

---

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНАҒЫ  
ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ  
УНИВЕРСИТЕТІ



ЕВРАЗИЙСКИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Л.Н. ГУМИЛЕВА

L.N. GUMILYOV EURASIAN  
NATIONAL UNIVERSITY

# ХАБАРШЫ

1995 жылдың қантарынан жылына 6 рет шығады

I бөлім

№ 6 (97) · 2013

# ВЕСТНИК

выходит 6 раз в год с января 1995г.

I часть

# HERALD

Since 1995

I part

Астана

# ФИЗИКА



УДК 538.971

А.В.Русакова, А.Т. Акилбеков

## Образование центров окраски в кристаллах LiF под воздействием пучков ионов высоких энергий натрия и криптона

(Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, г. Астана, Казахстан)

В данной статье с использованием оптической спектроскопии и люминесценции изучались кристаллы фторида лития, облученные ионами азота и криптона. Как для легких, так и для тяжелых ионов была найдена зависимость средней концентрации F центров окраски от флюенса. Было показано, что максимальная концентрация для F центров выражена сильнее при облучении ионами  $^{14}\text{N}$ . Использование метода люминесценции позволило различить и разделить  $F_3^+$  и  $F_2$  центры окраски.

**Ключевые слова:** ионные кристаллы, центры окраски, накопление дефектов, высокоэнергетические ионы.

### Введение

Радиационные повреждения в кристаллах LiF являются предметом интенсивного изучения начиная с 70-х годов прошлого столетия [1-4]. Тем не менее, новые экспериментальные данные выявляют новые эффекты, возникающие при ионном облучении [5 - 8].

Облучение с высокими дозами повышает концентрацию дефектов и обеспечивает их взаимодействие друг с другом. Кроме того, интенсивность образования и рост агрегатных центров также может уменьшать количество единичных F центров при высоких флюенсах облучения. Этот эффект наблюдается как при облучении электронами, нейтронами и  $\gamma$  – лучами, так и при облучении ионами [9]. Однако ионное облучение дает важное преимущество в возможности использования оптической спектроскопии для оценки концентрации F центров даже при высоких дозах облучения (энергии поглощения) [2, 5].

### Экспериментальная часть

В качестве исследуемых образцов были выбраны кристаллы LiF, выращенные в инертной атмосфере в оптическом институте, г.Санкт-Петербург. Кристаллы LiF имели размеры  $1 \times 1 \text{ см}^2$  и толщину около 1мм; были сколотые по плоскости (001). Кристаллы были облучены на циклотроне ДЦ-60 (Астана, Казахстан) высокоэнергетическими ионами  $^{14}\text{Ni}$  и  $^{84}\text{Kr}$ . Режимы облучения даны в табл.1.

Таблица 1. Параметры облучения выбранными ионами [10]

| Ион                    | Энергия, $E_{ion}$ , МэВ | Пробег R, мкм | $E_{ion}/R$ , кэВ/нм |
|------------------------|--------------------------|---------------|----------------------|
| $^{14}\text{N}^{2+}$   | 14                       | 8,65          | 1,62                 |
| $^{14}\text{N}^{3+}$   | 23                       | 14,13         | 1,63                 |
| $^{84}\text{Kr}^{14+}$ | 150                      | 17,76         | 8,45                 |

Толщина образцов во время облучения ионами была больше, чем пробег ионов [10]. Облучение было проведено при комнатной температуре и флюенсе от  $10^{10}$  до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, при постоянном токе ионного пучка  $10 \text{ нА/см}^2$ , что соответствует плотности потока  $3,12 \times 10^{10}$  (для  $^{14}\text{N}^{2+}$ ),  $2,08 \times 10^{10}$  (для  $^{14}\text{N}^{3+}$ ) и  $4,46 \times 10^9$  ион/см<sup>2</sup>с (для

$^{84}\text{Kr}^{14+}$ ). Держатель образцов охлаждался проточной водой комнатной температуры, поэтому нагревание кристаллов во время облучения было незначительным.

