

02

Влияние термического отжига на гамма-индуцированные центры окраски и активаторное свечение в сцинтилляторных кристаллах $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$

© А.Х. Исламов¹, Э.М. Ибрагимова¹, Х.К. Кудратов¹, Д.С. Расулкулова²

¹ Институт ядерной физики АН,
100214, пос. Улугбек, Ташкент, Узбекистан

² Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН Узбекистана,
100125 Ташкент, Узбекистан

e-mail: akhatqul@inp.uz; ibragimova@inp.uz

Поступила в редакцию 22.11.2022 г.

В окончательной редакции 30.05.2023 г.

Принята к публикации 26.07.2023 г.

Оксиортосиликат лютетия, легированный церием ($\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$), используется как сцинтиллятор для регистрации ядерных излучений. Однако после гамма-облучения (^{60}Co) высокой дозой $5 \cdot 10^6$ Gy при 310 K выход гамма-люминесценции (ГЛ) снижается на 25%. Для выяснения причин и механизма этого снижения исследованы изохронный термический отжиг наведенных оптических центров окраски и восстановление активаторного свечения в интервале температур от 373 до 773 K в воздухе. Показано, что после облучения наряду с полосами 238 (F-центр), 263 ($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$) и 293 nm (Ce^{3+}/F^+) также регистрируется полоса поглощения 422 nm, которая предположительно связана с дефектным $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ -центром и ответственна за желтую окраску и снижение ГЛ в полосах 399 (Ce1-центр) и 450 nm (Ce2-центр). При температурах > 573 K F-центры и $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ -комплексы отжигаются, и ГЛ восстанавливается до исходного уровня, что связано с миграцией междоузельного кислорода к анионной вакансии и залечиванием радиационного дефекта.

Ключевые слова: $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$, гамма-облучение, центры окраски, термический отжиг, гамма-индуцированная люминесценция.

DOI: 10.61011/OS.2023.08.56295.4357-23

Введение

Оксиортосиликат лютетия, легированный церием, $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO:Ce), используется в качестве сцинтиллятора в устройствах для ядерной медицины и является перспективным для ядерной физики и космических исследований [1–3]. Кристалл LSO:Ce имеет высокую плотность 7.4 g/cm^3 , и поэтому малый объем торможения ядерных частиц; время затухания около 40 ns, поэтому он быстродействующий; светоотдача в видимом диапазоне (420 nm) более 25 000 ph/MeV , поэтому у него высокая эффективность; превосходно подходит для использования в различных 2D–3D-детекторных устройствах, работающих даже при комнатной температуре [1–3]. Для стабильной эксплуатации в условиях воздействия ядерных излучений кристаллы LSO:Ce должны обладать высокой оптической стойкостью по коэффициенту пропускания и световыходу. Поэтому проводились исследования влияния радиационных повреждений структуры LSO:Ce на оптические спектры [1–10]. Исследованы изменения спектров поглощения и люминесценции кристаллов LSO:Ce после облучения гамма-квантами ^{60}Co в интервале доз $70 - 5 \cdot 10^7$ Gy и показано, что полоса 238 nm связана с F^+ -центром (кислородная вакансия, захватившая один электрон), а полосы 263 и 293 nm — с гамма-индуцированными центрами $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ и Ce^{3+}/F

(F — кислородная вакансия, захватившая два электрона) соответственно [4]. На основании детального структурного анализа исходного кристалла [5] предположено, что образование центров окраски в УФ области спектра при дозах $> 5 \cdot 10^4$ Gy и их конкуренция в захвате носителей заряда приводят к уменьшению интенсивности полос гамма-люминесценции (ГЛ) 399 и 420 nm (Ce1-центров) и 450 nm (Ce2-центров). Изучая оптическое пропускание в видимой области спектра от 350 до 700 nm в LSO:Ce толщиной 20 mm после гамма-облучения дозой 10^8 Rad, авторы [6] наблюдали уменьшение коэффициентов пропускания в области полосы свечения 420 nm. Авторы [7,8] обнаружили желтую окраску некоторых кристаллов, выращенных в атмосфере N_2 , в спектрах пропускания которых (в отличие от бесцветных образцов) обнаруживается полоса поглощения с максимумом при 430 nm. После облучения гамма-дозой $2.4 \cdot 10^4$ Rad такая же полоса поглощения приобретает некоторыми изначально бесцветными образцами [7]. Наведенная полоса поглощения 430 nm почти полностью удаляется термическим отжигом в газовом потоке (N_2) при 300°C (573 K) в течение одного дня (сколько часов не указано) [6] или при отжиге на воздухе при этой же температуре за меньшее время отжига, чем 20 h в азоте, что связано с гамма-индуцированным дефектом [7]. Авторы [6] полагают, что центры захвата в ловушке могут

лежать относительно близко к зоне проводимости, которая образована гамма-радиацией, поэтому термический отжиг восстанавливает оптическое пропускание.

