

ISSN 2616-6836

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

BULLETIN

of the L.N. Gumilyov Eurasian
National University

ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

Серия **ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ**

PHYSICS. ASTRONOMY Series

№1(122)/2018

1995 жылдан бастап шығады

Издается с 1995 года

Founded in 1995

Жылына 4 рет шығады

Выходит 4 раза в год

Published 4 times a year

Астана, 2018

Astana, 2018

Бас редакторы
ф.-м.ғ. докторы
А.Қ. Арынгазин (Қазақстан)

Бас редактордың орынбасары

А.Т. Ақылбеков, ф.-м.ғ.д., профессор
(Қазақстан)

Редакция алқасы

Алдонгаров А.А.	PhD (Қазақстан)
Балапанов М.Х.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Бахтизин Р.З.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Гиниятова Ш.Г.	ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)
Даулетбекова А.Қ.	ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)
Ержанов Қ.К.	ф.-м.ғ.к., PhD (Қазақстан)
Жұмаділов Қ.Ш.	PhD (Қазақстан)
Здоровец М.	ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)
Қадыржанов Қ.К.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Кайнарбай А.Ж.	ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)
Кутербеков Қ.А.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Лущик А.Ч.	ф.-м.ғ.д., проф. (Эстония)
Морзабаев А.К.	ф.-м.ғ.к. (Қазақстан)
Мырзақұлов Р.Қ.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Нұрахметов Т.Н.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Сауытбеков С.С.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Тлеукенов С.К.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Усеинов А.Б.	PhD (Қазақстан)

Редакцияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сатпаев к-сі, 2, 408 б.
Тел.: (7172) 709-500 (ішкі 31-428)
E-mail: vest_phys@enu.kz

Жауапты хатшы, компьютерде беттеген
А. Нұрболат

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

Меншіктенуші: ҚР БжҒМ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті" ШЖҚ РМК
Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген.
27.03.2018ж. №16999-ж тіркеу куәлігі. Тиражы: 30 дана

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі, 12/1,
тел.: (7172)709-500 (ішкі 31-428)

Главный редактор
доктор ф.-м.н.
А.К. Арынгазин (Казахстан)

Зам. главного редактора

А.Т. Акылбеков, доктор ф.-м.н.
профессор (Казахстан)

Редакционная коллегия

Алдонгаров А.А.	PhD (Казахстан)
Балапанов М.Х.	ф.-м.н., проф. (Россия)
Бахтизин Р.З.	ф.-м.н., проф. (Россия)
Гиниятова Ш.Г.	кандидат ф.-м.н. (Казахстан)
Даулетбекова А.К.	кандидат ф.-м.н., PhD (Казахстан)
Ержанов К.К.	кандидат ф.-м.н., PhD (Казахстан)
Жумадилов К.Ш.	доктор PhD (Казахстан)
Здоровец М.	к.ф.-м.н. (Казахстан)
Кадыржанов К.К.	ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Кайнарбай А.Ж.	кандидат ф.-м.н. (Казахстан)
Кутербеков К.А.	доктор ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Лущик А.Ч.	ф.-м.н., проф. (Эстония)
Морзабаев А.К.	кандидат ф.-м.н. (Казахстан)
Мырзакулов Р.К.	доктор ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Нурахметов Т.Н.	доктор ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Сауытбеков С.С.	доктор ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Тлеукенов С.К.	доктор ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Усеинов А.Б.	PhD (Казахстан)

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2, каб. 408
Тел.: (7172) 709-500 (вн. 31-428)
E-mail: vest_phys@enu.kz

Ответственный секретарь, компьютерная верстка
А. Нурболат

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ

Собственник РГП на ПХВ "Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева" МОН РК

Периодичность: 4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан.

Регистрационное свидетельство №16999-ж от 27.03.2018г.

Тираж: 30 экземпляров

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажимукана, 12/1,

тел.: (7172)709-500 (вн. 31-428)

Editor-in-Chief
Doctor of Phys.-Math. Sciences
A.K. Aryngazin (Kazakhstan)

Deputy Editor-in-Chief

A.T. Akilbekov, Doctor of Phys.-Math. Sciences,
prof. (Kazakhstan)

Editorial board

Aldongarov A.A.	PhD (Kazakhstan)
Balapanov M.Kh.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Russia)
Bakhtizin R.Z.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Russia)
Dauletbekova A.K.	Candidate of Phys.-Math. Sciences, PhD (Kazakhstan)
Giniyatova Sh.G.	Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)
Kadyrzhanov K.K.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Kazakhstan)
Kainarbay A.Zh.	Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)
Kuterbekov K.A.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Kazakhstan)
Lushchik A.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Estonia)
Morzabayev A.K.	Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)
Myrzakulov R.K.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Kazakhstan)
Nurakhmetov T.N.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Kazakhstan)
Sautbekov S.S.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Kazakhstan)
Tleukenov S.K.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, prof. (Kazakhstan)
Useinov A.B.	PhD (Kazakhstan)
Yerzhanov K.K.	Candidate of Phys.-Math. Sciences, PhD(Kazakhstan)
Zdorovets M.	Candidate of Phys.-Math. Sciences (Kazakhstan)
Zhumadilov K.Sh.	PhD (Kazakhstan)

Editorial address: 2, Satpayev str., of.408, Astana, Kazakhstan, 010008
Tel.: (7172) 709-500 (ext. 31-428)
E-mail: vest_phys@enu.kz

Responsible secretary, computer layout:
A.Nurbolat

Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. PHYSICS. ASTRONOMY Series

Owner: Republican State Enterprise in the capacity of economic conduct "L.N. Gumilyov Eurasian National University" Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan. Registration certificate №16999-ж from 27.03.2018. Circulation: 25 copies

Address of printing house: 12/1 Kazhimukan str., Astana, Kazakhstan 010008;
tel.: (7172) 709-500 (ext. 31-428)

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ сериясы

№1(122)/2018

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

<i>Ақылбеков А.Т., Бижанова С.Б., Баубекова Г.М., Карипбаев Ж.Т.</i> «Таза» кристалдардың импульстік катодолюминесценция спектрлері	8
<i>Ахметова Г.А.</i> DVB-T және DVB-T2 жерсеріктік эфирлік хабар тарату желісінің қамту аймағын анықтаудың стандарттары мен әдіснамасын салыстыру	13
<i>Алдонгаров А.А., Асылбекова А.М., Иргібаева И.С., Ермекова Ж.К.</i> Родамин бояғышы мен CdS кластерлерінің кешендерінде электрондық ауысулардың табиғатын анықтау	19
<i>Бекова Г.Т., Уалиханова У.А., Есмаханова К.Р.</i> (2+1)-комплекті модификациялан Кортевег–де Фриз және Максвелл–Блох теңдеулерінің сақталу заңдары	28
<i>Борзев Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л.</i> Сыртқы факторлардың әсерінен металл наноқұрылымдарының құлдырауын зерттеу	33
<i>Қадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л., Петров А.В.</i> Zn нанотүтікшелерінің құрылымдық қасиеттеріне сәулелендіру әсерін зерттеу	40
<i>Калиекперов М.Е., Козловский А.Л., Қадыржанов К.К.</i> Полимерлік матрицалар негізінде иондаушы сәуледен жұқа қорғаныш жабындарын синтездеу	46
<i>Жасыбаева М.Б., Нугманова Г.Н.</i> Интегралданатын Фокас-Ленэллстың теңдеуіне эквивалентті спиндік жүйе	53
<i>Есмаханова К.Р., Жубаева Ж.С., Топеева С.Қ.</i> (1+1)-өлшемді локалды емес бейсызықты Шредингер теңдеуінің нақты шешімдері	58
<i>Мусабаева Г.К., Ақылбеков А.Т., Мусабаев К.К.</i> Атомдардың өздігінен сәуле шығаруы туралы	64
<i>Мурзалынов Д.О., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н., Комаров Ф.Ф., Ақылбеков А.Т., Мудрый А.В., Рябикин Ю.А., Гиниятова Ш.Г., Даулетбекова А.К.</i> Азотпен имплантталған кремний нитридi қабықшаларының люминесценциясы	68
<i>Морзабаев А.К., Гиниятова Ш.Г., Шаханова Г.А., Алымханова К., Айданұлы Б., Махмұтов В.С.</i> Астана қаласының Жер беті маңындағы дозалық және электрлік сипаттамаларын талдау	75
<i>Даулетбекова А., Баймұханов З., Козловский А., Гиниятова Ш., Мурзағалиев М., Журкин Е., Наурызбаева Р.</i> SiO ₂ /Si тіректі темплэйт негізінде нанокөмізгітi материалдарды зерттеу және әзірлеу	82
<i>Даулетбекова А., Скуратов В., Маника И., Маникс Я., Забельс Р., Кирилкин Н., Ақылбеков А., Гиниятова Ш., Байжуманов М., Сейтбаев А., Кудайбергенова С.</i> Люминесценцияның өшуінің дислокациялану механизмі	91