Для обоих ионов (азота и криптона) энергетические потери энергии не превышали порог образования ядра трека [2]. Однако интересно заметить, что при высоких флюенсах облучения кристаллов LiF или ионами  $^{14}\text{N}$  или ионами  $^{84}\text{Kr}$ , соответствующая энергия поглощения на атом значительно выше ширины запрещенной зоны материала (14,6 эВ).

### Результаты и их обсуждение

Спектры поглощения облученных кристаллов LiF были измерены на двухлучевом спектрометре UV-VIS в диапазоне длин волн от 190-800нм (6,5 – 1,6 эВ).

Спектры кристаллов LiF, облученных ионами  $^{14}\text{N}$  с энергией 14 МэВ и ионами  $^{84}\text{Kr}$ , с энергией 150 МэВ представлены на рис.1 а и б.

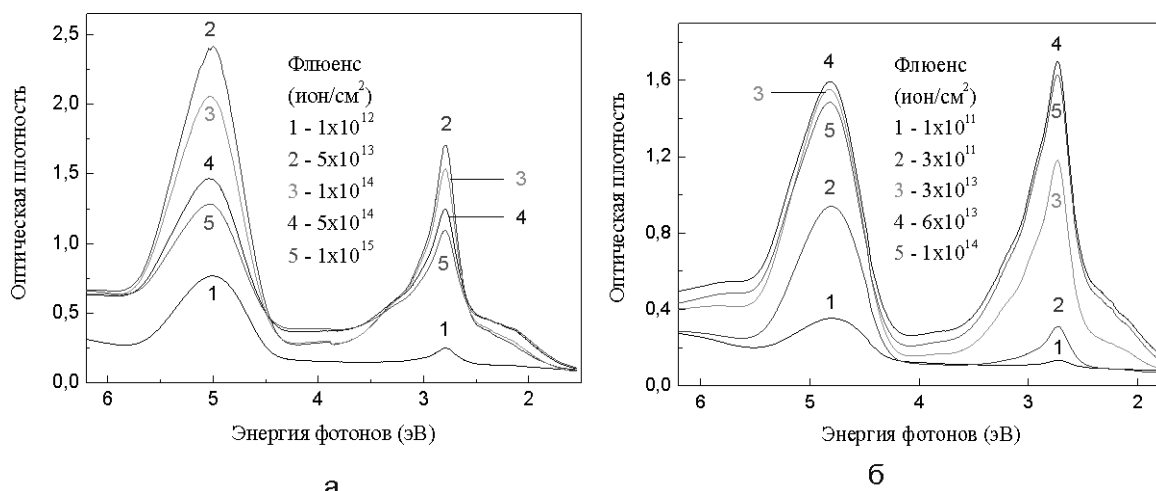


Рисунок 1.- Спектры поглощения кристаллов LiF, облученные ионами  $^{14}\text{N}$  (E=14 МэВ) (а) и ионами  $^{84}\text{Kr}$  (E=150 МэВ) (б)

Спектры поглощения кристаллов, облученных ионами  $^{14}\text{N}$  (E=23 МэВ) аналогичны спектрам поглощения кристаллов, облученных  $^{14}\text{N}$  (E=14 МэВ).

Интегральное поглощение может быть измерено, используя оценку относительной концентрации центров окраски при высоком флюенсе облучения, где идет перекрытие различных центров окраски.

Расчет интегрального поглощения для F и Fh центров окраски показаны в формулах (1) и (2)

$$A_F = \int_{4.13}^{5.90} D(\varepsilon) d\varepsilon, \tag{1}$$

$$A_{Fh} = \int_{1.77}^{4.13} D(\varepsilon) d\varepsilon. \tag{2}$$

Количество F центров на единицу площади (nF) может быть посчитана с использованием формулы Смакулы – Декстера (3) [2, 11].