Желтый цвет кристалла LSO:Ce, приобретенный при выращивании по методу Чохральского, приписывают к дефектам решетки вокруг/около ионов Ce^{4+} [8]. Имеются различные мнения о желтой окраске. Анализ этих данных свидетельствует, что наведенная полоса поглощения в области 420–430 nm перекрывается сцинтилляционным свечением в широкой полосе 420 nm, следовательно, она может влиять на радиационную чувствительность сцинтилляционного кристалла LSO:Ce. Так что выяснение природы полос поглощения в области 430 nm и в УФ области спектра, а также изучение их термической стабильности может установить причину снижения выхода активаторного свечения после дозы гамма-квантов $> 5 \cdot 10^4$ Gy в LSO:Ce [4].

В связи с этим целью настоящей работы являются комплексные исследования эффекта термического отжига на оптическое поглощение и ГЛ в гамма-облученных дозой $5 \cdot 10^6$ Gy кристаллах LSO:Ce толщинами 1 и 3 mm (для анализа в УФ и видимой областях), когда заметно снижение выхода активаторного свечения.

Объект и методы исследований

Образцы монокристаллов LSO:Ce³⁺ (концентрация Ce 0.25 at.%) были выращены методом Чохральского в атмосфере азота (N₂), содержащей 3000 ppm кислорода (O₂) (Scintillation Materials Research Center, Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, USA). Образцы были бесцветными.

Для оптических исследований были вырезаны пластинки размерами $7 \times 3 \times 1$ mm из одной були размером $15 \times 15 \times 3$ mm, две грани (7×3 mm) которых оптически полировали. Образцы размерами $7 \times 3 \times 3$ mm уже имели полировку.

Для ограничения воздействия атмосферы на поверхность образцы завернули в алюминиевую фольгу и облучали в Институте ядерной физики АН РУз в сухом канале источника гамма-квантами ⁶⁰Co с энергиями 1.17 и 1.33 MeV при мощности дозы 1.1 Gy/s до дозы $5 \cdot 10^6$ Gy при температуре 310 K. Для предотвращения возможного фотообесцвечивания при воздействии дневного света облученные образцы хранились в алюминиевой фольге от начала облучения до момента установки в закрытую измерительную ячейку спектрального прибора.

Термический изохронный отжиг LSO:Ce³⁺, облученных гамма-дозой $5 \cdot 10^6$ Gy, проводился в муфельной печи со скоростью нагрева 10 grad/min последовательными ступенями при 373, 473, 573, 673 и 773 K в воздухе. После выдержки при каждой температуре в течение 40 min образец охлаждался до комнатной температуры в выключенной печи.

Спектры оптического поглощения (ОП) до и после облучения в образцах LSO:Ce³⁺ толщиной 1 и 3 mm были измерены при температуре 305 K на спектрофотометре СФ-56 (ЛОМО) в спектральной области 190–1100 nm. Интервал времени от прекращения облучения до начала измерений спектров ОП составлял 10 min.

Спектры ГЛ LSO:Ce³⁺ размером $7 \times 3 \times 3$ mm регистрировали в измерительной ячейке в этом же сухом канале гамма-источника при мощности 1.1 Gy/s (во время развертки спектра ГЛ в спектральной области 200–600 nm образец набирает дозу 330 Gy) при температуре 310 K с выведением свечения с помощью полированных алюминиевых трубок и зеркала на входную щель дифракционного монохроматора МДР-12 с ФЭУ-39, защищенных от мощного гамма-излучения. Для определения сигнала фона измерения спектра свечения проводятся сначала в пустой ячейке, фон потом вычитается из спектра ГЛ образца.