ВЕСТНИК ЕВРАЗИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ Л.Н.ГУМИЛЕВА. Серия ФИЗИКА.

№1(122)/2018

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА	
<i>Акылбеков А.Т., Бижанова С.Б., Баубекова Г.М., Карипбаев Ж.Т.</i> Спектры импульсной катодолюминесценции «чистых» кристаллов	8
<i>Ахметова Г.</i> Сравнение стандартов и методика определения зоны покрытия сети цифрового наземного вещания DVB-T и DVB-T2	13
<i>Алдонгаров А.А., Асылбекова А.М., Иргибоева И.С., Ермекова Ж.К.</i> Определение природы электронных переходов в комплексах родаминового красителя и кластерах CdS	19
<i>Бекова Г.Т., Уалиханова У.А., Есмаханова К.Р.</i> Законы сохранения для (2+1)-мерных уравнений комплексно модифицированного Кортевега-де Фриза и Максвелла-Блоха	28
<i>Боржекков Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л.</i> Изучение деградации металлических наноструктур под действием внешних факторов	33
<i>Кадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л.</i> Петров А.В, Исследование влияния облучения на структурные свойства Zn нанотрубок	40
<i>Калиекперов М.Е., Козловский А.Л., Кадыржанов К.К.</i> Синтез тонких защитных покрытий от ионизирующего излучения на основе полимерных матриц	46
<i>Жасыбаева М.Б., Нугманова Г.Н.</i> Спиновая система, эквивалентная интегрируемому уравнению Фокаса-Ленэллса	53
<i>Есмаханова К.Р., Жубаева Ж.С., Татеева С.Қ.</i> Нелокальные нелинейные уравнения Шредингера и ее точные решения	58
<i>Мусабаева Г.К., Акылбеков А.Т., Мусабаев К.К.</i> К вопросу возникновения спонтанного излучения атомов	64
<i>Мурзалинов Д.О., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н., Комаров Ф.Ф., Акылбеков А.Т., Мудрый А.В., Рябикин Ю.А., Даулетбекова А.К., Гиниятова Ш.Г.</i> Люминесценция пленок нитрида кремния, имплантированных азотом	68
<i>Морзабаев А.К., Гиниятова Ш.Г., Шаханова Г.А., Алимханова К., Айданұлы Б., Махмұтов В.С.</i> Анализ дозовых и электрических характеристик в приземном слое атмосферы г. Астаны	75
<i>Даулетбекова А., Баймуханов З., Козловский А., Гиниятова Ш., Мурзагалиев М., Журкин Е., Наурызбаева Р.</i> Разработка и исследование нанокompозитных материалов на основе трекового темплэйта SiO_2/Si	82
<i>Даулетбекова А., Скуратов В., Маника И., Маникс Я., Забельс Р., Кирилкин Н., Акылбеков А., Гиниятова Ш., Байжуманов М., Сейтбаев А., Кудайбергенова С.</i> Дислокационный механизм затухания люминесценции	91

BULLETIN OF L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY.
PHYSICS.ASTRONOMY SERIES

№1(122)/2018

CONTENTS

PHYSICS

<i>Akylbekov A.T., Bizhanova S.B., Baubekova G.M., Karipbayev Zh.T.</i> The pulsed cathodoluminescence spectra of "pure" crystals	8
<i>Akhmetova G.</i> Comparison of standards and methodology of determining the coverage area of the digital terrestrial broadcasting network DVB-T and DVB-T2	13
<i>Aldongarov A.A., Assilbekova A.M., Irgibaeva I.S., Ermekova Zh.K.</i> Determination of the nature of electronic transitions in the complexes of rhodamine dye and CdS clusters	19
<i>Bekova G.T., Ualikhanova U.A., Yesmakhanova K.R.</i> Conservation laws of the (2+1)-dimensional complex modified Korteweg-de Vries and Maxwell-Bloch equations	28
<i>Borgekov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L.</i> Study of the degradation of metallic nanostructures under the influence of external factors	33
<i>Kadyrzhanov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Petrov A.V.</i> Investigation of the effect of irradiation on the structural properties of Zn nanotubes	40
<i>Kaliyekperov M.E., Kozlovskiy A.L., Kadyrzhanov K.K.</i> Synthesis of thin protective coatings from ionizing radiation based on polymer template	46
<i>Nugmanova G.N., Zhassybayeva M.B.</i> Spin system equivalent to the integrable Fokas-Lenells equation	53
<i>Yesmakhanova K.R., Zhubaeva Zh.S., Tapeyeva S.K.</i> Exact solutions of the (1+1)-dimensional nonlocal nonlinear Schrodinger equation	58
<i>Musabayeva G.K., Akylbekov A.T., Musabayev K.K.</i> On the origin of spontaneous emission of atoms	64
<i>Murzalinov D.O., Vlasukova L.A., Parkhomenko I.N., Komarov F.F., Akilbekov A.T., Mudryi A.V., Ryabikin Yu.A., Giniyatova Sh.G., Dauletbekova A.K.</i> The photoluminescence of nitrogen-implanted silicon nitride films	68
<i>Morzabaev A.K., Giniyatova Sh.G., Shakhanova G.A., Alimkhanova K., Aidanuli B., Makhmutov B.S.</i> Analysis of dose and electrical characteristics in the underground layer of astana atmosphere	75
<i>Dauletbekova A., Baymukhanov Z., Kozlovskii A., Giniyatova Sh., Murzagaliyev M., Zhurkin E., Nauryzbaeva P.</i> Development and research for nanocomposite materials based on track templates of SiO_2/Si	82
<i>Dauletbekova A., Skuratov V., Manika I., Maniks J., Zabels R., Kirilkin N., Akilbekov A., Giniyatova Sh., Baizhumanov M., Seitbayev A., Kudaibergenova S.</i> Dislocation mechanism of fading of luminescence intensity	91

МРНТИ 29.19.21; 29.19.25; 58.09.43; 58.35.06

А. Даулетбекова¹, В. Скуратов², И. Маника³, Я. Маникс³, Р. Забельс³, Н. Кирилкин², А. Акилбеков¹, Ш. Гиниятова¹, М. Байжуманов⁴, А. Сейтбаев¹, С. Кудайбергенова¹

¹ Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³ Институт физики твердого тела, Университет Латвии, Рига, Латвия

