

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-54-59>

УДК 538.958

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ РАЗУПОРЯДОЧЕННОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CaF₂ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Р. Н. Асылбаев^{1*}, А. А. Кисабекова¹, Ф. У. Абуова², Б. К. Садуова², Г. М. Баубекова²

¹⁾ Павлодарский педагогический университет имени Э. Марғұлан, Павлодар, Қазақстан

²⁾ Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Қазақстан

* E-mail для контактов: ruslanassylbay@yandex.kz

В статье представлены результаты исследования процессов радиационного дефектообразования в монокристаллах фторида кальция под воздействием облучения рентгеновскими лучами, протонами и быстрыми тяжелыми ионами Хе¹³² и Вi²⁰⁹. Основным методом исследования является абсорбционная спектроскопия. В спектрах оптического поглощения облученных разными видами ионизирующей радиации образцов CaF₂ регистрируются широкие интенсивные полосы поглощения, связанные с электронными и дырочными центрами окраски и их агрегатами. Анализ спектров оптического поглощения произведен в координатах Тауца и Урбаха. Выявлено в количественном плане влияние облучения быстрыми тяжелыми ионами на край фундаментального поглощения и на разупорядочение в анионной подрешетке кристалла CaF₂. Обсуждена природа радиационно-индуцированного оптического поглощения в области 9,8 эВ, индуцируемого облучением ионами Хе¹³² и Вi²⁰⁹.

Ключевые слова: фторид кальция, радиационные дефекты, абсорбционная спектроскопия, облучение быстрыми тяжелыми ионами, облучение рентгеновскими лучами, облучение протонами, метод Тауца, энергия Урбаха.

ВВЕДЕНИЕ

С середины прошлого века растет интерес к исследованию радиационных эффектов в материалах, вызванный как их потенциальным применением в современных технологиях, так и необходимостью понимания фундаментальных процессов взаимодействия излучения с материалами. Одним из перспективных объектов, привлекающих внимание исследователей, является монокристалл фторида кальция (CaF₂), который обладает хорошими оптическими и структурными свойствами, делающими его важным объектом для изучения радиационно-индуцированных изменений в материалах [1].

Целью данной работы является изучение эффектов, вызванных облучением монокристаллов CaF₂ быстрыми тяжелыми ионами, протонами и рентгеновскими лучами. Облучение материалов ионизирующим излучением может приводить к изменениям в их электронной структуре, что в свою очередь оказывает влияние на их оптические свойства. В частности, в данной работе осуществляется сравнительный анализ влияния различных типов облучений на спектральные характеристики монокристаллов CaF₂ с использованием методов абсорбционной спектроскопии.

Разные типы ионизирующего излучения по-разному влияют на оптические и структурные свойства CaF₂. Облучение рентгеновскими лучами не приводит к созданию значимых структурных дефектов в CaF₂ при комнатной температуре, а производит процессы перезарядки существующих примесных и дефектных центров, в результате образуются фотохромные центры окраски [2].

Изучению радиационных дефектов под воздействием высокоэнергетических ионов посвящен ряд работ [3–6]. При облучении ионами во многих широкоцелевых диэлектрических материалах образование радиационных дефектов происходит не только за счет прямого столкновения бомбардирующего иона с ионами мишени и их последующего смещения с регулярных позиций, но также посредством механизма распада электронных возбуждений (ЭВ) – электронно-дырочных пар (e–h пар) и экситонов. Механизм распада ЭВ (неударный механизм) был подробно изучен для щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) [7–8]. Ионное облучение создает высокую плотность ЭВ внутри цилиндрического ионного трека. Так как энергия создания анионных френкелевских пар в CaF₂ (2,5–3 эВ) гораздо ниже энергии образования анионного экситона и энергии запрещенной зоны, механизм распада ЭВ и является основным механизмом создания радиационных дефектов в данном материале [1]. Поток ускоренных протонов также создает в CaF₂ большое количество ЭВ – экситонов и e–h пар, распад которых приводит к созданию френкелевских дефектов, преимущественно в анионной подрешетке.

Одним из ключевых аспектов данного исследования является анализ спектров поглощения в координатах Тауца [9], что позволяет оценить смещение края фундаментального поглощения, вызванного радиационными дефектами. Такой подход дает возможность не только качественно, но и количественно оценить изменения в электронной структуре монокристаллов. Дополнительно, в работе проводится оценка энергии Урбаха [10] для каждого вида облучения, что предоставляет информацию об уширении

края поглощения и увеличении динамической разупорядоченности в структуре кристалла.