Результаты и их обсуждение

В УФ области спектра ОП необлученных образцов LSO:Ce толщиной 1 mm наблюдаются частично перекрытые полосы поглощения 238, 263 и 293 nm, а также интенсивная полоса 360 nm (рис. 1, *a*, кривая 1), аналогичные спектрам, которые были ранее опубликованы в работах [4,9–11] и связанные с переходами ($4f \rightarrow 5d$) иона Ce³⁺ [9–11]. После гамма-облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy происходит сильный рост коэффициента поглощения α (см⁻¹) на длинах волн 238, 263 и 293 nm, хотя отдельная полоса 360 nm активаторного Ce³⁺-центра практически не изменяется (рис. 1, *a*, кривая 2).

На рис. 1, *b* представлены спектры необлученного (кривая 1) и облученного дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривая 2) образцов толщиной 3 mm, где более отчетливо изменения коэффициента поглощения α (см⁻¹) в области > 370 nm, которая охватывает сцинтилляционное свечение на 420 nm в кристаллах LSO:Ce [6,7]. После облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy появляется желтая окраска, наблюдается рост коэффициента ОП в области 390–550 nm (кривая 2) в сравнении в исходном образце (кривая 1). Полученные спектры аналогичны спектрам оптического пропускания при гамма-облучении дозами $2.4 \cdot 10^4$ Rad ($2.4 \cdot 10^2$ Gy) [7], 10^8 Rad (10^6 Gy) LSO:Ce [6], 10^6 Rad (10^4 Gy) Ce:Sc:LPS [12] и в кристалле LYSO:Ce, выращенном методом Чохральского [13]. Далее нами произведено разложение на гауссианы дифференциального спектра ОП образцов исходного и облученного дозой $5 \cdot 10^6$ Gy. В видимой области выделены две полосы с максимумами при 3.23 eV — 383 nm (G1) и 2.93 eV — 422 nm (G2) (рис. 2). Полученный результат согласуется с результатом разложения на гауссианы дифференциальных спектров образцов исходного и гамма-облученного дозой $2.4 \cdot 10^2$ Gy [7], где тоже выделяются две полосы поглощения 390 и 430 nm. Так что после гамма-облучения высокой дозой $5 \cdot 10^6$ Gy наведенная широкая

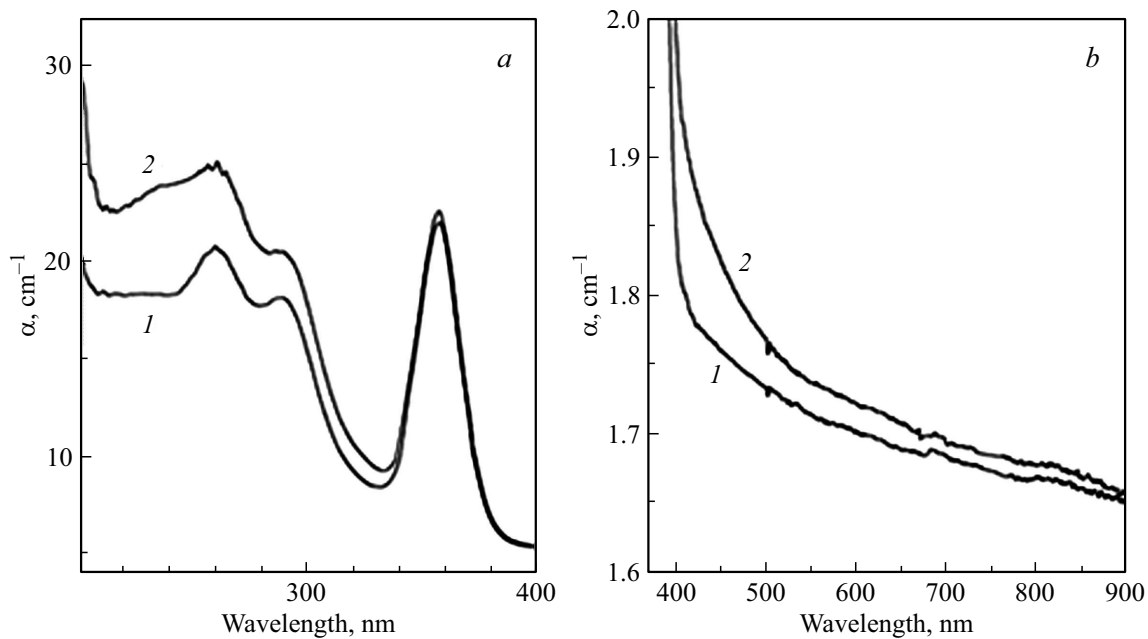


Рис. 1. Спектры поглощения активированных кристаллов LSO:Ce в (а) УФ (толщина 1 мм) и (б) видимой областях (3 мм): исходные необлученные (кривые 1) и после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривые 2).

