



МРНТИ 29.19.03

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-152-3-131-142>

Научная статья

Оптические и люминесцентные свойства монокристаллов YAG:Ce, облученных ионами Xe^{132} с энергией 231 МэВ

Г. Турсумбаева^{1*}, Г. Баубекова¹, Ж. Карипбаев¹, Р. Асылбаев², А. Кисабекова², А.Т. Акилбеков¹

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

²Высшая школа естествознания, Университет Маргулан, Павлодар, Казахстан

(E-mail: gptursumbayeva@gmail.com)

Аннотация. В работе изучено влияние облучения ионами ксенона (230 МэВ) на оптическое и люминесцентные свойства кристаллов $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (YAG:Ce). Облучение индуцирует дефекты Френкеля (F , F^+), антиузловые нарушения способствуют подавлению эмиссии ионов Ce^{3+} из-за усиления нерадиационных механизмов и перехода Ce^{3+} в Ce^{4+} . Установлено, что повышение флюенса приводит к снижению интенсивности свечения Ce^{3+} , что связано с образованием дефектов решетки, включая кислородные вакансии и антиструктурные дефекты. Также наблюдаются изменения валентного состояния церия ($\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$). Облучение ионами Xe^{132} ($E=230$ МэВ) при флюенсах от 1011 до 1014 ион/см² вызывает появление дефектов Френкеля (F , F^+) и антиузловых нарушений, что ослабляет эмиссию Ce^{3+} за счет активации нерадиационных процессов и перезарядки $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$. В спектрах возбуждения фиксируется подавление экситонных пиков и сдвиг порога возбуждения, обусловленные ростом структурного беспорядка в кристаллической решетке. Эти результаты подчеркивают значение изучения радиационных эффектов для оптимизации свойств YAG:Ce в практических приложениях. Полученные данные раскрывают механизмы радиационно-индуцированных изменений в YAG:Ce, что важно для его использования в радиационно-устойчивых сцинтилляционных детекторах.

Ключевые слова: иттрий-алюминиевый гранат, быстрые тяжелые ионы, люминесцентные свойства, спектры люминесценции и возбуждения, радиационные дефекты.

Введение

Монокристаллы YAG:Ce находят широкое применение благодаря своим уникальным оптическим и люминесцентным свойствам, включая высокий квантовый выход, термическую и радиационную стойкость, а также широкий спектр излучения в видимой

Поступила 02.09.2025. После доработки 07.09.2025. Принята к печати 07.09.2025. Доступна онлайн 30.09.2025.

^{1*}автор для корреспонденции

области. Эти характеристики делают данный материал незаменимым для целого ряда высокотехнологичных приложений [1].

Одной из ключевых областей применения YAG:Ce является его использование в качестве люминофора в современных белых светодиодах (LED), которые играют важнейшую роль в энергосберегающем освещении и дисплейных технологиях. Высокая эффективность преобразования синего света в широкий спектр видимого излучения обеспечивает яркое и стабильное свечение, что делает YAG:Ce стандартом для индустрии светодиодов [2-4].

Кроме того, YAG:Ce широко используется в качестве сцинтилляционного материала в медицинской диагностике (например, позитронно-эмиссионной томографии) и системах радиационного мониторинга. Его высокая световая отдача и устойчивость к радиационным повреждениям обеспечивают надежную регистрацию рентгеновского и гамма-излучения, что имеет важное значение как для здравоохранения, так и для ядерной безопасности. Стабильность и радиационная стойкость YAG:Ce делают его перспективным материалом для применения в условиях экстремальных воздействий, таких, как космическое пространство и высокоэнергетическая физика. В этих областях изучение радиационно-индуцированных изменений в структуре и свойствах материала является важным шагом для разработки компонентов, способных эффективно функционировать в экстремальных средах [5-10].

Таким образом, исследование радиационных процессов в YAG:Ce имеет как фундаментальное, так и прикладное значение, позволяя не только понять механизмы дефектообразования.

Методы и материалы

В рамках данной работы изучались монокристаллы YAG:Ce, выращенные по методу Чохральского. Концентрация легирующей примеси Ce^{3+} в образцах составляла 0,5 процентных атомных долей. Для исследований использовались образцы, приобретенные у компании Alineason, размером $5 \times 5 \times 0,5 \text{ mm}^3$.

Монокристаллы YAG:Ce подвергались облучению высокоэнергетическими ионами ксенона ^{132}Xe с энергией 230 МэВ в диапазоне флюенсов от 10^{11} до 10^{14} ион/ cm^2 . Облучение проводилось на циклотроне DC-60, расположенном в г. Астане (Казахстан).

Измерение спектров оптического поглощения образцов проводилось на двухлучевом спектрофотометре – T8DCS.

Измерение спектров фотолюминесценции (ФЛ) и возбуждения для образцов YAG:Ce не облученного и предварительно облученных ионами ^{132}Xe до флюенсов: 10^{11} - 10^{14} были измерены на универсальном спектрофлуориметре CM2203 Солар. Диапазон длин волн от 220 до 920 нм.

