибольший эффект радиационного упрочнения наблюдается для ионов Xe и наименьший - для ионов Ne, что характерно также и в случае облучения металлов<sup>/12/</sup>. Как известно, подобная зависимость для металлов объясняется различием в величине энергии, передаваемой при упругом рассеянии ионов. Поэтому на рис.5 изменение микротвердости представлено как функция величины  $D_n$ , равной  $D \cdot S_n$ , 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 рисунка, в пределах точности измерений микротвердости и дозы облучения, степень радиационного упрочнения практически

одинакова для всех ионов при равных дозах повреждений. Это говорит о том, что изменение механических свойств LiF обусловлено радиационными дефектами, образующимися в результате упругих столкновений. Образование же центров окраски не влияет заметно на микротвердость кристаллов.

#### 4. ВЫВОДЫ

1. На примере исследований кристаллов LiF, облученных высокоэнергетическими тяжелыми ионами Xe, Ar, Ne, оценено относительное влияние ионизационных и ядерных потерь энергии на дефектообразование в монокристаллах ЩГК.

2. Исследована кинетика накопления F1 и F2 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%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мейер Дж., Эриксон Л., Дэвис Дж. Ионное легирование полупроводников. М.: Мир, 1973, с.296.
2. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983, с.240.
3. Ziegler J.F. - Nucl.Instr. and Meth., 1985, B6, p.270.
4. Ботаки А.А., Воробьев А.А., Ульянов В.Л. Радиационная физика ионных кристаллов. М.: Атомиздат, 1980, с.207.
5. Флеров Г.Н. и др. В кн.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.2, с.86.
6. Воробьев А.А. Центры окраски в щелочно-галогидных кристаллах. Книга II. Томск: Изд-во ТГУ, 1968, с.390.
7. Davisson С.М., Mapping I. - Comp. Phys. Comm., 1986, v.42, p.137.
8. Бардош Д., Гавриленко Г.М. Препринт ОИЯИ P17-84-371, Дубна, 1984.
9. Бардош Д. Сообщение ОИЯИ P17-84-754, Дубна, 1984.

10. Давыдов А.А., Калиниченко А.И. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, 1985, вып.3/36/, с.27.
11. Карамян С.А., Рыхлюк А.В., Бугров В.Н. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 5/25/. Дубна: ОИЯИ, 1987, с.18.
12. Дидык А.Ю. и др. Препринт ОИЯИ 14-86-4, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 июля 1988 года.

Дидык А.Ю. и др. 14-88-535  
Влияние ионизационных и ядерных потерь энергии тяжелых ионов на дефектообразование в кристаллах LiF

Изучены спектры поглощения и механические свойства кристаллов LiF, облученных ионами  $^{136}\text{Xe}$  /118 МэВ/, Ar /225, 46,3 МэВ/,  $^{22}\text{Ne}$  /112,5 МэВ/,  $^{22}\text{Ne}$  /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 Xe, Ar, Ne, начиная с некоторой дозы облучения, может быть объяснено перекрытием треков ионов. Изменение механических свойств LiF определяется радиационными дефектами, образованными в результате упругих столкновений бомбардирующих ионов с атомами кристалла.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Didyk A.Yu. et al. 14-88-535  
The Influence of Ionization and Heavy Ion Nuclear Energy Losses on Damaging in LiF Crystals

Absorption spectra and mechanical properties of LiF irradiated with  $^{136}\text{Xe}$  (118 MeV), Ar (225, 46.3 MeV),  $^{20}\text{Ne}$  (112.5 MeV),  $^{22}\text{Ne}$  (26.9 MeV) ions at  $10^{10}$ - $10^{14}$  cm $^{-2}$  dose range were studied. It is shown that the total number of anion vacancies is determined by total ionization energy losses of heavy ions. The observed differences in dose dependences of point defect concentrations for Xe, Ar, Ne beginning after certain dose may be explained as a result of ion track overlapping. The change of mechanical properties of LiF is determined by the radiation damages caused by elastic collisions of bombarded ions with lattice atoms.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988