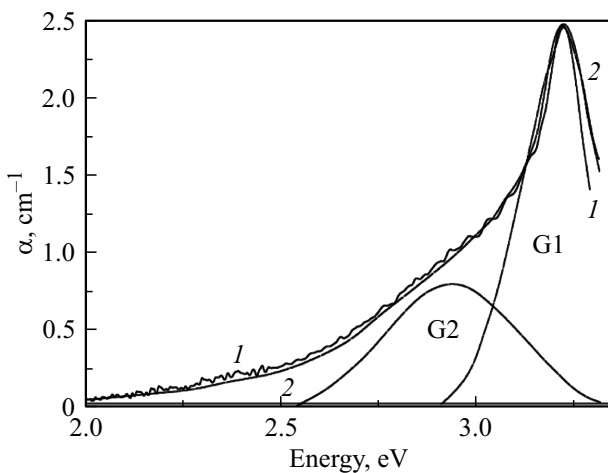


Рис. 2. Разностный спектр между спектрами поглощения кристалла LSO:Ce (рис. 1, б) исходного и после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривая 1), гауссовы составляющие полос поглощения кривые — 3.23 (G1) и 2.93 eV (G2) и их сумма (кривая 2).

область 370–550 nm (рис. 1, б, кривая 2) состоит из ОП полос 383 и 422 nm.

Известно, что при упругом воздействии нейтронов [14–16] или протонов [17] на номинально чистые оксидные кристаллы $Y_3Al_5O_{12}$ [14] и $Lu_3Al_5O_{12}$ [15] с кубической структурой, Y_2SiO_5 (YSO) [16] и Lu_2SiO_5 с моноклинной структурой $C2/c$ с двумя неэквивалентными металлическими узлами [17] происходят смещения атомов кислорода из анионных узлов с образованием парных дефектов структуры (собственных дефектов).

В спектрах ОП номинально чистого кристалла YSO после облучения в реакторе флюенсом 10^{17} cm^{-2} нейтронов деления в УФ области наблюдаются широкая полоса в интервале 210–340 nm и более отчетливая полоса с максимумом 300 nm (рис. 3, кривая 2) аналогично результатам в [16]. В видимой области спектра ОП наблюдается широкая полоса в интервале 350–700 nm (рис. 3, кривая 2), которая схожа со спектром в LSO:Ce после облучения гамма-дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (рис. 1, б, кривая 2), но в 2 раза интенсивнее. На основе разложения на гауссианы после облучения протонами [17] нами произведено также разложение дифференциального спектра ОП на гауссианы образцов исходного и облученного флюенсом 10^{17} cm^{-2} нейтронов. В УФ и видимой областях выделяются шесть полос с максимумами при 5.63 eV — 220 nm (кривая G1), 5.08 eV — 242 nm (кривая G2), 4.18 eV — 296 nm (кривая G3), 3.25 eV — 380 nm (кривая G4), 2.9 eV — 426 nm (кривая G5) и 2.4 eV — 516 nm (кривая G6) (рис. 4). Этот результат также подтверждает наши ранние предположения в [4] о том, что полоса 238 nm связана с F -центром, а полоса ОП 293 nm, связанная с переходами ($4f - 5d$) иона Ce^{3+} , накладывается на полосу F^+ -центра. Так что после облучения флюенсом 10^{17} cm^{-2} нейтронов наблюдаемые в номинально чистом YSO полосы ОП 3.25 eV (380 nm) и 2.9 eV (426 nm) не зависят от присутствия иона активатора Ce, поэтому, возможно, связаны со структурными дефектами в кислородной подрешетке.

В работе [18] проведены теоретические расчеты параметров решетки нелегированных и легированных LSO:Ce (замещения в катионных узлах Ce_{Lu1} и Ce_{Lu2}), которые показали, что длины связи узла Ce_{Lu1} с