⁴ Государственный университет имени Шакарима, Семей, Казахстан

(E-mail: ¹ alma_dauletbek@mail.ru, ² skuratov@jinr.ru, ³ manika@latnet.lv, ³ manik@latnet.lv,

³ rzabels@gmail.com, ² kirilkin@jinr.ru, ¹ akilbekovabdirash@mail.ru, ¹ giniyat_shol@mail.ru,

⁴ baijumanov.muratbek@yandex.kz, ^{1,5} kena3991@mail.ru, ¹ luchik9494@mail.ru)

Дислокационный механизм затухания люминесценции

Аннотация: Изучены зависимости нанотвердости и фотолюминесценции F_2 и F_3^+ центров от глубины в кристаллах LiF, облученных ионами 12 МэВ ^{12}C , 56 МэВ ^{40}Ar и 34 МэВ ^{84}Kr при флюенсах $10^{10} - 10^{15}$ ион/см², с использованием лазерной сканирующей конфокальной микроскопии, травления дислокаций и методом наноиндентирования. Измерения нанотвердости и данные травления дислокаций показали значительный эффект упрочнения и повышенную концентрацию дислокаций и других нанодфектов в области конца ионного пробега с доминирующим вкладом дефектов, образованных механизмом упругих столкновений. Наблюдаемое затухание интенсивности люминесценции при высоких флюенсах связано с интенсивным зарождением дислокаций в качестве ловушек для агрегатных центров окраски. Предложена активирующая роль локального поля напряжений дислокаций и других протяженных дефектов в эволюции структуры повреждений.

Ключевые слова: кристаллы LiF, ионное облучение, профиль повреждений по глубине, F_2 и F_3^+ центры, фотолюминесценция, дислокации, упрочнение

Введение. Быстрые ионные пучки предоставляют большие возможности для обработки твердых тел и могут быть использованы для модификации их структуры, электронных, оптических, механических и других свойств.

Значительные эффекты модификации в кристаллах LiF наблюдаются в условиях интенсивного облучения, обеспечивающих перекрытие ионных треков и образование сложных центров окраски, дефектных агрегатов и расширенных дефектов, поверхностных и объемных наноструктур [1-5]. Среди сложных центров окраски F_2 и F_3^+ агрегатные центры являются доминирующими в LiF, облученных быстрыми тяжелыми ионами при высоком флюенсе и флюксе [2], в то время как ионно-индуцированные призматические дислокационные петли обнаруживаются как основные расширенные дефекты, возникающие при облучении при комнатной температуре [5]. Знание и понимание сложных явлений эволюции структуры на стадии агрегации имеют большое значение для развития технологических применений LiF (лазерных центров окраски, дозиметрии и т.д.). Были предложены новые возможности исследованиями повреждений на поперечных сечениях вдоль ионной траектории. В них содержится информация об особенностях повреждений при вариации потери энергии и вариации вклада механизмов электронных возбуждений упругих столкновений (ядерные) [6-8].

В данной работе были проанализированы глубинные профили сложных центров окраски и дислокации в кристаллах LiF, облученных ионами ^{40}Ar , ^{84}Kr и ^{12}C при различных флюенсах. Поведение сложных центров окраски (F_2 и F_3^+) характеризовалось с помощью люминесцентной спектроскопии [7, 8]. Эволюция нанодфектов на поверхностях глубинных профилей была исследована с помощью химического травления и наноиндентирования, который является методом, чувствительным к дислокациям и другим протяженным дефектам. Внимание было сфокусировано на особенностях повреждений и модификации свойств в области конца ионного пробега, где механизм повреждения изменяется от электронных возбуждений к механизму упругих столкновений (ядерные потери).

1. Материалы и методы.

Для экспериментов использовались кристаллы LiF высокого качества, выращенные из расплава в инертной атмосфере. Пластины LiF размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной около 1 мм, сколотые вдоль плоскости (001), облучались на циклотроне DC-60 (Астана, Казахстан) ионами 33.8 МэВ ^{84}Kr , 56 МэВ ^{40}Ar и 11.8 МэВ ^{12}C . Толщина образцов для всех облучений была существенно больше, чем длина пробега иона (R). Облучения проводились при комнатной температуре до флюенсов от 10^{10} до 10^{15} ион/см 2 . Плотность тока ионного пучка составляла 10 нА/см^2 , что достаточно низко для эффектов нагрева мишени. Глубина проникновения иона и потери энергии были рассчитаны кодом SRIM 2013.

Конфокальный микроскоп LCSM NTEGRA Spectra использовался для получения спектров фотолюминесценции с глубокой разрешающей способностью F_2 и F_3^+ центров окраски. В качестве источника возбуждения использовался лазер с длиной волны 473 нм. Чтобы предотвратить повреждение образцов LiF, был установлен непрерывно изменяемый ND-фильтр с диапазоном 1-0.001 на минимальное значение, чтобы ограничить выходную мощность лазерного источника. Пьезоплатформа XYZ микроскопа позволила сканировать область до $100 \times 100 \text{ мкм}$ в плоскости X-Y и до 7 мкм в направлении Z с минимальным шагом 0.01 мкм. Пространственное разрешение для плоскости X-Y измерили стандартной калибровочной решеткой TGS-1 с квадратным профилем и определили примерно 0.3 мкм. Каждый образец облученных кристаллов был установлен на платформе XYZ с направлением проникновения ионов параллельно оси X и сканировался вдоль ионного трека с шагом 0.33 мкм. Сканирование выполнялось по оси Y с шагом 1 мкм, а затем результаты были усреднены.

Наноиндентирование выполняли с помощью инструментального блока индентора G200 (Agilent) с использованием алмазного наконечника Берковича на воздухе при комнатной температуре. Функция площади наконечника индентора была откалибрована с использованием контрольного образца диоксида кремния. Использовали основную методику наноиндентирования с глубиной проникновения индентора 150 нм при скорости деформации 0.05 с^{-1} . Твердость и модуль Юнга вычислялись по методу Оливера-Фарра [9]. Для характеристики ионно-индуцированного повреждения вдоль ионного пробега, образцы скальвались вдоль направления ионного пучка, тем самым открывая новые поверхности для индентирования. Расстояние между облученной поверхностью и отпечатком на поверхности поперечного сечения определялось с помощью оптической микроскопии.

Дислокационная структура в облученных образцах LiF была обнаружена в результате короткого ($\sim 1 \text{ с}$) селективного химического травления в насыщенном водном растворе FeCl_3 и последующей визуализации с помощью атомно-силового микроскопа СРП (Veeco) в полуконтактном режиме.

2. Результаты.

2.1 Фотолюминесценция F_2 и F_3^+ центров окраски по глубине Для всех исследованных ионов электронные потери энергии в LiF не превышают порога 10 кэВ/нм для формирования сердцевин (core) трека (рис. 1), поэтому треки состоят из следа простых и агрегированных центров окраски вместе с дополнительными дырочными центрами [1]. F_2 и F_3^+ центры окраски, очень близкие по спектру оптического поглощения (полоса 445 нм), могут быть точно различены измерениями люминесценции [7, 8]. Спектр излучения фотолюминесценции имеет два пика при 670 нм (F_2) и 530 нм (F_3^+). В качестве примера показана люминесценция LiF, облученного ионами 33.6 МэВ ^{84}Kr при различных флюенсах, на рис.2.

Полученные с поперечного сечения данные интенсивности люминесценции, связанные с F_2 и F_3^+ центрами для всех исследованных ионов, представлены на рис.3. Максимальная глубина, с которой наблюдается сигнал люминесценции, почти совпадает с пробегом ионов, рассчитанных программой SRIM, и с глубиной поврежденной зоны, выявленной химическим травлением.