Таким образом, настоящее исследование направлено на глубокое качественное и количественное понимание радиационно-индуцированных процессов в монокристаллах CaF₂, что может способствовать разработке новых материалов с заранее заданными свойствами для использования в оптоэлектронике, ядерной физике и других областях науки и техники. Данное исследование является логическим продолжением работ [3, 4] с применением методов вычисления оптических характеристик облученных CaF₂.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В рамках данного исследования были изучены беспримесные монокристаллы CaF₂, выращенные методом Бриджмана-Стокбаргера в Государственном оптическом институте имени С.И. Вавилова. Наибольшая концентрация «нежелательных» примесей составляет около 0,01 моль % и принадлежит примесям трехвалентного иттрия. Полученные образцы имеют форму прямоугольника, сколотые вдоль плоскости (111) и размеры 5×5 мм и толщину от 0,8 до 1 мм.

Облучение ионами Xe¹³² производилось на циклотроне DC-60 в г. Астана (Казахстан) на специализированном канале для исследований в области физики твердого тела. Облучение ионами Bi²⁰⁹ производилось на линейном ускорителе UNILAC научного комплекса GSI (Дармштадт, Германия). Облучение рентгеновскими лучами проводилось в лаборатории Тартуского университета (Эстония) на рентгеновской установке при параметрах 50 кВ и 15 мА с использованием вольфрамовой трубки. Получаемая образцом доза облучения в течение 1 часа приблизительно равна 100 Гр. Облучение протонами проводилось в КИпА 500 kV implanter (Хельсинки, Финляндия) с энергией 100 кэВ и флюенсом 10¹⁷ р/см². Параметры облучения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры облучения

Вид облучения	E _{част.} , МэВ	Средний пробег, мкм	Флюенс, частиц/см ²	Доза радиации, Гр	Радиационные повреждения, дпа
Xe ¹³²	231	18	5·10 ¹²	3,2·10 ⁷	0,0027
Bi ²⁰⁹	2383	90	3·10 ¹¹	4·10 ⁹	0,00008
p ¹	0,1	0,82	10 ¹⁷	6,1·10 ⁹	0,2
X	–	–	–	100	–

Для измерения оптического поглощения в ультрафиолетовой (УФ), видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях использовался двухлучевой оптический спектрофотометр Jasco V-660, способный фиксировать спектры на длинах волн от 190 до 900 нм и измерять оптическую плотность до значения 4. Спектры в области поглощения вакуумного ультрафиолета (ВУФ) измерялись при помощи вакуумного дифракционного монохроматора ВМР-2. Источником света

в данной установке является газоразрядная лампа, работающая в атмосфере молекулярного водорода.

Все облучения и измерения проводились при комнатной температуре в нормальных условиях.

Анализ спектров оптического поглощения произведен в координатах Тауца и Урбаха. С подробным анализом данных методов можно ознакомиться в оригинальных статьях [9, 10] или в статье [11]. Метод Тауца позволяет по спектру поглощения определить ширину запрещенной зоны материала. Так как в энергетической структуре CaF₂ реализуются прямые разрешенные переходы [12], то уравнение Тауца можно применить в следующем виде:

$$(\alpha \cdot hv)^2 = K \cdot (hv - E_g),$$

где α – коэффициент поглощения, hv – энергия фотона, E_g – ширина запрещенной зоны, K – постоянная, равная единице для многих материалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, ионизирующее облучение создает в твердых телах радиационные дефекты, которые могут дать рост оптического поглощения в спектральном диапазоне, где необлученный материал демонстрирует прозрачность. Спектры радиационно-индуцированного оптического поглощения монокристаллов CaF₂, облученных разными видами радиации в диапазоне энергий от 1,4 до 10,2 эВ представлены на рисунке 1.