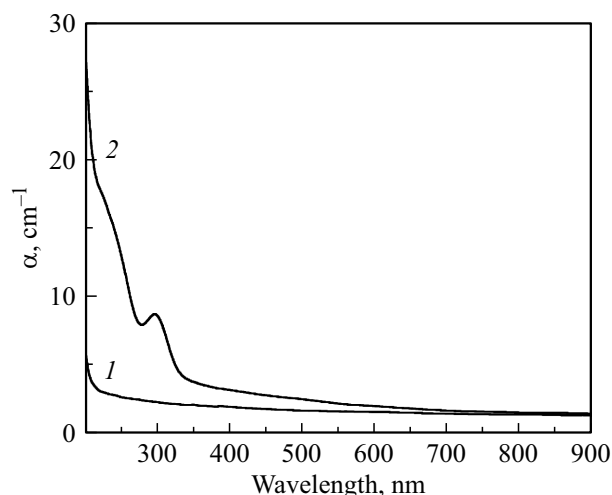


Рис. 3. Спектры поглощения кристалла YSO (толщина 1 мм): исходный (кривая 1) и после облучения флюенсом 10^{17} cm^{-2} нейтронов (кривая 2).

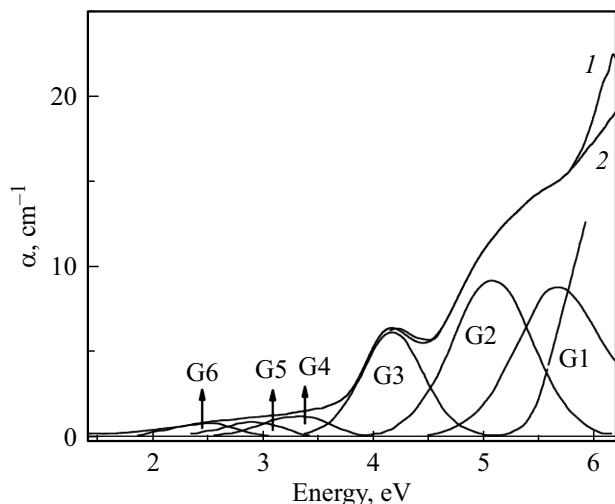


Рис. 4. Разностный спектр между спектрами поглощения кристалла YSO рис. 2 исходного и после облучения флюенсом 10^{17} cm^{-2} нейтронов (кривая 1), гауссовы составляющие полос поглощения кривой 1 — 5.63 (G1), 5.08 (G2), 4.18 (G3), 3.25 (G4), 2.9 (G5) и 2.4 eV (G6); их сумма — кривая 2.

6 ближайшими атомами кислорода увеличиваются на 0.125–0.177 Å, а $\text{Ce}_{\text{Lu}2}$ — на 0.126–0.169 Å по сравнению с нелегированным LSO в узлах Lu. Эти удлинения связей качественно согласуются с разностью ~ 0.16 Å между ионными радиусами Ce^{3+} и Lu^{3+} в той же координации [18,19]. В таких структурно напряженных примесных узлах замещения в легированных LSO:Ce возможно энергетически более легко образование дефектов при облучении гамма-квантами. Поэтому полагаем, что наряду с полосами ОП в УФ области 238 (F-центр) и 293 nm ($\text{Ce}^{3+}/\text{F}^{+}$ -центры) (рис. 1, а, кривая 2) полоса 430 nm связана с дефектами вакансии кислорода (VO) вокруг примеси Ce. То есть активатор Ce в LSO, возмож-

но, способствует образованию центров желтой окраски полос ОП 390 и 430 nm при облучении гамма-квантами дозой $\geq 10^5$ Gy. Далее, согласно [8], упрощенно обозначаем эти центры как $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ -центр. По нашему мнению, это связано с ростом пика термовысвечивания (ТВ) 540 K до дозы $5 \cdot 10^7$ Gy [4].

Уменьшение интенсивности полосы ГЛ активаторного Ce^{3+} -центра, появление дополнительного пика ТВ 375 K и рост пика ТВ 540 K при более высоких дозах ($> 5 \cdot 10^4$ Gy) гамма-облучения предположительно приписаны центрам окраски, индуцированным гамма-квантами [4].

Далее изучено влияние термического отжига на гамма-наведенные центры окраски, связанные с дефектами F (238 nm), $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (263 nm), $\text{Ce}^{3+}/\text{F}^{+}$ (293 nm) и Ce^{4+} (430 nm), а также на активаторное свечение в LSO:Ce.