Результаты и Обсуждение

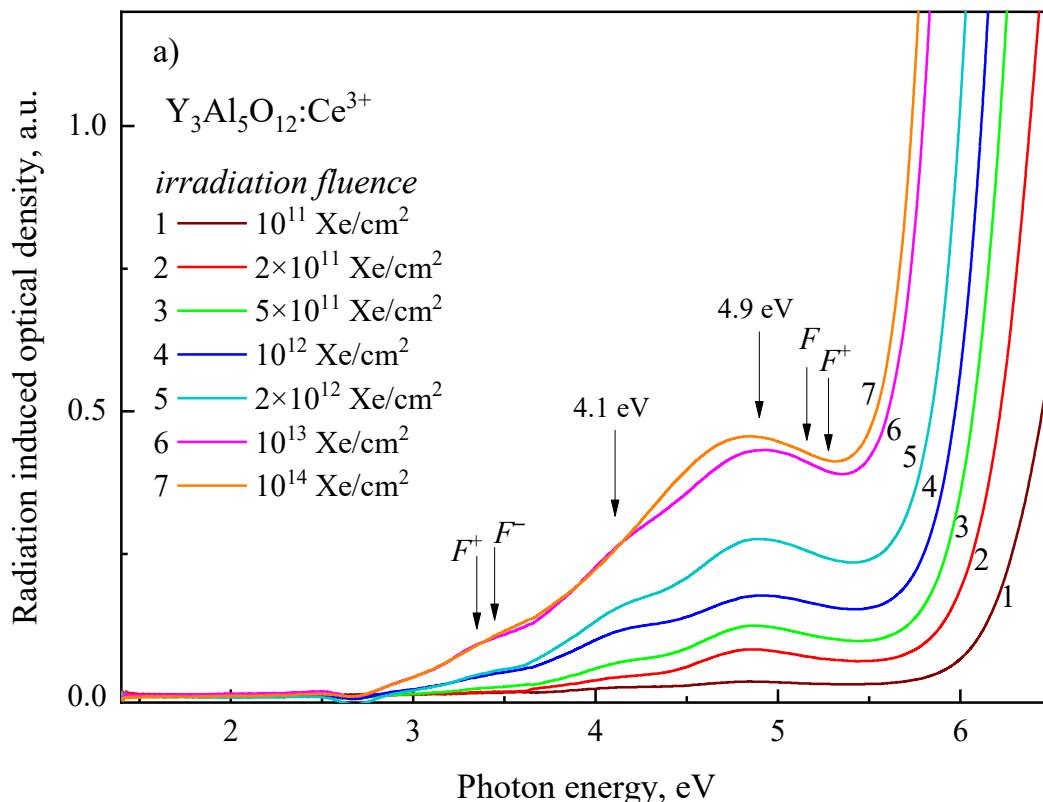
На рисунке 1а представлены спектры радиационно-индуцированного оптического поглощения монокристаллов YAG:Ce, облученных ионами Xe^{132} в интервале флюенсов

10^{11} - 10^{14} ион/см². Общий характер спектров демонстрирует рост радиационно-индуцированного оптического поглощения с увеличением дозы облучения. Радиационные дефекты как в чистых YAG, так и легированных проявляются в виде кислородных вакансий как нейтральных, так и заряженных. Кислородная вакансия, захватившая два электрона называется F-центром (поглощение около 6.35), кислородная вакансия с одним захваченным электроном называется F⁺-центром (поглощение около 5.27 и 3.35 эВ) [11].

В матрице YAG ионы Ce³⁺ замещают ионы Y³⁺ в позициях D₂ симметрии, в результате 5d возбужденное состояние Ce³⁺ расщепляется на 5 подуровней. Согласно литературным данным [12] полосы около 5.46, 3.65, и 2.70 эВ соответствуют переходам 4f¹ \rightarrow 5d¹ в Ce³⁺ (рисунок 1б, кривая 4).

Из разностных (рисунок 1б) спектров РИОА можно выделить несколько заметных доминантных полос поглощения при 3.35, 4.1 и 4.9 эВ. Поглощение около 3.35 эВ, очевидно, связано с F⁺ центрами, тогда как полосы при 4.1 и 4.9 эВ, согласно [13], могут быть связаны с поглощением F⁺ центров около YAl³⁺ антисайт дефектов и Fe²⁺ центров, соответственно. На максимальном флюенсе можно заметить смещение полосы 4.9 эВ. Образование F⁺ центров маловероятно, т.к. их термическая стабильность низка. Данные центры нестабильны уже при температуре 175 К и при комнатной температуре этих центров не существует [14].

На рисунке 1с представлены кривые зависимости радиационно-индуцированного оптического поглощения для разных значений энергии фотона от флюенса облучения. Как мы можем видеть, с ростом флюенса облучения все указанные полосы имеют заметный рост.



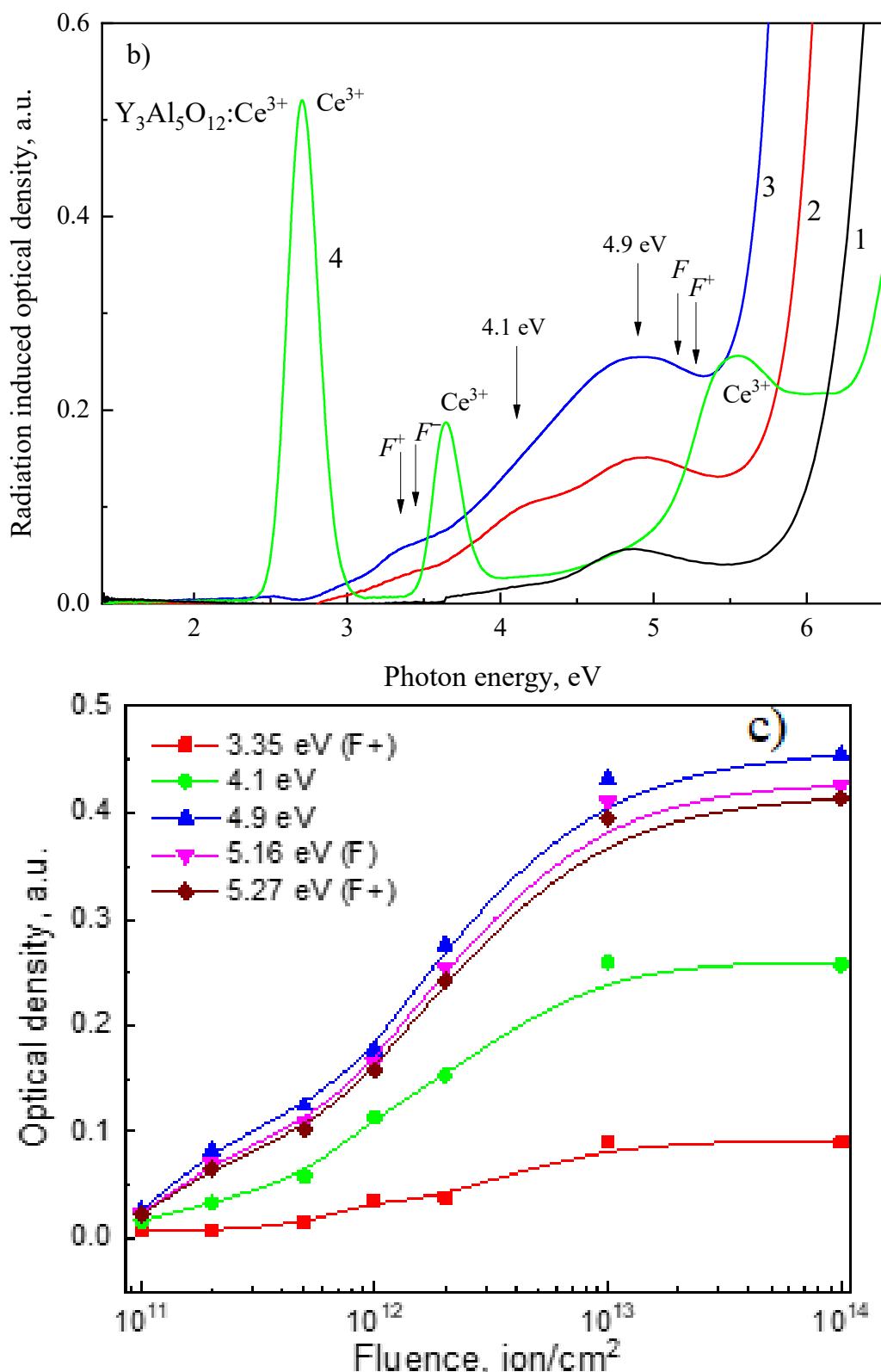
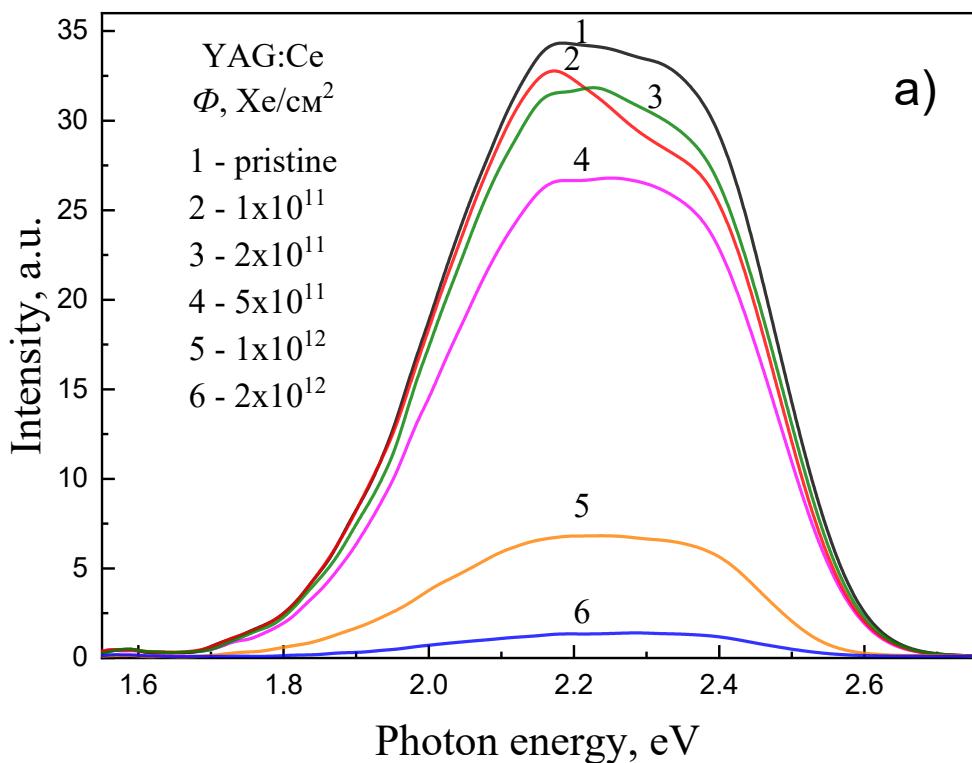