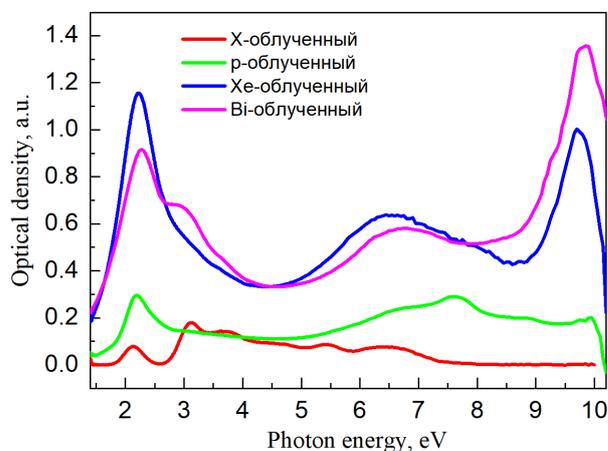


Рисунок 1. Спектры радиационно-индуцированного оптического поглощения, измеренные для монокристаллов CaF₂, облученных при комнатной температуре рентгеновскими лучами (X-облученный), протонами (p-облученный), ионами Xe¹³² (Xe-облученный) или Bi²⁰⁹ (Bi-облученный). Все спектры измерены при комнатной температуре, поглощение исходного необлученного образца вычтено [4]

В видимой области спектра мы можем видеть интенсивные полосы поглощения для всех видов облучения. Известно, что в монокристаллах CaF₂, облученных ионами Xe¹³² или Bi²⁰⁹ и протонами, создаются структурные радиационные дефекты – электронные и дырочные центры, а также их агрегаты. В видимой области спектра около 2,2 эВ рост оптической

го поглощения дают электронные центры окраски F-типа, их агрегаты, а также коллоиды Ca. Для образца, облученного рентгеновскими лучами, в видимой области спектра зарегистрированы полосы поглощения, изученные во многих работах и связанные с фотохромными центрами (ФЦ). Наличие в кристалле некоторой концентрации примеси иттрия Y³⁺, создает условия для образования фотохромных центров, в состав которых входят трехвалентный Y³⁺, анионная вакансия и один (ФЦ⁺) или два электрона (ФЦ) [13]. При облучении рентгеновскими лучами происходит перезарядка данных центров и наведение оптического поглощения.

В облученных ионами Xe¹³² и Bi²⁰⁹ образцах CaF₂ в спектральной области УФ-ВУФ (4–10 эВ) мы можем наблюдать структурные интенсивные полосы оптического поглощения. Полоса при 6,5 эВ по литературным данным связана с трехгалогидными квази-молекулами F₃⁻, представляющими собой линейную структуру из трех атомов фтора, расположенных вдоль направления <111> [16].

Наибольший интерес представляет полоса поглощения при 9,8 эВ, которая индуцируется только при облучении высокоэнергетическими ионами Xe¹³² и Bi²⁰⁹, тогда как при облучении протонами и рентгеновскими лучами данная полоса не регистрируется.

На рисунке 2 представлены спектры оптического поглощения в интервале 4,5–10,3 эВ для монокристаллов CaF₂, облученных различными видами радиации. Также на рисунке представлен спектр необлученного образца. В отличие от рисунка 1, здесь спектры представлены без вычитания спектра необлученного кристалла.

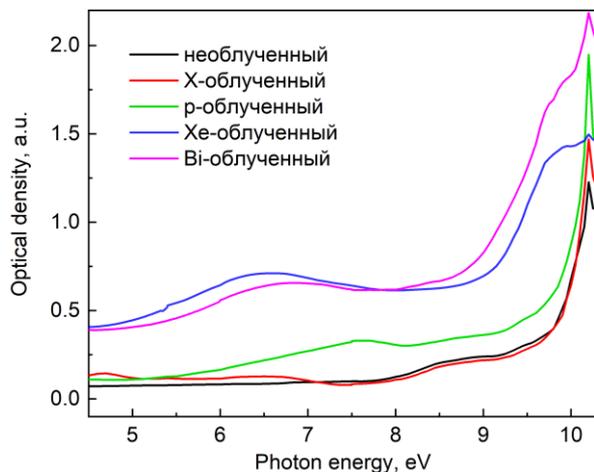


Рисунок 2. Спектры оптического поглощения монокристаллов CaF₂, облученных при комнатной температуре рентгеновскими лучами (X-облученный), протонами (p-облученный), ионами Xe¹³² (Xe-облученный) или Bi²⁰⁹ (Bi-облученный), а также необлученного образца CaF₂