На рис. 5, а, б приведены сравнительные спектры ОП исходного образца (кривая 1), гамма-облученного дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривая 2) и после термического отжига при 373 и 473 (кривая 3), 573 (кривая 4), 673 и 773 K (кривая 5). Как видно из рис. 5, а, значительное уменьшение коэффициентов поглощения полос ОП 238, 263 и 293 nm наблюдается после отжига при температуре 573 K (кривая 5), а после отжига при 673 и 773 K коэффициент поглощения полосы 238 nm (F-центр) уменьшается почти до уровня исходного образца (кривые 6, 7). Следует отметить, что коэффициент поглощения полосы ОП 360 nm активаторного Ce^{3+} -центра в исследованном интервале температур отжига до 773 K практически не изменяется (кривые 1–7).

Изменения коэффициентов ОП видимой полосы 430 nm с ростом температуры отжига от 373 до 773 K (рис. 5, б, кривые 3–5) такие же, как в УФ области (рис. 5, а, кривые 3–6). Следует отметить, что при температуре отжига 573 K оптические центры, связанные с дефектами F (238 nm), $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ (263 nm), $\text{Ce}^{3+}/\text{F}^{+}$ (293 nm) и $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ (430 nm) (кривая 5), полностью не отжигаются. То есть происходит термическое освобождение захваченных электронов не из всех ловушек, которые проявляются в кривых ТВ в области от 300 до 600 K [4,7,10]. Полностью термический отжиг этих центров окраски происходит при температуре отжига ≥ 673 K (рис. 5, а, б, кривые 5 и б).

Далее продолжено изучение влияния термического отжига на выход ГЛ активаторного свечения Ce^{3+} с максимумами 399 и 420 nm, связанных с Ce1-центрами (координированные семью ионами кислорода); 450 nm — с Ce2-центрами (координированные шестью ионами кислорода), обусловленные переходом $d - f$ ионов Ce^{3+} [20].

На рис. 6 приведены результаты ГЛ (во время развертки спектра ГЛ набирается доза 300 Gy) при 310 K исходного (кривая 1) и гамма-облученного дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривая 2) образцов, а также после отжига при 373 и 473 K (кривые 3, 4), 573 K (кривая 5) и 673 и 773 K (кривые 6, 7). Выход ГЛ в полосах 399, 420 и

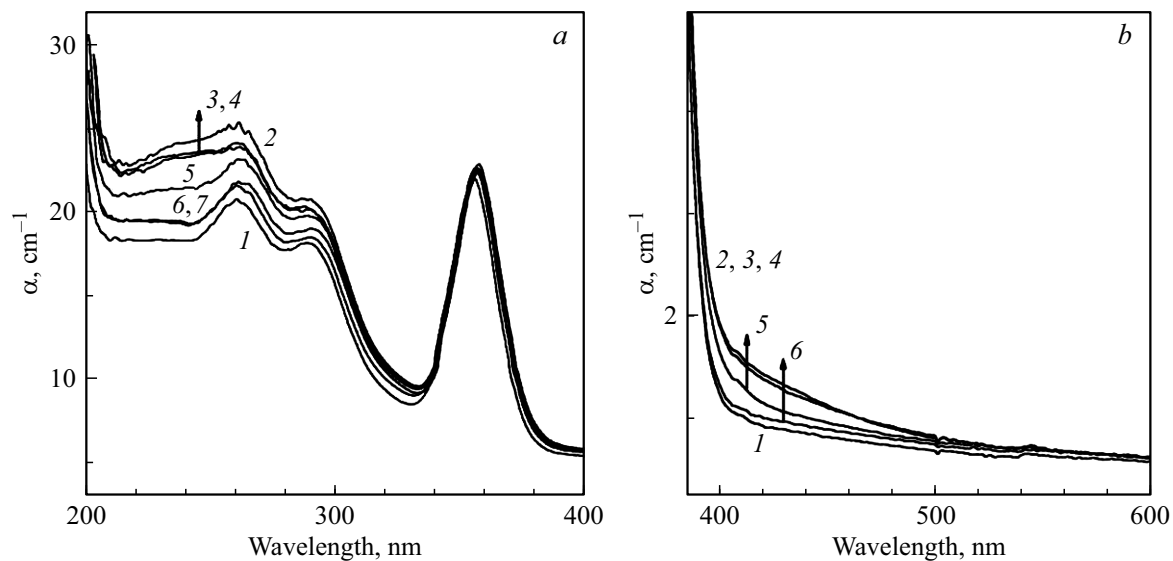


Рис. 5. Спектры поглощения активированных кристаллов LSO:Ce в разных масштабах коэффициента α : (а) УФ область (толщина 1 мм) и (б) видимая область (3 мм); исходный (кривые 1), после гамма-облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривые 2), после отжига при температурах 373 (кривые 3), 473 (кривые 4), 573 (кривые 5), 673 (кривые 6) и 773 К (кривые 7).