Сигнал люминесценции при сравнительно низких флюенсах, когда формируются преимущественно отдельные ионные треки, постепенно увеличивается и коррелирует с электронными потерями энергии по глубине профиля (рис. 3). Как известно, концентрация

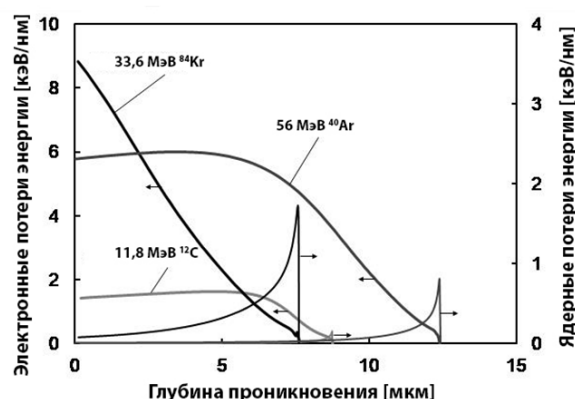


Рисунок 1 – Электронные (сплошная линия) и ядерные (пунктирная линия) потери энергии ионов ^{84}Kr , ^{40}Ar и ^{12}C в LiF, рассчитанные с помощью SRIM

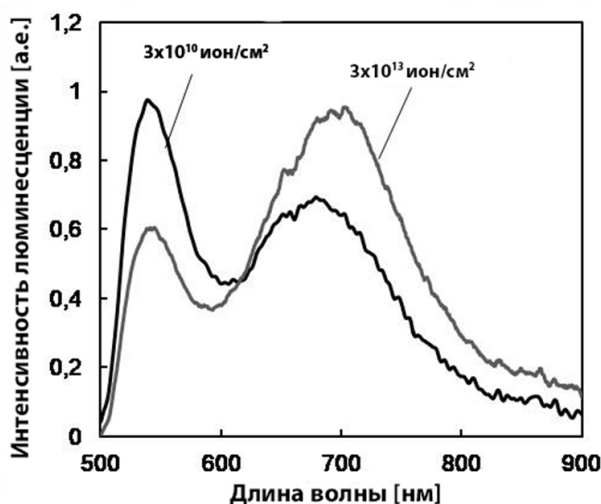


Рисунок 2 – Зависимость нормированной интенсивности люминесценции F_3^+ (530 нм) и F_2 (670 нм) центров для LiF, облученного ионами 33.6 МэВ ^{84}Kr при различных флюенсах. Возбуждение проводилось лазером с длиной волны 473 нм

центров окраски F-типа во фториде лития определяется энергией, запасенной в электронной подсистеме. Следовательно, при низких флюенсах в нашем исследованном диапазоне энергий ионов обнаружена эмиссия, связанная с центрами окраски F_3^+ и F_2 вблизи поверхности, где максимальны электронные потери энергии. Поэтому выход люминесценции продолжает увеличиваться в любой точке облучаемого слоя до тех пор, пока поглощенная доза не достигнет уровня, когда нерадиационный распад возбужденных состояний в центрах окраски будет доминировать над радиационными переходами. Поэтому при более высоких флюенсах, когда ионные треки перекрываются, сигнал люминесценции смещается в область конца пробега, свидетельствуя о значительном вкладе ядерных потерь энергии в формирование сложных центров окраски. Основной особенностью является затухание интенсивности люминесценции, которая начинается при высоких флюенсах (около 10^{13} ион/см²), когда ионные треки сильно перекрываются. Затухание люминесценции при облучении высоким флюенсом согласуется с более ранними результатами по фотолюминесценции LiF, облученного быстрыми тяжелыми ионами [8], а также с измерением концентрации центров окраски (F и F_2) с помощью оптической абсорбционной спектроскопии [10]. Предлагаются различные объяснения этого эффекта; однако его механизм не полностью понят.

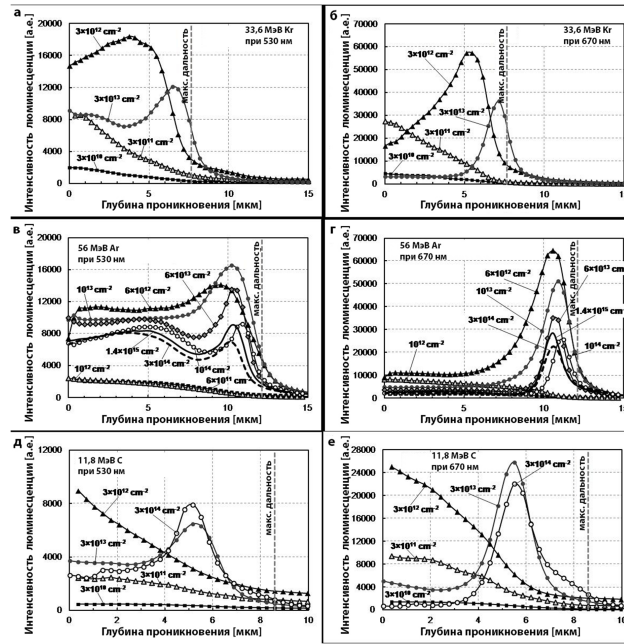


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности люминесценции при 530 нм и 670 нм от глубины профиля для образцов, облученных ионами ^{84}Kr (а, б), ^{40}Ag (в, г) и ^{12}C (д, е). Конец трека отмечен пунктирной линией

2.2 Зависимость ионно-индуцированного упрочнения и дислокационной структуры от глубины

Экстраполяция экспериментальных данных для ионов Kr, Ag и C, ионно-индуцированное повышение твердости в LiF наблюдается при флюенсах выше 1×10^{10} , 5×10^{10} и 6×10^{11} ион/см² соответственно. График твердости и потери энергии для образцов LiF, облученных ионами Kr, Ag и C, от глубины показаны на рис.4. Эффект упрочнения увеличивается с флюенсом и приближается к насыщению при флюенсах около 10^{15} ион/см², поскольку твердость примерно в два раза превышает твердость необлученного кристалла. График твердости от глубины в большей части ионного пробега коррелируют с электронными потерями энергии. Исключением является область конца трека, где сохраняются высокие значения твердости, несмотря на уменьшение потерь электронной энергии до низких значений. В результате мы можем заключить, что значительный вклад в упрочнение приходится на повреждения, создаваемые ядерным тормозным механизмом, который в этой области достигает максимума. Как видно из кривых графика глубины, вклад ядерных потерь в упрочнение для тяжелых ионов проявляется при флюенсе выше 3×10^{12} ион/см², тогда как для более легких ионов C требуется на порядок более высокий флюенс.

Мы сравнили зависимость от дозы ионно-индуцированного упрочнения для образцов LiF: облученного ионами Ag в двух положениях графика глубины: (1) - на максимуме Брэгга (глубина 4 мкм), где преобладают электронные потери энергии и (2) - близкое к концу трека (глубина 11 мкм), где вклад ядерных потерь становится доминирующим (рис. 4г). Результаты показывают, что с помощью обоих механизмов может быть достигнуто сильное упрочнение при соответствующем высоком флюенсе. Однако кривая упрочнения, соответствующая потерям ядерной энергии, смещается в сторону более высоких флюенсов, свидетельствуя о том, что создание повреждений экситонным механизмом, более эффективно, чем механизм упругого столкновения (ядерного).