Рисунок 1. а) Спектры RIOA монокристаллов YAG:Ce, облученных ионами ксенона с энергией 230 МэВ, до различных флюенсов ионов; б) Разность спектров оптического

поглощения между облучением до соответствующих флюенсов: $(10^{11} \rightarrow 2 \times 10^{11}) \text{ Xe/cm}^2$ (кривая 1), $(10^{11} \rightarrow 10^{12}) \text{ Xe/cm}^2$ (кривая 2), $(10^{12} \rightarrow 10^{13}) \text{ Xe/cm}^2$ (кривая 3) и оптическое поглощение, связанное с ионами Ce (кривая 4); с) Зависимости радиационно-индуцированного оптического поглощения для разных значений энергии фотона от флюенса облучения

На рисунке 2 представлены спектры фотолюминесценции монокристаллов YAG:Ce, подвергнутых облучению ионами ^{132}Xe в интервале флюенсов от 10^{11} до 10^{12} Xe/cm^2 . Спектры получены при возбуждении фотонами с энергией фотона $\approx 3,65$ эВ, а эмиссия регистрировалась в диапазоне 1,55-2,75 эВ. Спектры были измерены в одинаковых условиях по интенсивности для наглядного сравнения. Во всех случаях максимум люминесценции наблюдается в области около 1,8-2,5 эВ, что соответствует переходу $5d \rightarrow 4f$ ионов Ce^{3+} , характерному для кристаллов YAG. Фотолюминесцентные исследования кристаллов YAG:Ce после облучения ионами ксенона показали существенное снижение световыххода с увеличением флюенса.



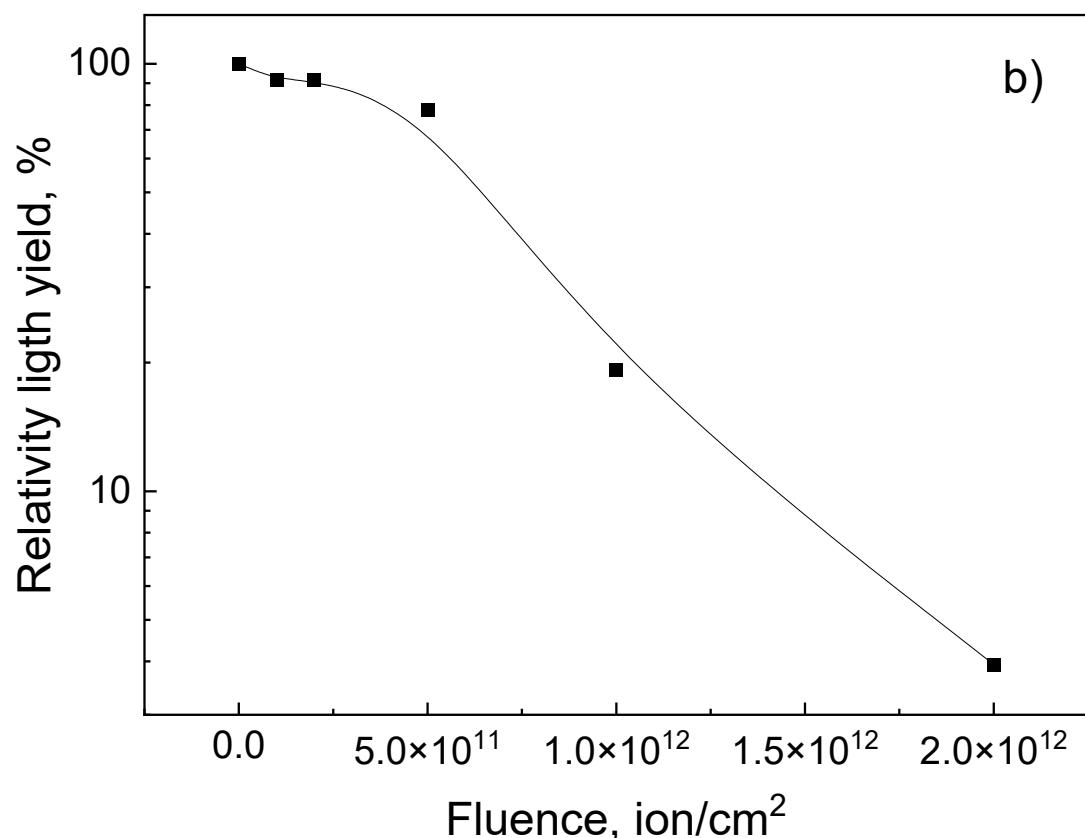


Рисунок 2. а) Спектр фотолюминесценции монокристаллов YAG:Ce, подвергнутых облучению ионами ^{132}Xe в интервале флюенсов: $10^{11}\text{Xe}/\text{см}^2$, $2 \times 10^{11}\text{Xe}/\text{см}^2$, $5 \times 10^{11}\text{Xe}/\text{см}^2$, $10^{12}\text{Xe}/\text{см}^2$, $2 \times 10^{12}\text{Xe}/\text{см}^2$; б) Сравнение изменения световыхходы фотолюминесценции в зависимости от флюенса облучения

Интенсивность люминесценции оценивалась интегралом под спектрами, при этом необлучённый образец принят за 100 %. На низких дозах до $\sim 5 \times 10^{11} \text{ Xe}/\text{см}^2$ наблюдается лишь незначительное падение световыххода, что указывает на начальную стадию формирования радиационно-индуцированных дефектов без существенной деградации активных центров Ce^{3+} . Однако при дальнейшем увеличении флюенса до $10^{12} \text{ Xe}/\text{см}^2$ световыхход резко снижается, что связано с накоплением плотных областей аморфизации, перекрывающих зоны рекомбинации и увеличивающих вероятность безызлучательных процессов релаксации. При максимальном флюенсе $2 \times 10^{12}\text{Xe}/\text{см}^2$ световыхход люминесценции падает почти 2%, что свидетельствует о деградации кристаллической матрицы и люминесценции Ce^{3+} -центров. Полученные результаты демонстрируют прямую зависимость световыххода от плотности ионных треков и подтверждают доминирование радиационных дефектов как основных центров тушения люминесценции в YAG:Ce при ионном облучении. Полученные данные указывают на существование порогового значения флюенса, превышение которого вызывает существенную деградацию фотолюминесцентных свойств YAG:Ce.

На рисунке 3 представлены спектры фотолюминесцентного возбуждения кристаллов YAG:Ce, облученных тяжелыми ионами Xe^{132} с энергией 230 МэВ в диапазоне флюенсов от 10^{11} до 10^{12} Xe/cm^2 . Для сравнения также приведен спектр необлученного образца (черная кривая). Во всех спектрах отчетливо наблюдается основной люминесцентный пик в диапазоне 2,4-2,6 эВ, соответствующий разрешенному переходу $5d \rightarrow 4f$ ионов Ce^{3+} . Этот переход отвечает за характерное желтое свечение YAG:Ce и является основным индикатором состояния люминесцентных центров. С увеличением флюенса ионного облучения наблюдается выраженное снижение при максимальном флюенсе 10^{12} ион/ cm^2 , что свидетельствует о значительной деградации оптических свойств. Это связано с накоплением радиационно-индуцированных дефектов в кристаллической решетке, таких, как ваканции, антисайт-дефекты и межузельные атомы, которые действуют как эффективные центры гашения. Вторичный пик в области 3,2-3,4 эВ, который может быть обусловлен переходами на дефектные уровни или возбужденными состояниями Ce^{3+} , также демонстрирует снижение интенсивности с ростом флюенса.

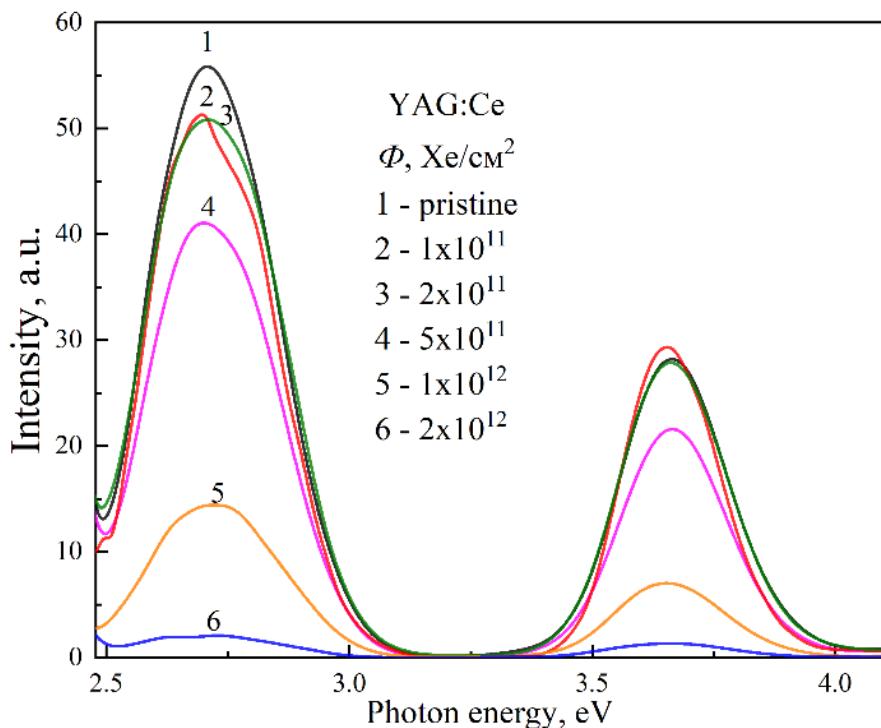


Рисунок 3. Спектры фотолюминесцентного возбуждения кристаллов YAG:Ce, измеренные при фиксированной длине волны эмиссии 550 нм (энергия 2,25 эВ), в диапазоне флюенсов: $10^{11} Xe/cm^2$, $2 \times 10^{11} Xe/cm^2$, $5 \times 10^{11} Xe/cm^2$, $10^{12} Xe/cm^2$, $2 \times 10^{12} Xe/cm^2$

При рассмотрении YAG:Ce как материала для оптоэлектронных или сцинтилляционных приложений необходимо учитывать его чувствительность к радиационным воздействиям, особенно при использовании в условиях жесткой радиационной среды (например, в космосе, ускорителях, ядерной медицине и т.д.).

Заключение

Проявления образования точечных дефектов решётки (центры F и F⁺, антиузловые дефекты Y_{Al}³⁺), а также процессов перезарядки примесных ионов (в частности, Ce³⁺ → Ce⁴⁺) были рассмотрены на основе спектров оптического поглощения кристаллов YAG, облучённых высокоэнергетичными ионами Xe при различных флюенсах. В силу относительно небольшой абсолютной концентрации дефектов Френкеля, индуцированных ионным облучением, требуется более детальный анализ их характеристик.

Облучение кристаллов YAG:Ce ионами Xe приводит к снижению интенсивности люминесценции с ростом флюенса. Особенно сильное подавление наблюдается при флюенсах $\geq 10^{12}$ ион/см², что связано с накоплением радиационных дефектов. Это указывает на чувствительность материала к высокоэнергетическому воздействию и важность учета порогового значения флюенса при практическом применении.

Благодарность

Данное исследование выполнено в рамках грантового проекта №AP19574768 «Экспериментальное и теоретическое исследование радиационной стойкости функциональных керамических и кристаллических материалов для космических применений и ядерной энергетики».

Вклад авторов

Турсумбаева Г. – написание текста и списка литературы, обработка экспериментальных данных.

Баубекова Г. – руководство по исследованию, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Асылбаев Р. – внес вклад в концепцию статьи.

Карипбаев Ж. – проведение эксперимента, подготовка экспериментального оборудования, организация и контроль сбора данных во время всего эксперимента.

Кисабекова А., Акилбеков А.Т. – внесли вклад в оформление статьи.

Список литературы

Z. Song, et al, After-glow, luminescent thermal quenching, and energy band structure of Ce-doped yttrium aluminum-gallium garnets, Journal of Luminescence 192, p. 1278-1287 (2017), DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.09.008>

V. Tucureanu and D.Munteanu, Enhanced optical properties of YAG:Ce yellow phosphor by modification with gold nanoparticles, Ceramics International 45. (6), p.7641-7648 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.061>

Y.X. Pan, et al, Correlation between structure variation and luminescence red shift in YAG: Ce, Journal of Alloys and Compounds 488(2), p.638-642 (2009). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.082>

Y.C. Lin, Dynamic Local Structural Symmetries and Luminescence Properties of the Yellow Emitting Phosphor Ce³⁺- Doped Y₃Al₅O₁₂, MS thesis Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), p. 6-8 (2016).

M.T. Lucchini, et al, Radiation tolerance of LuAG:Ce and YAG:Ce crystals under high levels of gamma- and proton-irradiation, IEEE Transactions on Nuclear Science 63 (2), p. 586-590 (2016). DOI:10.1109/TNS.2015.2493347

M. Korzhik, Ce doped garnet structure crystalline scintillation materials for HEP instrumentation, Journal of Instrumentation 15 (08), p. C08001 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/08/C08001

V. Dormenev, et al, Radiation tolerant YAG:Ce scintillation crystals grown under reducing Ar+ CO atmosphere, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 1015, p. 165764 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165764>

A. Vaddigiri, et al, Ionizing radiation effects in single-crystal and polycrystalline YAG, IEEE transactions on nuclear science 53(6), p. 3882-3888 (2006). DOI:10.1109/TNS.2006.885951

G.S. Was, et al, Emulation of reactor irradiation damage using ion beams, Scripta Materialia 88, p.33-36 (2014). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.06.003>