$$n_F [cm^{-2}] = 9.48 \times 10^{15} D_F \tag{3}$$

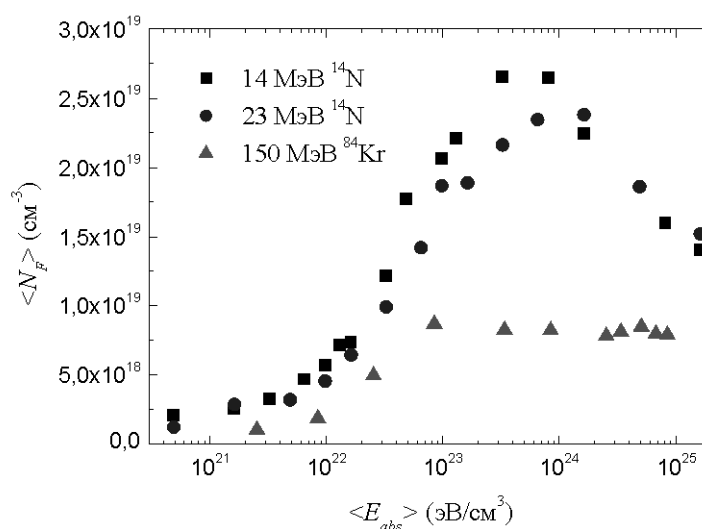
Где  $D_F$  – оптическая плотность пика поглощения для F – центров (248 нм). Средняя объемная концентрация F - центров может быть посчитана с использованием формулы (4)

$$\langle N_F \rangle = n_F / R \tag{4}$$

Для построения графика зависимости объемной концентрации F центров от средней поглощенной энергии используем формулу (5)

$$\langle E_{abs} \rangle = E_{ion} \Phi / R \quad (5)$$

Расчетные графики, построенные с использованием формулы (2) представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2.-** Зависимость средней объемной концентрации F-центров окраски от поглощенной энергии для кристаллов LiF, облученных ионами  $^{14}\text{N}$  (E=14 и 23 МэВ) и  $^{84}\text{Kr}$  (E=150 МэВ)

В случае облучения ионами  $^{14}\text{N}$  спектры поглощения увеличиваются вплоть до насыщения F центров окраски (флюенс около  $3 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>). При дальнейшем увеличении флюенса, концентрация как F, так и  $F_n$  центров окраски снижается (рис. 1 и 2). Уменьшение интегрального поглощения для F центров (AF) начинается с насыщения при флюенсе облучения выше  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> и достигает величины 30%. Значение же  $AF_n$  практически не изменилось, если принять во внимание повышение поглощения около  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски (рис.1а). Соотношение  $A_{F_n} / A_F$  увеличивается от 0,5 (флюенс  $3 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>) до 0,78 (флюенс  $1 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>). Таким образом, увеличение флюенса облучения (выше  $\sim 3 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>) приводит к образованию агрегатов F центров. Уменьшение концентрации F центров связано с образованием  $F_n$  центров и агрегатов.

Поглощение в кристаллах LiF, облученных  $^{84}\text{Kr}$  (E=150МэВ) более заметно для  $F_n$  центров (рис.1б). F центры насыщаются при флюенсе  $10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>, и этот флюенс ниже, чем для кристаллов LiF, облученных ионами  $^{14}\text{N}$ .

Спектры возбуждения и люминесценции были сняты на спектрофотометре СМ 2203. Облученные кристаллы LiF облучались монохроматическим светом с длиной волны 445 нм и строились спектры возбуждения (рис.3).

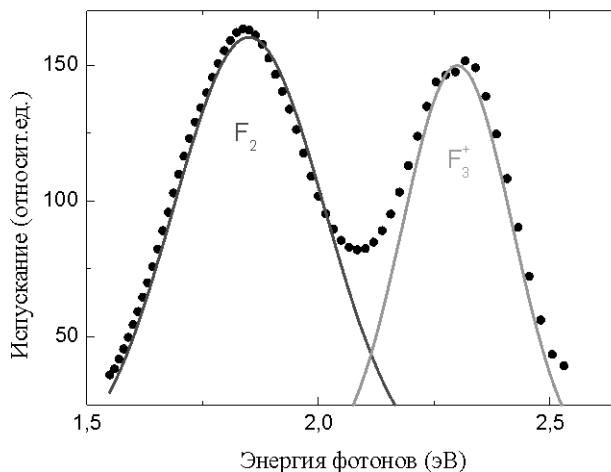


Рисунок 3.- Измерения люминесценции для  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски кристаллов LiF, облученных ионами  $^{14}\text{N}$  флюенсом  $10^{12}$  ион/см $^2$