Как мы видим из рисунка 2, спектр поглощения необлученного образца демонстрирует достаточную прозрачность в диапазоне от 4,5 до 9,5 эВ. Далее с повышением энергии фотона начинается фундамен-

тальное поглощение кристалла. Согласно литературным данным, данная область соответствует экситонному поглощению [1]. Практически идентичное поведение демонстрирует образец CaF₂, облученный рентгеновскими лучами. Очевидно, что облучение рентгеновскими лучами не создает каких-либо структурных дефектов в данном материале, ответственных за поглощение в УФ-ВУФ области. Заметно нарастание оптического поглощения в изучаемой области в образце, облученном протонами. Мы можем наблюдать полосу около 7,6 эВ. Наиболее заметные полосы поглощения наблюдаются при ионном облучении. Для Xe-облученного образца заметна полоса поглощения около 6,5 эВ, тогда как для Bi-облученного образца мы видим смещение данной полосы в высокоэнергетическую область спектра. Для образцов, облученных ионами Xe и Bi, заметно значительное смещение края фундаментального поглощения в длинноволновую сторону спектра. Как показано на рисунке 1, после вычитания спектра поглощения, необлученного кристалла, в данной области мы можем обнаружить заметную полосу поглощения около 9,8 эВ.

На рисунке 3 спектры оптического поглощения облученных разными видами радиационного излучения образцов CaF₂ представлены в координатах Тауца. Точки пересечения с осью энергии фотона линий экстраполяции линейных областей спектров определяет энергию края фундаментального поглощения.

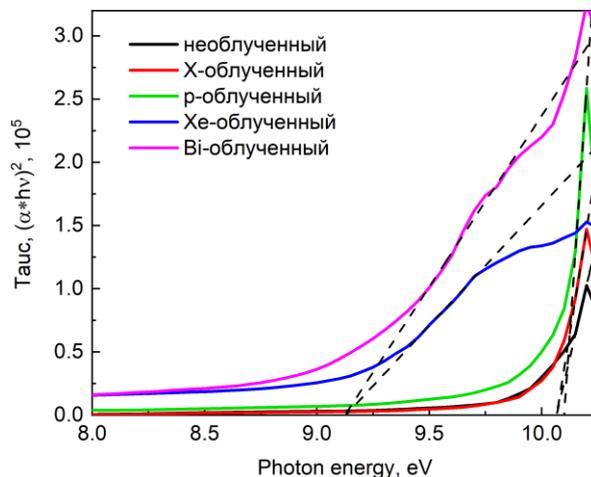


Рисунок 3. Спектры оптического поглощения в координатах Тауца монокристаллов CaF₂, облученных при комнатной температуре рентгеновскими лучами (X-облученный), протонами (p-облученный), ионами Xe¹³² (Xe-облученный) или Bi²⁰⁹ (Bi-облученный), а также необлученного образца CaF₂

На рисунке 4 спектры оптического поглощения монокристаллов CaF₂, облученных различными видами радиации, представлены в логарифмических координатах (координатах Урбаха). Обратная величина тангенса угла наклона экстраполирующей прямой линейной области спектра близкой к фундаментальному поглощению дает значение энергии Урбаха.

**ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ РАЗУПОРЯДОЧЕННОСТИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ CaF₂
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ**

Таблица 2. Энергия фундаментального поглощения и энергия Урбаха для монокристаллов CaF₂

Параметр	Необлученный CaF ₂	Рентгеновское облучение	Облучение протонами	Облучение Хе ¹³²	Облучение Вi ²⁰⁹
Энергия фундаментального поглощения, эВ	10,09	10,1	10,1	9,13	9,13
Энергия Урбаха, эВ	0,38	0,38	0,38	0,90	1,04