G.S. Was, Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation, Journal of Materials Research 30(9), p.1158-1182 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.73>

Sh. Payziyev, et al, Luminescence sensitization properties of Ce: Nd: YAG materials for solar pumped lasers, Optics Communications 499, p.127283 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127283>

Y. Guo, et al, Growth and optical properties of the Nd, Ce: YAG laser crystal, Journal of Luminescence 236, p.118134 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118134>

Y. Dong, et al, Color centers and charge state change in Ce:YAG crystals grown by temperature gradient techniques, Journal of crystal growth 286 (2), p. 476-480 (2006). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.09.029>

J. Bok, P. Horodyský and V. Krzyžánek, Effect of oxidation annealing on optical properties of YAG:Ce single crystals, Optical Materials 46, p.591-595 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.05.035>

Г. Тұрсұмбаева^{1*}, Г. Баубекова¹, Р. Асылбаев², Ж. Карипбаев¹, А. Кисабекова², А.Т. Ақилбеков¹

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

²Ә. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

(E-mail: gptursumbayeva@gmail.com)

Энергиясы 231 МэВ Xe¹³² иондарымен сәулеленген YAG:Ce монокристалдарының оптикалық және люминесценциялық қасиеттері

Аннотация. Зерттеу барысында ксенониондарының Xe¹³² (230 МэВ) Y₃A₁₅O₁₂:Ce (YAG:Ce) кристалдарының оптикалық және люминесценттік қасиеттеріне әсерін талдау жүргізілді. Сәулелендіру Френкель ақауларын (F, F⁺), антиузельдік бұзылыстарды индуцирлейді және Ce³⁺ иондарының әмиссиясын бәсекедетуге алып келеді, сондай-ақ, бұл құбылыс сәулеленусіз релаксация механизмдерінің қүшесінде жағдайда Ce³⁺ → Ce⁴⁺ төртіншіліктерінде жаңа тәсілдердің қарқындылығының тәмемдеуіне әкелетіні анықталды, бұл тор ақауларының, соның ішінде оттектік вакансиялар мен антиқұрылымдық бұзылыстардың

түзілуімен байланысты. Сондай-ақ қерійдің валенттік күйінің өзгерістері ($\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$) байқалды. Алынған деректер YAG:Ce кристалдарындағы радиациялық-индуцирленген өзгерістер механизмдерін анып көрсетеді және дебүлоның радиацияға тәзімдісцинтилляциялық детекторларда қолданылуы үшін маңызды. Xe^{132} иондарымен ($E=230$ МэВ) 10^{11} - 10^{14} ион/ cm^2 флюенстерінде сәулелендіру Френкель ақауларын (F , F^+) және антиузельдік бұзылыстарын тудырып, Ce^{3+} әмиссиясын сәулеленусіз процестердің күшесінде $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$ қайта зарядталуы есебінен әлсіретеді. Қозу спектрлерінде экситондық жолақтардың бәсендесінде және қозу табалдырығының ығысуы тіркелді, бұл кристалл торындағы құрылымдық ретсіздіктің өсуімен байланысты. Бұл нәтижелер YAG:Ce қасиеттерін оңтайландыру мақсатында радиациялық әсерлерді зерттеудің маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: иттрий-алюминий гранаты, жылдам ауыр иондар, люминесценттік қасиеттері, люминесценция және қоздыру спектрлері, радиациялық ақаулар.

G. Tursumbayeva¹, G. Baubekova¹, R. Asylbaev², Zh. Karipbayev¹, A. Kissabekova², A. Akilbekov¹

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

²*A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan*

(E-mail: gptursumbayeva@gmail.com)

Optical and luminescent properties of YAG:Ce single crystals irradiated with 231 MeV Xe^{132} ions

Abstract. The study examined the impact of irradiation with Xe^{132} ions (230 MeV) on the optical and luminescent properties of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_12:\text{Ce}$ (YAG:Ce) crystals. Irradiation induces Frenkel defects (F , F^+) and anti-site disorders, leading to the suppression of Ce^{3+} ion emission due to enhanced non-radiative mechanisms and the transition of Ce^{3+} to Ce^{4+} . It was found that increasing fluence reduces the intensity of Ce^{3+} luminescence, linked to the formation of lattice defects, including oxygen vacancies and anti-structural disorders. Changes in the valence state of cerium ($\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$) were also observed. The obtained data reveal the mechanisms of radiation-induced changes in YAG:Ce, which is crucial for its application in radiation-resistant scintillation detectors. Irradiation with Xe^{132} ions (230 MeV) at fluences from 10^{11} to 10^{14} ions/ cm^2 triggers the formation of Frenkel defects (F , F^+) and anti-site disorders, weakening Ce^{3+} emission through the activation of non-radiative processes and the recharging of $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+}$. In excitation spectra, the suppression of exciton peaks and a shift in the excitation threshold are noted, attributed to increased structural disorder in the crystal lattice. These findings underscore the importance of studying radiation effects to optimize YAG:Ce properties for practical applications.