При исследовании всех кристаллов на люминесценцию мы наблюдали полосы с максимумами возбуждения при длинах волн 540 и 670 нм, что соответствует люминесценции для  $F_3^+$  и  $F_2$  центров окраски. Результаты измеренной люминесценции представлены в таблице 2.

Таблица 2. Центры люминесценции

| Центр   | Модель       | Пик поглощения, нм | Пик люминесценции |      |
|---------|--------------|--------------------|-------------------|------|
|         |              |                    | нм                | эВ   |
| $F_2$   | $2v_a^+2e^-$ | 444                | 670               | 1,85 |
| $F_3^+$ | $3v_a^+2e^-$ | 448                | 540               | 2,30 |

Люминесценция как для  $F_3^+$ , так и для  $F_2$  центров окраски начинает наблюдаться уже с самого наименьшего флюенса облучения (для наших экспериментов это  $3 \times 10^{10}$  ион/см $^2$ ). С увеличением флюенса облучения пики люминесценции возрастают до насыщения, а затем уменьшаются. Уменьшение зеленого свечения ( $F_3^+$  центры люминесценции) происходит при более низких флюенсах облучения, чем для  $F_2$  центров окраски. Возможно, что это связано с реабсорбцией зеленых центров люминесценции ионами  $F_n$  центров. В соответствии с [12] снижение люминесценции происходит из-за концентрационного тушения. Дальнейшее сильное понижение при более высоких флюенсах облучения может быть связано с механическими напряжениями, индуцируемыми падающими ионами [13, 14].

### Заключение

В кристаллах LiF, облученных ионами  $^{14}\text{N}$ , концентрация F центров окраски насыщается, при флюенсе около  $3 \times 10^{13}$  ион/см $^2$ . При дозе облучения выше этого значения, снижается как концентрация F, так и  $F_n$  центров окраски. Такое поведение центров окраски говорит о том, что при увеличении флюенса происходят не только процессы агрегации (скопления) F центров ( $F > F_n$ ), но и образование более крупных агрегатов, дефектов, что приводит к понижению концентрации как F, так и  $F_n$  центров окраски. Эти результаты являются новыми и отличаются от предыдущих исследований, сделанных при более низких флюенсах [2].

Эффективность люминесценции для  $F_2$  и  $F_3^+$  центров окраски в кристаллах LiF, облученных ионами  $^{84}\text{Kr}$  значительно ниже, чем при облучении ионами  $^{14}\text{N}$ . Это явление, а также понижение эффективности люминесценции при высоких флюенсах облучения остается открытым и требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1 Itoh N., Duffy D.M., Khakshouri S., Stoneham A.M., J. Phys.: Condens. Matter **21**, 474205 (2009).

2 Schwartz K, Volkov A.E., Sorokin M.V., Trautmann C. Effect of electronic energy loss and irradiation temperature on color-center creation in LiF and NaCl crystals irradiated with swift heavy ions // Phys. Rev. **B 78** (2008) 024120.

3 Rivera A, Olivares J, Garcia G, Agullr-Lopez F. Swift heavy ion damage to sodium chloride: synergy between excitation and thermal spike // J. Phys.: Condens. Matter **24**, (2012) 085401.

4 Fink D, Saad A, Dhamadaran S, Chandra A, Fahner W.R.; K. Hoppe, L.T. Chadderton, Radiation Measur. **43** (2008) 546.

5 Lushchik A, Lushchik Ch., Schwartz K., Vasilchenko E, Papaleo R., Sorokin M.V., Volkov A.E.; Phys. Rev. **B 76** (2007) 054114.