Исследование структуры повреждений с помощью химического травления обнаружило ионно-индуцированные дислокационные петли, как основные протяженные дефекты, созданные в LiF облученного ионами Kr, Ag и C. На рис.5а показано АСМ-изображение протравленных дислокационных ямок, созданных ионами C. Эволюция дислокационной структуры сильно зависит от флюенса и потери энергии ионов. Для более тяжелых ионов Kr при низких флюенсах, в начале трека, где электронная потеря энергии превышает 4-5кэВ/нм,

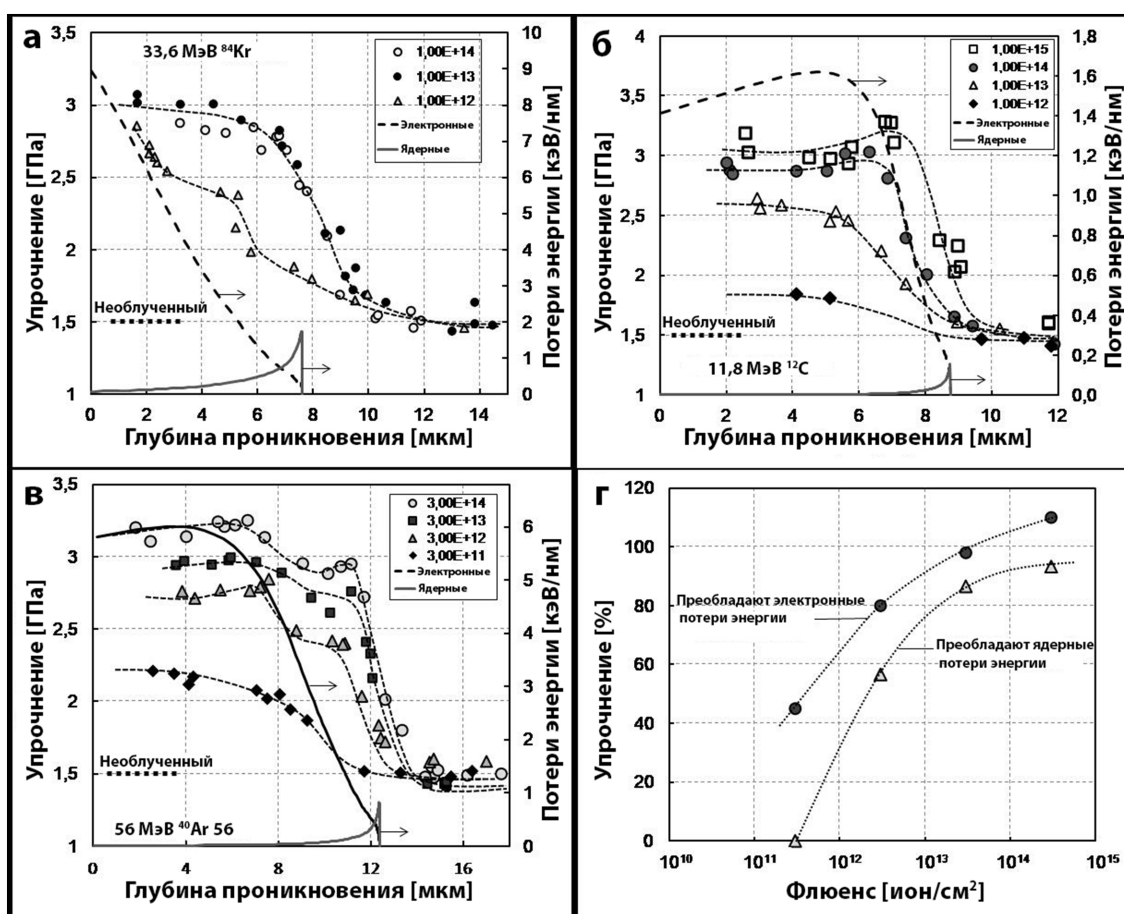


Рисунок 4 – Зависимость твердости от глубины в кристаллах LiF, облученных ионами (а) - ^{84}Kr , (б) - ^{12}C ионами (с) - ^{40}Ar и (д) - зависимость упрочнения от флюенса для ионов ^{40}Ar на глубине 4 мкм, где преобладают электронные потери энергии и на глубине 11 мкм, где доминируют ядерные потери энергии

формируется хорошо травимая дислокационная картина, а при более низких потерях энергии - скругленные ямки травления, которые относятся к очень маленьким дислокационным петлям или к их зародышам (рис. 5б). При высоких флюенсах дислокационные ямки травления образуются на всей длине ионного пробега, однако их концентрация возрастает и размер уменьшается в области конца трека (рис. 5в). Такая структура, богатая дислокациями на всем ионном пробеге, наблюдалась также в случае облучения ионами Kr и C. Удлинение ямок травления вдоль направления ионного пучка (рис. 5б) характеризует размер дислокационных петель [5]. Тем не менее, разрешение метода травления слишком низкое для точных измерений. Грубые оценки, выполненные для ионов Ar (рис.5в), дают диапазон диаметров дислокационных петель от 7 нм до 60 нм. Их концентрация при высоких температурах превышает 10^{10} см $^{-2}$.

Линии смещения (ряды дислокаций) вдоль плоскостей (110), созданные разбуханием из-за напряжений [11], наблюдаются в исходном кристалле вблизи границы раздела между облученными и необлученными областями.

Результат, связанный с ионно-индуцированным образованием дислокаций (и, возможно, и других агрегатов с наноразмерами) в качестве основной причины упрочнения, согласуется с нашими более ранними исследованиями структур повреждений, созданных облучением при комнатной температуре быстрыми ионами [4, 5]. Более ранние исследования подтверждают, что никакого заметного эффекта в упрочнении одними и теми же центрами окраски не наблюдается [12].

3. Обсуждение. Установлено образование дислокаций как основных расширенных дефектов, созданных в LiF облучением при комнатной температуре быстрыми тяжелыми ионами [4, 5, 12]. Как правило, ионы с электронной потерей энергии ниже 10 кэВ/нм, используемые в данном исследовании, при высоких флюенсах, создают небольшие

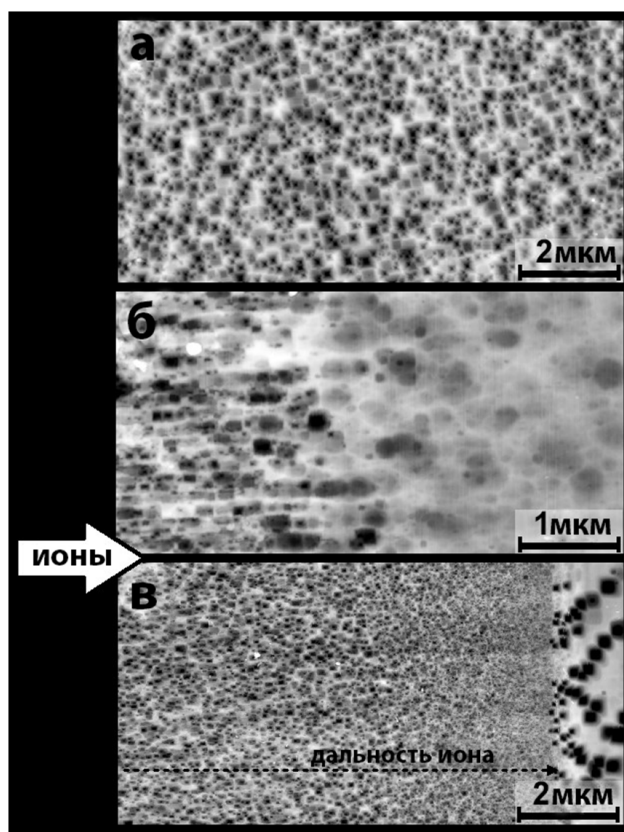


Рисунок 5 – Ямки травления ионно-индуцированных дислокаций на поверхности LiF, облученных ионами ^{12}C при 10^{13} ион/см 2 , (б) - на поверхности профиля, облученной ионами ^{84}Kr при 10^{12} ион/см 2 и (в) - на поверхности профиля, облученной ионами ^{40}Ag при 3×10^{14} ион/см 2 . Направление ионного пучка показано стрелкой и пробег иона пунктирной линией

дислокационные петли, концентрация которых имеет тенденцию превышать 10^{10} см $^{-2}$. Накопление дислокаций как сильных препятствий для пластической деформации приводит к значительному эффекту ионно-индуцированного упрочнения. Оба, образование дислокаций и упрочнение появляются на ранней стадии перекрытия треков [13].