Keywords: Yttrium Aluminum Garnet, swift heavy ions, luminescent properties, luminescence and excitation spectra, radiation defects.

References

Z. Song, et al, After-glow, luminescent thermal quenching, and energy band structure of Ce-doped yttrium aluminum-gallium garnets, Journal of Luminescence 192, p. 1278-1287 (2017), DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.09.008>

V. Tucureanu and D.Munteanu, Enhanced optical properties of YAG:Ce yellow phosphor by modification with gold nanoparticles, Ceramics International 45. (6), p.7641-7648 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.061>

Y.X. Pan, et al, Correlation between structure variation and luminescence red shift in YAG: Ce, Journal of Alloys and Compounds 488(2), p.638-642 (2009). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.04.082>

Y.C. Lin, Dynamic Local Structural Symmetries and Luminescence Properties of the Yellow Emitting Phosphor Ce³⁺- Doped Y₃Al₅O₁₂, MS thesis Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), p. 6-8 (2016).

M.T. Lucchini, et al, Radiation tolerance of LuAG:Ce and YAG:Ce crystals under high levels of gamma- and proton-irradiation, IEEE Transactions on Nuclear Science 63 (2), p. 586-590 (2016). DOI:10.1109/TNS.2015.2493347

M. Korzhik, Ce doped garnet structure crystalline scintillation materials for HEP instrumentation, Journal of Instrumentation 15 (08), p. C08001 (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/08/C08001

V. Dormenev, et al, Radiation tolerant YAG:Ce scintillation crystals grown under reducing Ar+ CO atmosphere, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 1015, p. 165764 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165764>

A. Vaddigiri, et al, Ionizing radiation effects in single-crystal and polycrystalline YAG, IEEE transactions on nuclear science 53(6), p. 3882-3888 (2006). DOI:10.1109/TNS.2006.885951

G.S. Was, et al, Emulation of reactor irradiation damage using ion beams, Scripta Materialia 88, p.33-36 (2014). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2014.06.003>

G.S. Was, Challenges to the use of ion irradiation for emulating reactor irradiation, Journal of Materials Research 30(9), p.1158-1182 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.73>

Sh. Payziyev, et al, Luminescence sensitization properties of Ce: Nd: YAG materials for solar pumped lasers, Optics Communications 499, p.127283 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127283>

Y. Guo, et al, Growth and optical properties of the Nd, Ce: YAG laser crystal, Journal of Luminescence 236, p.118134 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118134>

Y. Dong, et al, Color centers and charge state change in Ce:YAG crystals grown by temperature gradient techniques, Journal of crystal growth 286 (2), p. 476-480 (2006). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2005.09.029>

J. Bok, P. Horodyský and V. Krzyžánek, Effect of oxidation annealing on optical properties of YAG:Ce single crystals, Optical Materials 46, p.591-595 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.05.035>

Сведения об авторах:

Тұрсұмбаева Г – докторант 3-го курса по специальности «8D05323-Техническая физика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, Астана, 010000, Казахстан.

Баубекова Г – PhD, и.о.доцента кафедры «Техническая физика», Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Кажымукана, 13, 010000, Астана, Казахстан.

Асылбаев Р – PhD, доцент, Высшая школа естествознания, Университет Маргулана, ул.Торайгырова, 58, Павлодар,140000, Казахстан.

Карипбаев Ж. – PhD, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Кажымукана 13, 010000, Астана, Казахстан.

Кисабекова А. – ассоциированный профессор, Высшая школа естествознания, Университет Маргулана, ул.Торайғырова, 58, Павлодар, 140000, Казахстан.

Акилбеков А.Т. – профессор кафедры «Техническая физика», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Кажымукана, 13, Астана, 010000, Казахстан.

Турсумбаева Г. – «техникалық физика» кафедрасының 3-ші курс докторанты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан, 13, 010000, Қазақстан.

Баубекова Г. – PhD, «техникалық физика» кафедрасының доцент міндетін атқарушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.

Асылбаев Р. – PhD, Марғұлан университеті, Жаратылыстану жоғары мектебінің доценті, Павлодар, Торайғырова, 58, 140000, Қазақстан

Карипбаев Ж. – «техникалық физика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.

Кисабекова А. – PhD, Марғұлан университеті, Жаратылыстану жоғары мектебінің қауымдастырылған профессоры, Павлодар, Торайғырова, 58, 140000, Қазақстан

Акилбеков А.Т. – «техникалық физика» кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қажымұқан 13, 010000, Қазақстан.

Tursumbayeva G. – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

Baubekova G. – PhD, Acting Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

Asylbaev R. – PhD, Assistant Professor of the Higher School of Natural Sciences, Margulan University, Pavlodar, 140000, Kazakhstan.

Karipbayev Zh. – PhD, Associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.

Kissabekova A. – PhD, Associate Professor Higher School of Natural Sciences, Margulan University, Pavlodar, 140000, Kazakhstan.

Akilbekov A.T. – Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).