6 Schwartz K, Sorokin M.V., Lushchik A, Lushchik Ch. At al. Color center creation in LiF crystals irradiated with 5- and 10-MeV Au ions // Nucl. Instr. Meth. **B 266** (2008) 2736.

7 Maniks J., Manika I, Grants R., Zabels R., Schwartz K, Sorokin M. at al Swift – ion – induced hardening and reduction of dislocation mobility in LiF crystals // Appl. Phys. **A 104** (2011) 1121.

8 Maniks J., placeSnManika SnI., Zabels R., Grants R, Tamanis E., Schwartz K. Hardening and formation of dislocation structures in LiF crystals irradiated with MeV-GeV ions // Nucl. Instr. Meth. **B 282** (2008) 81.

9 Lidiard A.B., Philos. Mag. **A**, 39 (1979) 647.

10 Skuratov V.A., Al Azm S.M., Altynov V.A. Luminescence of aggregate centers in lithium fluoride irradiated with high energy heavy ions // Nucl. Instr. Meth. **B 191** (2002) 251.

11 Schwartz K., Trautmann C., El-Said A.S., Neumann R. Color – center creation in LiF under irradiation with swift heavy ions: Dependence on energy loss and fluence // Phys. Rev. **B 70** (2004) 184104.

12 Thevenard, A. Perez, J. Davenas, C.H.S. Dupuy, Phys. Stat. Sol. (a) **9** (1972) 517.

13 Farge Y, Lambert M., Smoluchowski S, Mecanisme de formation des centres M et R // Phys. Rev. **159** (1967) 700.

14 Skuratov V.A., Kim Jong Gun, Stano J., Zagorski D.L. In situ luminescence as monitor of radiation damage under swift heavy ion irradiation // Nucl. Instr. Meth. **B 245** (2009) 194.

**Русакова А.В., Ақылбеков Ә.Т.**

**LiF кристалдарында жоғары энергиялы натрий және криптон иондары ағынының әсерінен бояу орталықтарының түзілуі**

Бұл мақалада оптикалық спектроскопия мен люминесценцияны пайдалану арқылы, азот пен криптонның иондарымен сәулеленген литий фториді кристаллдары зерттелген. Жеңіл иондарға да, ауыр иондарға да F бояу орталықтары орташа концентрациясының флюенске тәуелділігі анықталды. F орталықтары үшін максималды концентрация  $^{14}\text{N}$  иондарымен сәулеленген кезде күштірек байқалатындығы көрсетілді. Люминесценция әдісін қолдану  $\text{F}_3^+$  және  $\text{F}_2$  бояу орталықтарын ажыратуға және бөлуге мүмкіндік берді.

**Түйін сөздер:** иондық кристаллдар, бояу орталықтары, ақаулардың шоғырлануы, жоғарыэнергетикалық иондар.

**Russakova A.V., Akilbekov A.T.**

**The formation of color centers in LiF crystals by irradiation of high energy ion beams of sodium and krypton**

This article studied LiF crystals irradiated with  $^{14}\text{N}$  and  $^{84}\text{Kr}$  ions by absorption and luminescence spectroscopy. Dependence of the average F-center concentration on the fluence was found to be different for the lighter and the heavier projectiles. In particular, the maximal concentration of the F centers reached a notably higher value in the case of irradiation with  $^{14}\text{N}$  than that for  $^{84}\text{Kr}$  ions. The luminescence studies allowed distinguishing  $\text{F}_3^+$  and  $\text{F}_2$  centers, having very similar absorption spectra.

**Keywords:** ionic crystals, color centers, defect accumulation, high energy ions

*Поступила в редакцию 15.10.13*

*Рекомендована к печати 30.10.13*

**Об авторах:**

**Акилбеков А.Т.** - д.ф.-м.н., профессор, декан физико-технического факультета Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева

**Русакова А.В.** - докторант PhD 3-его года обучения физико-технического факультета Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева