

## ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ ГАЛОГЕНИДОВ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ, ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТРЫМИ ИОНАМИ

М.В. Сорокин<sup>1)</sup>, Д.Х. Кенбаев<sup>2)</sup>, А.Ш. Эль-Саид<sup>3)</sup>, М. Изеррукен<sup>4)</sup>,  
А.К. Даuletбекова<sup>5)</sup>, А.Т. Акилбеков<sup>5)</sup>, И. Ахмад<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
пл. Академика Курчатова 1, Москва 123182, Россия, m40@lab2.ru

<sup>2)</sup>Университет им. Шакарима, Семей, Абайская обл., Казахстан, edu.kdx@yandex.kz

<sup>3)</sup>Университет нефти и минералов им. короля Фахда,  
Джахран, Саудовская Аравия, elsaid@kfupm.edu.sa

<sup>4)</sup>Ядерный исследовательский центр Драгрия, Алжир, Алжир, m-izerrouken@crnd.dz

<sup>5)</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
Астана, Казахстан, alma\_dauletbek@mail.ru

<sup>6)</sup>Национальный Центр Физики, Исламабад, Пакистан, ishaq.ahmad@ncp.edu.pk

На примере фторида бария, облученного быстрыми ионами  $^{132}\text{Xe}$ , выявлены существенные отличия кинетики образования и отжига центров окраски от щелочно-галоидных кристаллов. Предложены механизмы и определены энергии активации отжига  $\text{F}_2$  пика в двух температурных интервалах.

**Ключевые слова:** ионные кристаллы; центры окраски; быстрые ионы; отжиг.

## THERMAL ANNEALING OF ALKALINE-EARTH HALIDES IRRADIATED WITH SWIFT IONS

Michael Sorokin<sup>1)</sup>, Daurzhan Kenbaev<sup>2)</sup>, Ayman S. El-Said<sup>3)</sup>, Mahmoud Izzerouken<sup>4)</sup>,  
Alma Dauletbekova<sup>5)</sup>, Abdirash Akilbekov<sup>5)</sup>, Ishaq Ahmad<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia, m40@lab2.ru

<sup>2)</sup>Shakarim University, Semey, Abai Region, Kazakhstan, edu.kdx@yandex.kz

<sup>3)</sup>King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia,  
elsaid@kfupm.edu.sa

<sup>4)</sup>Nuclear Research Center of Draria, Algiers, Algeria, m-izerrouken@crnd.dz

<sup>5)</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, alma\_dauletbek@mail.ru

<sup>6)</sup>National Centre for Physics, Islamabad, Pakistan, ishaq.ahmad@ncp.edu.pk

Although alkaline-earth halides share many properties with the alkali-halide crystals, two features are important for their response on the irradiation with swift ions. Firstly, the mechanism of defect creation during decay of the electronic excitations is much less efficient. Secondly, the single F centers are much more mobile in many alkaline-earth halides remain mobile below room temperature, so the simplest intrinsic color center in such crystals become  $\text{F}_2$ .

$\text{BaF}_2$  crystals were irradiated with energetic xenon ions at room temperature and then stepwise annealed up to 825 K. Significant decrease of the  $\text{F}_2$  peak was observed in the narrow temperature region of 400 – 450 K. We believe the decrease is originated by decay of interstitial centers, of the broad absorption band at ~6.5 eV. This explanation is supported by the simultaneous increase of the peaks in 9-10 eV region, those presumably corresponds to anion interstitial aggregates. The activation energies of the  $\text{F}_2$  peak decreases are estimated in two temperature intervals.

**Keywords:** ionic crystals; color centers; swift ions; thermal annealing.

### Введение

Галогениды щелочноземельных металлов образуют типичные ионные кристаллы с большой шириной запрещенной зоны. Вместе с возможностью автолокализации валентных дырок и экситонов это создает

механизм преобразования радиационно-индуцированных электронных возбуждений в френкелевские дефекты анионной подрешетки [1, 2]. Такие дефекты, благодаря оптическому поглощению в запрещенной зоне, называются центрами

окраски. Они предоставляют полезный инструмент для фундаментальных исследований эффектов облучения и имеют множество практических применений от дозиметрии до фотоники [3].

Термическая стабильность центров окраски зависит как от материала, так и от условий облучения. Быстрые ионы передают основную часть своей энергии электронной подсистеме, формируя гало центров окраски вокруг своих траекторий. Тяжелые ионы, имеющие линейные потери энергии выше порога  $\sim 10$  кэВ/нм, создают также ядро трека – сильно поврежденную область радиусом 1-2 нм, которую можно выявить при помощи травления, просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и других методов. Однако, в отличие от сплошных треков быстрых тяжелых ионов в щелочно-галоидных кристаллах [4], в галогенидах щелочноземельных металлов треки являются прерывистыми [5, 6].

Прерывистость треков может быть связана с двумя особенностями образования радиационных дефектов в рассматриваемых кристаллах. Во-первых, этот процесс существенно затруднен из-за определенной изоляции анионов в ГЦК подрешетке катионов. А, во-вторых, при комнатной температуре достаточной подвижностью могут обладать не только межузельные анионы, но и вакансии в анионной подрешетке, в том числе и в основном состоянии. Более тщательное изучение этих особенностей требуется для понимания как накопления и стабильности центров окраски, так и образования треков [7, 8].

### Методика эксперимента

Для исследования кинетики накопления и отжига центров окраски использовались кристаллы фторида бария, облученные ионами ксенона с энергией 220 МэВ на ускорителе DC-60 (Астана, Казахстан) при комнатной температуре с флюенсами от  $1.0 \times 10^{11}$  до  $1.0 \times 10^{14}$  ионов/ $\text{см}^2$ . Отжиг облученных кристаллов производился путем выдерживания в течение 5 минут в атмо-

сфере аргона при последовательно повышающейся на 20-30 К температуре вплоть до 825 К. После каждого шага отжига при комнатной температуре производилось измерение оптического поглощения в диапазоне от видимого света до вакуумного УФ [9].

### Результаты и их обсуждение

Так как одиночные F центры в кристаллах фторида бария являются подвижными уже при комнатной температуре, простейшим электронным центром является  $F_2$  с пиком поглощения 1.62 эВ (рис. 1).

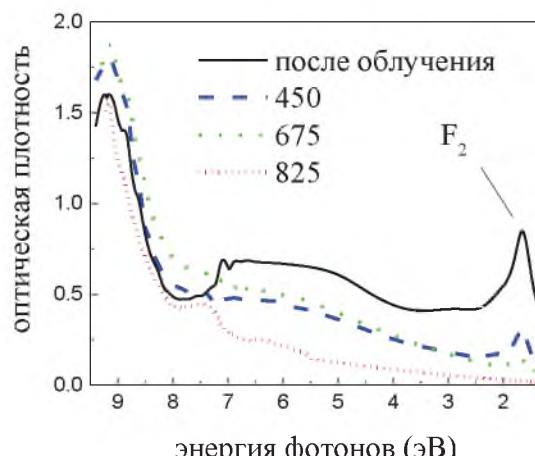


Рис. 1. Спектры оптического поглощения кристалла фторида бария, облученного 220-МэВ  $^{132}\text{Xe}$  с флюенсом  $1 \times 10^{14}$  ионов/ $\text{см}^2$ , измеренные после обозначенных температур отжига

Наблюдаемый резкий спад поглощения этих центров в узком температурном диапазоне 400 – 450 К (рис. 2) соответствует известному пику интенсивности термолюминесценции [10]. Мы предполагаем, что эти эффекты связаны с распадом сложных межузельных центров, диффузией межузлий фтора и их рекомбинацией с  $F_2$  центрами. В пользу этого предположения говорит одновременное уменьшение широкой полосы поглощения в области 6.5 эВ и рост пиков поглощения в районе 9-10 эВ, соответствующих более крупным межузельным агрегатам [11].

Следующая область спада  $F_2$  при температуре выше 670 К (красная пунктирная линия на рис. 2) имеет энергию активации 0.53 эВ, что достаточно близко к расчет-

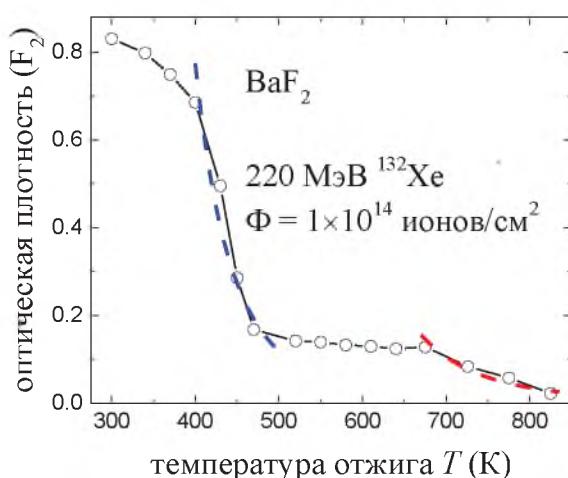


Рис. 2. Оптическая плотность в максимуме  $F_2$  пика (1.62 эВ) как функция температуры отжига. Пунктирные кривые соответствуют закону Аррениуса ному значению энергии миграции одиночных  $F$  центров [12].

### Заключение

Кристаллы фторида бария, облученные быстрыми ионами  $^{132}\text{Xe}$  при комнатной температуре, демонстрируют образование различных полос в спектре оптического поглощения.  $F_2$  центры являются наиболее простыми вакансационными центрами в этих кристаллах и проявляют кинетику отжига, существенно отличающуюся от  $F$  центров в щелочно-галоидных кристаллов. В частности, при термическом отжиге в интервале 400–450 К происходит резкий спад их концентрации с энергией активации 0.32 эВ, связанный, как мы полагаем, с распадом межузельных центров с полосой поглощения  $\sim 6.5$  эВ.

### Библиографические ссылки

1. Itoh N., Stoneham A.M., Materials Modification by Electronic Excitations. Cambridge: Cambridge University Press; 2001.
2. Fowler B.W., Physics of Color Centers. New York, London: Academic Press Inc.; 1968.

3. Родный П.А. Электронно-дырочные и экситонные процессы в кристаллах  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$  и  $\text{BaF}_2$  (Обзор). *Физика твердого тела* 2024; 66(2): 161–178.
4. Schwartz K., Wirth G., Trautmann C., Steckenreiter T. Ion-induced formation of colloids in  $\text{LiF}$  at 15 K. *Physical Review B* 1997; 56: 10711.
5. Khalfaoui N., Rotaru C.C., Bouffard S., Toulemonde M., Stoquert J.P., Haas F. et al. Characterization of swift heavy ion tracks in  $\text{CaF}_2$  by scanning force and transmission electron microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 2005; 240(4): 819–828.
6. El-Said A.S., Cranney M., Ishikawa N., Iwase A., Neumann R., Schwartz K. et al. Study of heavy-ion induced modifications in  $\text{BaF}_2$  and  $\text{LaF}_3$  single crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 2004; 218 (1-4): 492–497.
7. Sorokin M.V., Schwartz K., Aisida S.O., Ahmad I., Sorokin A.M., Izerrouken M. Distribution of color centers around swift ion trajectories in lithium fluoride crystals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 2020; 485: 32–35.
8. Batool A., Izerrouken M., Sorokin M.V., Aisida S.O., Mushtaq M., Hussain J., et al. Effect of point defects on the STE luminescence of  $\text{CaF}_2$  single crystals. *Radiation Effects and Defects in Solids* 2023; 178(3-4): 314–324.
9. Асылбаев Р., Кенбаев Д., Даuletбекова А., Садурова Б., Арапбаева Г., Акилбеков А. Термический отжиг радиационно-индцированного оптического поглощения кристаллов  $\text{BaF}_2$  и  $\text{CaF}_2$ , облученных быстрыми ионами ксенона. *Вестник евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. Серия: Физика. Астрономия* 2024; 148(3): 7–22.
10. Захаров Г.Н., Кхудро А.Х., Мельчаков Е.Н., Родный П.А., Яновский В.В. Радиационные дефекты и термолюминесценция фторида бария. *Физика твердого тела* 1992; 34(5): 1510–1512.
11. Davidson A.T., Schwartz K., Comins J.D., Koza-kiewicz A.G., Toulemonde M., Trautmann C. Vacuum ultraviolet absorption and ion track effects in  $\text{LiF}$  crystals irradiated with swift ions, *Physical Review B* 2002; 66 (21): 214102.
12. Keeton S.C., Wilson W.D. Vacancies, Interstitials, and Rare Gases in Fluorite Structures. *Physical Review B* 1973; 7(2): 834–843.