Принимая во внимание высокую подвижность междоузельников, могут образовываться преимущественно дислокационные петли междоузельного типа. Идеальная призматическая дислокационная петля в ионных кристаллах требует агрегации равного количества анионных и катионных междоузельных элементов. Однако быстрые ионы в щелочных галогенидах создают дефекты экситонным механизмом главным образом в анионной подрешетке, а катионная подрешетка остается неповрежденной. Хоббс предложил модель, в которой происходит рост дислокаций, когда двух-галоидная молекула располагается в решетки и в результате вытесняет анион и катион, необходимые для идеальных дислокаций [14, 15]. Такое воздействие становится возможным в поле локальных напряжений, на краях дислокационных петель и других наноразмерных дефектах [14].

Основными воздействием на создание агрегатных центров окраски при низких флюенсах являются взаимодействие центров F-типа с анионными вакансиями и соответствующими процессами обмена заряда [2, 7]. Эффекты напряжений также наблюдаются при образовании агрегатных центров окраски [8].

В условиях перекрытия треков, ионы попадают в предварительно облученные области, где создаются новые радиационные дефекты, а также различные структурные превращения (агрегация или разложение, создание или рекомбинация и т.д.) в системе уже существующих дефектов [18, 19].

Эволюция дислокационной структуры предопределяет эффект упрочнения. При самых высоких флюенсах (около 10^{15} ион/см 2) твердость достигает насыщения из-за равновесия

между процессами образования повреждений и рекомбинации и приближается к верхнему пределу для ионно-облученного LiF (3.5-4 ГПа) [20]. Доза облучения при этом флюенсе была 3ГГр для ионов Kг, 2.7 ГГр для ионов Ag и 819 МГр для ионов С.

Учитывая возможное взаимодействие процессов формирования агрегатных центров окраски и дислокаций, следует учитывать, что дислокации в щелочных галогенидах и других материалах служат ловушками для радиационных дефектов [16], а при высокой концентрации дислокаций этот эффект может играть значительную роль. Зависимость упрочнения от глубины и травление дислокаций показывают самую высокую плотность дислокаций на максимуме энергии Брэгга для электронных потерь энергии и в области конца трека.

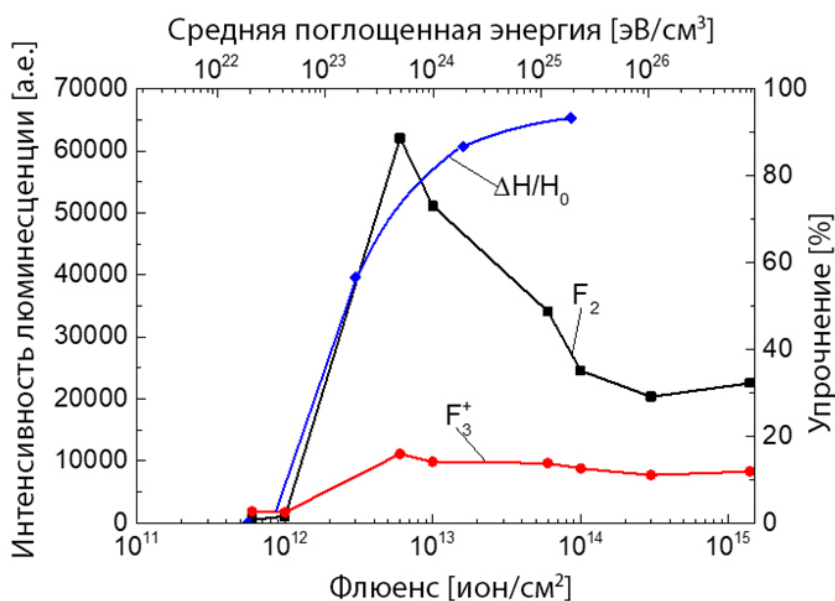


Рисунок 6 – Зависимость от дозы упрочнения ($\Delta H / H_0$) и интенсивности люминесценции F_2 и F_3^+ центров в LiF, облученных ионами ^{40}Ag . Данные с кривых графика (рис. 3в, г и рис. 4г) на постоянной глубине (11 мкм)

Проведено сравнение зависимостей ионно-индуцированного упрочнения и интенсивности люминесценции F_2 и F_3^+ центров от глубины для области конца трека. На рис. 6 приведены данные для образцов LiF, облученных Ag. Наблюдается значительное снижение интенсивности люминесценции для агрегатных центров при флюенсах выше 6×10^{12} ион/см², тогда как твердость увеличивается и достигает насыщения. Методом оптической абсорбционной спектроскопии наблюдалось уменьшение концентрации центра окраски в том же диапазоне поглощенной энергии [10]. Очевидно, что такой эффект может быть связан с изменением доминирующего механизма торможения ионов от электронного к ядерному. В случае электронных потерь энергии повреждение происходит главным образом в анионной подрешетке, в то время как для ядерного механизма повреждение возникает как в анионной, так и в катионной подрешетках. В результате облегчается зарождение междоузельных дефектов, а также дислокационных петель. В области конца трека структурное исследование показывает значительное увеличение плотности дислокаций (рис. 5в), которые могут служить потенциальными ловушками и местами сегрегации для центров окраски и примесей. Поэтому взаимодействие агрегатных центров окраски с дислокациями и их превращение в нелюминесцентное состояние предлагается в качестве основной причины затухания сигнала люминесценции в области конца трека. Предложена активирующая роль локальных полей напряжений при таком преобразовании [8].

Закключение. - Профили глубины ионно-индуцированного повреждения в LiF были изучены с помощью фотолюминесценции агрегатных F_2 и F_3^+ центров окраски, травления дислокаций и наноиндентирования.

- Для LiF, облученного ионами 34 МэВ ^{84}Kr , 56 МэВ ^{40}Ar и 12 МэВ ^{12}C с высоким флюенсом, наблюдался заметный вклад ядерных потерь при повреждениях и упрочнении. Эффект доминирует в области конца трека при флюенсах выше 10^{13} ион/см².

- Наблюдалось затухание интенсивности люминесценции F_2 и F_3^+ агрегатных центров окраски в конце трека. Эффект связан с образованием нелюминесцентных агломератов путем сегрегации агрегатных центров окраски на ионно-индуцированных дислокациях в качестве ловушек для радиационных дефектов. Предложена активирующая роль локального поля напряжений с расширенными дефектами в таких преобразованиях.

Благодарности: А. Даулетбекова, А. Акилбеков, Ш. Гиниятова, А. Сейтбаев и С. Кудайбергенова выражают благодарность Министерству образования и науки Республики Казахстан за грант (AP05134257)

Список литературы

- 1 Schwartz K., Trautmann C., Steckenreiter T., Geiβ O., Kramer M. Damage and track morphology in LiF crystals irradiated with GeV ions // Phys. Rev. - 1998. - V.58. - P. 11232-11240.
- 2 Thevenard P., Perez A., Davenas J., Dupuy C.H.S. Coloration of LiF by 56 MeV α -particles and 28 MeV deuterons. II. F_2^+ centre evolution // Phys. Stat. Sol.(a). - 1972. - V.10. - P.67-72.
- 3 Toulemonde M., Trautmann C., Balanzat E., Hjort K., Weidinger A. Track formation and fabrication of nanostructures with MeV-ion beams // Nucl. Instr.Meth. - 2004. - V.B216. -P. 1-8.
- 4 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 // Nucl. Instr. Meth. - 2012. - V. B.282. - P. 81-84.
- 5 Zabels R., Manika I., Schwartz K., Maniks J., Grants R. MeV-GeV ion induced dislocation loops in LiF crystals // Nucl. Instr. Meth. - 2014. - V. B326. - P. 318-321.
- 6 Perez A., Balanzat E., Dural J. Experimental study of point defect creation in high-energy heavy-ion tracks // Phys. Rev. - 1990. - V.B41. - P. 3943-3950.
- 7 Skuratov V.A., Jong Gun Kim., Stano J., Zagorski D.L. In situ luminescence as monitor of radiation damage underswift heavy ion irradiation // Nucl. Instrum. Methods - 2006. - V. B245. - P. 194-200.
- 8 Skuratov V.A., Kirilkin N.S., Kovalev Yu.S., Strukova T.S., Havanscak K. Depth-resolved photo- and ionoluminescence of LiF and Al_2O_3 // Nucl. Instr. Meth. - 2012. - V. B.245. - P. 194-200.
- 9 Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // J. Mater. Res. - 1992. - V.B.7. - P. 1564-1583.
- 10 Dauletbekova A., Schwartz K., Sorokin M.V., Baizhumanov M., Akilbekov A., Zdorovets M. Energy loss effect on color center creation in LiF crystals under irradiation with ^{12}C , ^{14}N , ^{40}Ar , ^{84}Kr , and ^{130}Xe ions // Nucl. Instr. Meth. - 2015. - V. B.359. - P. 53-56.
- 11 Manika I., Maniks J., Schwartz K., Toulemonde M., Trautmann C. Hardening and long-range stress formation in lithium fluoride induced by energetic ions // Nucl. Instr. Meth. - 2003. - V. B.209. - P. 93-97.
- 12 Manika I., Maniks J., Schwartz K. Swift-ion-induced hardening and reduction of dislocation mobility in LiF crystal // Journal of Physics D: Applied Physics - 2008. - V. B.41. -P. 074008.
- 13 Zabels R., Manika I., Schwartz K., Maniks J., Dauletbekova A., Grants R., Baizhumanov M., Zdorovets M. Formation of dislocations and hardening of LiF under high-dose irradiation with 5-21 MeV ^{12}C ions // Appl. Phys. - 2017. - V. A.123. art. Nr. 320.
- 14 Hobbs L. W., Hughes A. E. and Pooley D. A study of interstitial clusters in irradiated alkali halides using direct electron microscopy // Proc. R. Soc. Lond. - 1973. - V. A.332. - P. 167-185.
- 15 Catlow C. R. A., Diller K. M., Hobbs L. W. Irradiation-induced defects in alkali halide crystals // Phil. Mag. - 1980. - V. A.42. - P. 123-150.
- 16 Gilman J.J., Johnston W.G. Dislocations, point-defect clusters, and cavities in neutron irradiated LiF crystals // J.Appl. Phys. - 1958. - V. B.29. - P. 877-888.
- 17 Gilman J.J., Johnston W.G., Sears G.W. Dislocation etch pit formation in lithium fluoride // J. Appl. Phys. - 1958. - V. B.29. - P. 747-754.
- 18 Zinkle S.J., Skuratov V.A. Track formation and dislocation loop interaction in spinel irradiated with swift heavy ions // Nucl. Instr. Meth. - 1998. - V. B.141. - P. 737-746.
- 19 Skuratov V.A., Abu-AlAzam S.M., Altynov V.A. (1 - 3) MeV/amu heavy ion irradiation effects on optical properties of Al_2O_3 // Mater. Sci. Forum - 1997. - V. B.248-249. - P. 399-403.
- 20 Maniks J., Zabels R., Manika I. Shear banding mechanism of plastic deformation in LiF irradiated with swift heavy ions // IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng. - 2012. - B. 38. -P. 012017.

А. Даулетбекова¹, В. Скуратов², И. Маника³, Я. Маникс³, Р. Забельс³, Н. Кирилкин², А. Ақылбеков¹, Ш. Гиниятова¹, М. Байжуманов⁴, А. Сейтбаев¹, С. Қудайбергенова¹

¹ Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

² Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

³ Латвия университеті қатты дене физикасы институты, Рига, Латвия

⁴ Шәкәрім атындағы мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

Люминесценцияның өшуінің дислокациялану механизмі

Аннотация: 12 МэВ ¹²С, 56 МэВ ⁴⁰Аг және 34 МэВ ⁸⁴Кг иондарымен сәулелендірілген 10¹⁰ – 10¹⁵ ион/см² флюенсте LiF кристалдарындағы F₂ және F₃⁺ центрлері болуындағы фотолюминесценция мен наноқатандығының тәуелділіктері лазерлік сканерлеуші конфокальді микроскопты, дислокацияларды өңдеу және наноиндендор әдістерін пайдалану арқылы зерттелді.

Наноқатандықты өлшеу және дислокациялық өңдеудің мәндері көрсеткендей, дислокация концентрацияның ұлғаюы мен елеулі қатаю эффектісі, басқа да наноақаулар ионның жүру жолының соңғы аймағында серпімді соқтығысу механизмінің әсерінен ақаулардың көп үлесі пайда болады. Жоғарғы флюенсте байқалатын люминесценциялық қарқындылықтың өшуі, агрегатты боялу центрлері тұзақ тәрізді қарқынды дислокацияның пайда болуына байланысты. Құрылымның зақымдану сатысындағы басқа да кеңейтілген ақаулардың және дислокацияның кернеулік жергілікті өрісінің негізгі орны ұсынылды.

Түйін сөздер: LiF кристалдары, иондармен сәулеленуі, зақымдану тереңдігінің көлденең қимасы, F₂ және F₃⁺ центрлері, фотолюминесценция, дислокация, қатаю.

A. Dauletbekova¹, V. Skuratov², I. Manika³, J. Maniks³, R. Zabels³, N. Kirilkin², A. Akilbekov¹, Sh. Giniyatova¹, M. Baizhumanov⁴, A. Seitbayev¹, S. Kudaibergenova¹

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² Joint institute for Nuclear Research, Dubna, Russian

³ Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga, Latvia

⁴ State University named after Shakarim, Semei, Kazakhstan

Dislocation mechanism of fading of luminescence intensity

Abstract: Depth profiles of nanohardness and photoluminescence of F₂ and F₃⁺ centers in LiF crystals irradiated with 12 MeV ¹²C, 56 MeV ⁴⁰ and 34 MeV ⁸⁴Kr ions at fluences 10¹⁰ – 10¹⁵ ions/cm² have been studied using laser scanning confocal microscopy, dislocation etching and nanoindentation techniques. The depth-resolved nanohardness measurements and dislocation etching data have shown a remarkable hardening effect and increased concentration of dislocations and other nanodefects in the end-of-range region with dominant contribution of defects formed via elastic collision (nuclear loss) mechanism. The observed fading of luminescence intensity at high fluences is related to intense nucleation of dislocations as sinks for aggregate color centers. An activating role of local stress field of dislocations and other extended defects in the evolution of damage structures is suggested.

Keywords: LiF crystals, ion irradiation, depth profile of damage, F₂ and F₃⁺ centers, photoluminescence, dislocations, hardening.

References

- Schwartz K., Trautmann C., Steckenreiter T., Geiβ O., Kramer M. Damage and track morphology in LiF crystals irradiated with GeV ions. Phys. Rev, **58**, 11232-11240, (1998).
- Thevenard P., Perez A., Davenas J., Dupuy C.H.S. Coloration of LiF by 56 MeV α -particles and 28 MeV deuterons. II. F₂⁺ centre evolution. Phys. Stat. Sol.(a), **10**, 67-72, (1972).
- Toulemonde M., Trautmann C., Balanzat E., Hjort K., Weidinger A. Track formation and fabrication of nanostructures with MeV-ion beams. Nucl. Instr.Meth. **B.216**, 1-8, (2004).
- 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. Nucl. Instr. Meth. **B.282**, 81-84, (2012).
- Zabels R., Manika I., Schwartz K., Maniks J., Grants R. MeV-GeV ion induced dislocation loops in LiF crystals. Nucl. Instr. Meth. **B.326**, 318-321, (2014).
- Perez A., Balanzat E., Dural J. Experimental study of point defect creation in high-energy heavy-ion tracks. Phys. Rev. **B.41**, 3943-3950, (1990).
- Skuratov V.A., Jong Gun Kim., Stano J., Zagorski D.L. In situ luminescence as monitor of radiation damage underswift heavy ion irradiation. Nucl. Instrum. Methods, **B.245**, 194-200, (2006).
- Skuratov V.A., Kirilkin N.S., Kovalev Yu.S., Strukova T.S., Havanscak K. Depth-resolved photo- and ionoluminescence of LiF and Al₂O₃. Nucl. Instr. Meth. **B.245**, 194-200, (2012). Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. J. Mater. Res. **B.7**, 1564-1583, (1992).
- Dauletbekova A., Schwartz K., Sorokin M.V., Baizhumanov M., Akilbekov A., Zdorovets M. Energy loss effect on color center creation in LiF crystals under irradiation with ¹²C, ¹⁴N, ⁴⁰Ar, ⁸⁴Kr, and ¹³⁰Xe ions. Nucl. Instr. Meth. **B.359**, 53-56, (2015)
- Manika I., Maniks J., Schwartz K., Toulemonde M., Trautmann C. Hardening and long-range stress formation in lithium fluoride induced by energetic ions. Nucl. Instr. Meth. **B.209**, 93-97, (2003).

- 11 Manika I., Maniks J., Schwartz K. Swift-ion-induced hardening and reduction of dislocation mobility in LiF crystal. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **B.41**, 074008, (2008).
- 12 Zabels R., Manika I., Schwartz K., Maniks J., Dauletbekova A., Grants R., Baizhumanov M., Zdorovets M. Formation of dislocations and hardening of LiF under high-dose irradiation with 5-21 MeV ¹²C ions. *Appl. Phys.* **A.123**, 320, (2017).
- 13 Hobbs L. W., Hughes A. E. and Pooley D. A study of interstitial clusters in irradiated alkali halides using direct electron microscopy. *Proc. R. Soc. Lond.* **A.332**, 167-185, (1973).
- 14 Catlow C. R. A., Diller K. M., Hobbs L. W. Irradiation-induced defects in alkali halide crystals. *Phil. Mag.* **A.42**, 123-150, (1980).
- 15 Gilman J.J., Johnston W.G. Dislocations, point-defect clusters, and cavities in neutron irradiated LiF crystals. *J. Appl. Phys.* **B.29**, 877-888, (1958).
- 16 Gilman J.J., Johnston W.G., Sears G.W. Dislocation etch pit formation in lithium fluoride. *J. Appl. Phys.* **B.29**, 747-754, (1958).
- 17 Zinkle S.J., Skuratov V.A. Track formation and dislocation loop interaction in spinel irradiated with swift heavy ions. *Nucl. Instr. Meth.* **B.141**, 737-746, (1998).
- 18 Skuratov V.A., Abu-ALAzam S.M., Altynov V.A. (1 - 3) MeV/amu heavy ion irradiation effects on optical properties of Al₂O₃. *Mater. Sci. Forum*, **B.248-249**, 399-403, (1997).
- 19 Maniks J., Zabels R., Manika I. Shear banding mechanism of plastic deformation in LiF irradiated with swift heavy ions. *IOP Conf. Ser., Mater. Sci. Eng.* **B.38**, 012017, (2012).

Сведения об авторах:

Даулетбекова А. - Физика-математика ғылымдарының кандидаты, техникалық физика кафедрасының профессоры, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұхан көшесі 13, Астана, Қазақстан.

Скуратов В. - Физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Г.Н.Флеров атындағы ядролық реакциялар зертханасы секторының меңгерушісі, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Жолио Кюри көшесі 6, Дубна, Ресей.

Маника И. - Физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, қатты дене физикасы институтының морфологиялық және құрылымдық зерттеу зертханасының аға ғылыми қызметкері, Латвия университеті, Кенгарага көшесі 8, Рига, Латвия.

Маникс Я. - Физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, қатты дене физикасы институтының морфологиялық және құрылымдық зерттеу зертханасының аға ғылыми қызметкері, Латвия университеті, Кенгарага көшесі 8, Рига, Латвия.

Забельс Р. - PhD, қатты дене физикасы институтының морфологиялық және құрылымдық зерттеу зертханасының аға ғылыми қызметкері, Латвия университеті, Кенгарага көшесі 8, Рига, Латвия.

Кирилкин Н. - Г.Н.Флеров атындағы ядролық реакциялар зертханасының қолданбалы физика орталығының инженері, Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей.

Ақылбеков А. - Физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, физика-техникалық факультетінің деканы, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұхан көшесі 13, Астана, Қазақстан.

Гиниятова Ш. - Физика-математика ғылымдарының кандидаты, доцент, физика-техникалық факультетінің декан орынбасары, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұхан көшесі 13, Астана, Қазақстан.

Байжұманов М. - PhD докторы, Шәкәрім атындағы мемлекеттік университеті аға оқытушысы, Қашаған көшесі 1, Семей, Қазақстан.

Сейтбаев А. - PhD докторанты, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұхан көшесі 13, Астана, Қазақстан.

Құдайбергенова С. - магистрант, Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұхан көшесі 13, Астана, Қазақстан.

Dauletbekova A. - Candidate of physical and mathematical sciences, professor of the Department of technical physics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymuhan str. 13, Astana, Kazakhstan.

Skuratov V. - Head of sector of G.N. Flerov Laboratory of nuclear reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Joliot Curie str. 6. Dubna, Russia.

Manika I. - Doctor of Sciences, professor, Senior Researcher of the Laboratory of Materials Morphology and Structure Investigations of the Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Kengaraga str. 8, Riga, Latvia.

Maniks J. - Doctor of Sciences, professor, Senior Researcher of the Laboratory of Materials Morphology and Structure Investigations of the Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Kengaraga str. 8, Riga, Latvia.

Zabels R. - PhD, Senior Researcher of the Laboratory of Materials Morphology and Structure Investigations of the Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Kengaraga str. 8, Riga, Latvia.

Kirilkin N. - Engineer of the Center of Applied Physics FLNR, Joint institute for Nuclear Research, Dubna, Russia.

Akilbekov A. - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Dean of the Department of Physics and Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymuhan str. 13, Astana, Kazakhstan.

Giniyatova Sh. - Candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Deputy Dean of the Department of Physics and Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymuhan str. 13, Astana, Kazakhstan.

Baizhumanov M. - PhD, Senior Lecturer of State University named after Shakarim, Kashagan str. 1, Semei, Kazakhstan.

Seitbayev A. - PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymuhan str. 13, Astana, Kazakhstan.

Kudaibergenova S. - Master student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazhymuhan str. 13, Astana, Kazakhstan.

Поступила в редакцию 15.01.2018