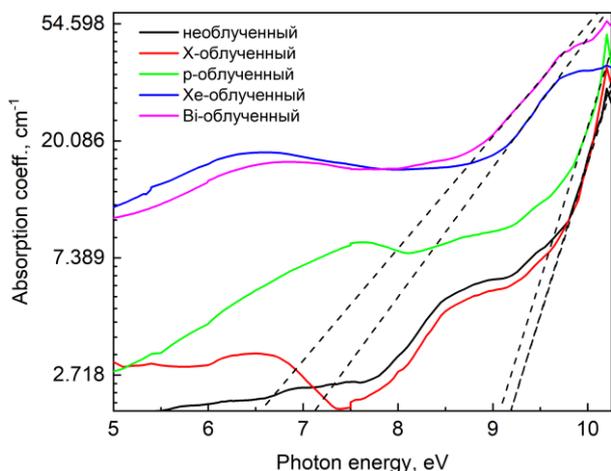


Рисунок 4. Спектры оптического поглощения в координатах Урбаха (в логарифмических координатах) монокристаллов CaF₂, облученных при комнатной температуре рентгеновскими лучами (Х-облученный), протонами (р-облученный), ионами Хе¹³² (Хе-облученный) или Вi²⁰⁹ (Вi-облученный), а также необлученного образца CaF₂

В таблице 2 представлены энергия края фундаментального поглощения и энергия Урбаха для необлученного и облученных разными видами радиации образцов CaF₂.

Из литературных данных ширина запрещенной зоны CaF₂ равна 12,1 эВ, тогда как первый экситонный пик около 11,2 эВ [12]. Как видно из таблицы 2, край фундаментального поглощения для всех образцов находится ниже области поглощения анионного экситона. Для необлученного образца и образцов, облученных рентгеновскими лучами и протонами, край фундаментального поглощения имеет практически идентичные значения. Смещение данной энергии на 1 эВ в длинноволновую сторону спектра по отношению к экситонному поглощению свидетельствует о влиянии на данный параметр существующих в кристалле до облучения ростовых дефектов и примесей. Для образцов, облученных ионами Хе¹³² и Вi²⁰⁹, мы видим заметное смещение края фундаментального поглощения почти на 2 эВ по сравнению с первым экситонным пиком. Энергия Урбаха для необлученного, Х-облученного и р-облученного кристаллов демонстрирует идентичное значение 0,38 эВ, тогда как для Хе- и Вi-облученных образцов мы видим рост данного параметра (0,9 и 1,4 эВ, соответственно).

Таким образом, облучение тяжелыми ионами по сравнению с другими видами радиации, рассмотренными в данном исследовании, создают заметные в

количественном плане структурные повреждения в кристалле. Х- и р-облучения никак не влияют на положение края фундаментального поглощения и энергия Урбаха для них остается такой же как и для необлученного кристалла. Если сравнивать дозы облучения (таблица 1), то наибольшую дозу обеспечивает облучение протонами с энергией 100 кэВ и флюенсом 10¹⁷ см⁻². Хотя и у р-облучения доза радиации превышает на несколько порядков Хе- и Вi-облучения, разупорядочение в кристалле практически не создается. Одно из основных отличий облучения протонами от облучения тяжелыми ионами в том, что в последнем случае в цилиндрическом ионном треке создается высокая плотность ЭВ. Таким образом, можно сделать вывод, что динамическое разупорядочение в кристалле создаются внутри ионного трека.

В модели термического пика [14], сначала, энергия иона переносится электронной подсистеме, где рассеивается в большом объеме. Во втором этапе энергия переносится атомам решетки, внося вклад в локальный нагрев твердого тела. В зависимости от природы материала данный процесс является достаточно эффективным для локального повышения температуры выше температуры плавления. Быстрый спад температуры закаливает расплавленную фазу, создавая треки и поверхностные хиллоки [15, 16]. Установлено, что при повышении температуры процесс разупорядочения анионной подрешетки в кристаллах типа флюорита начинается за несколько сотен градусов до точки плавления [17]. Данный процесс связан с образованием кластеров, состоящих из междоузлий и вакансий фтора, а также окружающих их релаксированных анионов. Подобные кластеры образуются при высоких температурах и исчезают с понижением температуры. Как указано выше, внутри ионного трека создается область локального нагрева кристалла и создаются условия для образования подобных кластеров. При быстром охлаждении часть данных кластеров могут быть «заморожены» и оставаться стабильными даже при комнатной температуре [18]. В работе [4] показано, что данная модель может быть применена и к ионному облучению CaF₂ и полоса при 9,8 эВ (рисунок 1), а также соответствующее смещение края фундаментального поглощения на 2 эВ в длинноволновую сторону спектра предположительно связаны со сложными анионными кластерами. За само поглощение при 9,8 эВ могут отвечать электронные возбуждения (экситоны) около этих анионных кластеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании были изучены процессы радиационного дефектообразования в монокристаллах фторида кальция, облученных рентгеновскими лучами, протонами, ионами Xe¹³² и Bi²⁰⁹. Изученные ранее спектры радиационно-индуцированного оптического поглощения кристаллов CaF₂ [3, 4] были представлены в координатах Тауца и Урбаха (логарифмические координаты). Для каждого вида облучения были определены изменения в оптических свойствах материала. Так, вычислены энергия края фундаментального поглощения и энергия Урбаха. Оказалось, что облучение рентгеновскими лучами и протонами никак не воздействуют на оптические свойства в ВУФ области вблизи фундаментального поглощения. В то же время, облучение тяжелыми ионами Xe¹³² и Bi²⁰⁹ создает значительные структурные повреждения в кристалле, что отражается на его оптических свойствах. Заметное смещение края фундаментального поглощения и увеличение энергии Урбаха свидетельствует об отличиях облучения тяжелыми ионами от облучения X-лучами и протонами. При облучении тяжелыми ионами внутри цилиндрического трека иона в анионной подрешетке кристалла создаются анионные кластеры, которые предположительно и ответственны за поглощение при 9,8 эВ.

Благодарность

Работа выполнена в рамках грантового проекта АР14870572, Министерства науки и высшего образования РК.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Hayes W. Crystals with the fluorite structure – electronic, vibrational and defect properties. London: Clarendon Press, 1974. 448 p.
2. Bugaenko T.Yu., Radzhabov E.A., Ivashechkin V.F. Thermal decay of photochromic color centers in CaF₂, SrF₂, and BaF₂ crystals doped by La and Y impurities // *Physics of the Solid State*. – 2008. – Vol. 50, No. 9. – P. 1671–1673. <https://doi.org/10.1134/S1063783408090151>
3. Assylbayev R. et al. Radiation damage caused by swift heavy ions in CaF₂ single crystals // *Radiat Meas*. Pergamon. – 2016. – Vol. 90. – P. 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.12.034>
4. Assylbayev R. et al. Structural defects caused by swift ions in fluorite single crystals // *Opt. Mater. (Amst)*. North-Holland. – 2018. – Vol. 75. – P. 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.10.026>
5. Boccanfuso M. et al. Study of the damage produced in CaF₂ by swift heavy ion irradiation // *Nucl Instrum Methods Phys Res B*. – 2002. – Vol. 191, No. 1–4. – P. 301–305. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)00580-3](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)00580-3)
6. Davidson A.T. et al. The colouration of CaF₂ crystals by keV and GeV ions // *Radiation Effects and Defects in Solids*. – 2002. – Vol. 157, No. 6–12. – P. 637–641. <https://doi.org/10.1080/10420150215811>
7. Lushchik C.B., Vitol I.K., Élango M.A. Decay of electronic excitations into radiation defects in ionic crystals // *Soviet Physics Uspekhi*. – 1977. – Vol. 20, No. 6. – P. 489–505. https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1977v020n06_ABEH005405/meta
8. Lushchik A. et al. Excitonic and electron–hole mechanisms of the creation of Frenkel defect in alkali halides // *Nuclear Instrumental Methods Phys Res B*. – 2000. – Vol. 166–167. – P. 529–537. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00788-0](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00788-0)
9. Tauc J. *Amorphous and Liquid Semiconductors*. 1st ed. / ed. Tauc J. London: Plenum Publishing Company Ltd. – 1974. – 460 p.
10. Urbach F. The Long-Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids // *Physical Review*. – 1953. – Vol. 92, No. 5. – P. 1324–1324. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1324>
11. Akilbekov A. et al. Unveiling the Structural and Optical Properties of MgAl₂O₄ Single Crystals Irradiated by Swift Heavy Ions // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 2. – P. 344. <https://doi.org/10.3390/ma17020344>
12. Rubloff G.W. Far-Ultraviolet Reflectance Spectra and the Electronic Structure of Ionic Crystals // *Phys Rev B*. American Physical Society. – 1972. – Vol. 5, No. 2. – P. 662. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.5.662>
13. Egranov A. V. et al. Effect of cationic impurities on the formation of radiation defects in alkaline earth fluorides // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2015. – Vol. 79, No. 2. – P. 280–284. <https://doi.org/10.3103/S1062873815020082>
14. Toulemonde M., Dufour C., Paumier E. Transient thermal process after a high-energy heavy-ion irradiation of amorphous metals and semiconductors // *Phys Rev B*. – 1992. – Vol. 46, No. 22. – P. 14362–14369. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.14362>
15. Aumayr F. et al. Single ion induced surface nanostructures: a comparison between slow highly charged and swift heavy ions // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2011. – Vol. 23, No. 39. – P. 393001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/23/39/393001/meta>
16. El-Said A.S. Heavy ion-induced damage in ionic fluoride single crystals: Doctor of Natural Science. – Heidelberg: Ruperto-Carola University. – 2004. – 116 p.
17. Hutchings M.T. et al. Investigation of thermally induced anion disorder in fluorites using neutron scattering techniques // *Journal of Physics C: Solid State Physics*. – 1984. – Vol. 17, No. 22. – P. 3903–3940. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3719/17/22/011/meta>
18. Ryskin A.I. et al. Stabilization of high-temperature disorder of fluorine sublattice by quenching in calcium fluoride crystals // *J. Fluor Chem*. – 2017. – Vol. 200. – P. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2017.06.013>

**ИОНДАУШЫ СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІНЕН CaF₂ МОНОКРИСТАЛДАРЫНДАҒЫ
ҚҰРЫЛЫМДЫҚ БҰЗЫЛЫСТАРДЫ ЗЕРТТЕУ**

Р. Н. Асылбаев^{1*}, А. А. Кисабекова¹, Ф. У. Абуова², Б. К. Садуова², Г. М. Баубекова²

¹ *Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан*

² *Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: ruslanassylbay@yandex.kz

Бұл мақалада рентген сәулелерімен, протондармен және Хе¹³² және Вi²⁰⁹ жылдам ауыр иондарымен сәулелену әсерінен кальций фториді монокристалдарында радиациялық ақау түзілу процестерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Негізгі зерттеу әдісі – абсорбциялық спектроскопия. Өртүрлі иондаушы сәулелену түрлерімен сәулеленген CaF₂ үлгілерінің оптикалық абсорбциялық спектрлерінде электронды және кемтіктік түс орталықтарымен және олардың агрегаттарымен байланысты кең интенсивті жұтылу жолақтары тіркелген. Оптикалық абсорбциялық спектрлер Тауц және Урбах координаттарында талданған. Жылдам ауыр иондармен сәулеленудің негізгі абсорбция жиегіне және CaF₂ кристалының аниондық торшасының бұзылуына әсері сандық түрде анықталды. Хе¹³² және Вi²⁰⁹ иондарымен сәулелену арқылы индукцияланған 9,8 эВ аймағындағы радиацияның әсерінен болатын оптикалық жұтудың табиғаты талқыланады.

Түйін сөздер: кальций фториді, радиациялық ақаулар, абсорбциялық спектроскопия, жылдам ауыр иондармен сәулелену, рентгендік сәулелену, протондық сәулелену, Тауц әдісі, Урбах энергиясы.

**STUDY OF STRUCTURAL DISORDER IN CaF₂ SINGLE CRYSTALS
UNDER THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION**

Р. Н. Асылбаев^{1*}, А. А. Кисабекова¹, Ф. У. Абуова², Б. К. Садуова², Г. М. Баубекова²

¹ *Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan*

² *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: ruslanassylbay@yandex.kz

This paper presents the results of a study of radiation defect creation processes in Calcium Fluoride single crystals irradiated with X-rays, protons, and fast heavy ions of Хе¹³² and Вi²⁰⁹. The main method of the study is absorption spectroscopy. In the optical absorption spectra of CaF₂ samples irradiated with different types of ionizing radiation, broad intense absorption bands associated with electron and hole color centers and their aggregates are recorded. The analysis of the optical absorption spectra is performed in the Tauc and Urbach coordinates. The effect of fast heavy ion irradiation on the fundamental absorption edge and on disordering in the anion sublattice of the CaF₂ crystal is quantitatively revealed. The nature of the radiation-induced optical absorption in the 9.8 eV region induced by irradiation with Хе¹³² and Вi²⁰⁹ ions is discussed.

Keywords: calcium fluoride, radiation defects, absorption spectroscopy, fast heavy ion irradiation, X-ray irradiation, proton irradiation, Tauc method, Urbach energy.