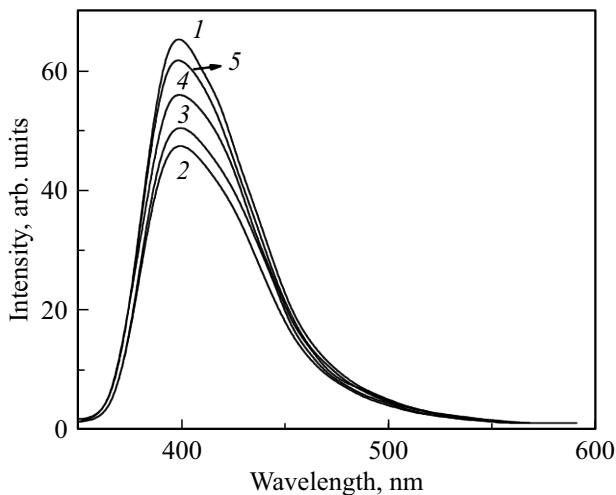


Рис. 6. Спектры гамма-люминесценции активированного кристалла LSO:Ce (толщина 3 мм): исходный (кривая 1), после гамма-облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (2) и после отжига при температурах 373, 473 (кривая 3), 573 (4) и 673, 773 К (5).

450 nm после облучения критической дозой $5 \cdot 10^6$ Gy (кривая 2) снизился $\approx 25\%$ от выхода ГЛ исходного образца (кривая 1).

После термического отжига в интервале температур 373–773 К наблюдается рост интенсивности полос ГЛ 399, 420 и 450 nm Ce^{3+} -центра (кривая 4) до необлученного уровня (кривая 1). Так что восстановление исходного выхода ГЛ активаторного свечения Ce^{3+} (центры Ce1 и Ce2) в образце, облученном критической дозой, с ростом температуры его отжига до 773 К (рис. 5, кривые 3–5) связано с отжигом конкурирующих гамма-индуцированных дефектных центров окраски

F^+ (238 nm), F (293 nm) и $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ (430 nm) (см. спектры ОП на рис. 5, а, б).

Заключение

Проведено сравнительное изучение оптических свойств (поглощение и люминесценция) кристаллов ортосиликата лютетия, активированного ионами церия (LSO:Ce), до и после гамма-облучения (^{60}Co) дозой $5 \cdot 10^6$ Gy при 310 К, а также после термического отжига гамма-наведенных оптических центров в интервале температур от 373 до 773 К в воздухе в течение 40 min.

Показано, что после облучения дозой $5 \cdot 10^6$ Gy LSO:Ce в спектре ОП наряду с полосами 238 (F), 263 ($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$) и 293 nm (Ce^{3+}/F^+) также регистрируется полоса поглощения 422 nm, которая предположительно связана с дефектным $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ -центром и ответственна за наблюдаемую желтую окраску облученных образцов.

Наблюдаемые в спектрах ОП уменьшения концентраций УФ центров F , $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ и Ce^{3+}/F^+ после термического отжига до 573 К кристалла LSO:Ce, гамма-облученного дозой $5 \cdot 10^6$ Gy с учетом регистрации кривых ТВ в интервале температур от 300 до 600 К в работах [4,7,10], по нашему мнению, возможно связаны с термическим освобождением электронов не только из УФ центров, но также из центров окраски $\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$ (422 nm), которые рекомбинируют с дырочным Ce^{4+} -центром излучательно в спектральной области 390–450 nm. Поэтому не исключен процесс частичной реабсорбции этого свечения Ce^{3+} центрами окраски в полосе поглощения 422 nm ($\text{Ce}^{4+} + \text{V}_\text{O}$), ко-

торая наблюдается при дозах облучения $\geq 5 \cdot 10^4$ Gy и полностью не отжигается до 573 K.

При температурах изохронного отжига > 573 K гамма-индуцированный междоузельный кислород диффундирует до ближайшей анионной вакансии и рекомбинирует (залечивание пары Френкеля в анионной подрешетке). Следовательно, этот процесс приводит к отжигу УФ центров F , Ce^{3+}/Ce^{4+} и Ce^{3+}/F^+ , а также центров $Ce^{4+}+V_O$ и к желтой окраске. Все эти процессы приводят к восстановлению выхода полос ГЛ 399, 420 и 450 nm Ce^{3+} -центра до уровня исходного состояния.

Можно избавиться от гамма-индуцированных центров окраски в сцинтилляторах LSO:Ce, заметных после доз облучения $> 5 \cdot 10^4$ Gy до критической дозы $5 \cdot 10^6$ Gy, с потерей 25% выхода, которые приводят к снижению выхода активаторного свечения [4], если провести термический отжиг при > 573 K в течение 60 min в воздухе. Однородный отжиг в объеме сцинтиллятора обеспечивается повышением его длительности с ростом его объема, например кристалл толщиной 20 mm отжигался в течение одного дня при 300, 360 и 460°C [6,7]. В указанном интервале доз $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ Gy рекомендуется вводить поправку на снижение выхода ГЛ от 0.10 до 0.25 соответственно дозе [4].

Благодарности

Авторы благодарят А.Ф. Ракова и С.L. Melcher за обсуждение результатов работы.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках бюджетной темы по Программе НИР ИЯФ АН РУз. Приложение 1 к Постановлению Президента РУз ПП-4526 от 21.11.2019.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C.L. Melcher, M. Schmand, M. Eriksson, L. Eriksson, M. Casey, R. Nutt, J.L. Lefaucheur, B. Chai. IEEE Trans. Nucl. Sci., **47**, 965 (2000).
- [2] B. Bilki. J. Physics: Conference Series, **587**, 012014 (2015). DOI: 10.1088/1742-6596/587/1/012014
- [3] R. Elftmann, J. Tammen, S.R. Kulkarni, C. Martin, S. Bottcher, R. Wimmer-Schweingruber. J. Physics: Conference Series, **632**, 012006 2015. DOI: 10.1088/1742-6596/632/1/012006
- [4] A.X. Исламов, Э.М. Ибрагимова, Х.Н. Кудратов, Р.Р. Вильданов. ФТТ, **64** (11), 1716 (2022). [A.Kh. Islamov, E.M. Ibragimova, Kh.N. Kudratov, R.R. Vildanov. Physics of the Solid State, **64** (11), 1716 (2022)].
- [5] T. Gustafsson, M. Klintonberg, S.E. Derenzo, M.J. Weber, J.O. Thomas. Acta Crystallogr. Sect. C., **57**, 668 (2001). DOI: 10.1107/S0108270101005352
- [6] M. Kobayashi, M. Ishii, C.L. Melcher. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A, **335**, 509 (1993).
- [7] L. Qin, Yu. Pei, Lu. Sheng, H. Li, Z. Yin, G.A. Ren. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A, **545**, 273 (2005).
- [8] Y.D. Zavartsev, S.A. Koutovoi, A.I. Zagumennyi. J. Crystal Growth, **275**, 2167 (2015).
- [9] C.L. Melcher, J.S. Schweitzer. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A, **314**, 212 (1992).
- [10] P. Dorenbos, van C.W.E. Eijk, A.J.J. Bost, C.L. Melcher. J. Phys.: Condens. Matter, **6** (22), 4167 (1994).
- [11] D.W. Cooke, B.L. Bennett, K.J. McClellan, J.M. Roper, M.T. Whittaker, A.M. Portis. Phys. Rev. B, **61**, 11973 (2000).
- [12] Yu.D. Zavartsev, M.V. Zavertyaev, A.I. Zagumennyi, A.F. Zerrouk, V.A. Kozlov, S.A. Kutovoi, N.V. Pestovskii, A.A. Petrov, S.Yu. Savinov. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, **43** (11), 336 (2016). DOI: 10.3103/S1068335616110051
- [13] S. Blahuta, A. Bessi re, B. Viana, P. Dorenbos, V. Ouspenski. IEEE Trans. on Nucl. Science, **60** (4), 3134 (2013). DOI: 10.1109/TNS.2013.2269700
- [14] Ш.А. Вахидов, Э.М. Ибрагимова, Б. Каипов, Г.А. Тавшунский, А.А. Юсупов. Радиационные явления в некоторых лазерных кристаллах (ФАН, Ташкент, 1977), С. 152.
- [15] A.Kh. Islamov, E.M. Ibragimova, I.A. Khayitov, R.R. Vildanov, Kh.N. Kudratov. Optical Materials, **96**, 109344 (2019). DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109344
- [16] Г.И. Икрамов, И. Нуритдинов. Радиационные явления в широкозонных оптических материалах. Тезисы Всесоюзной семинара. (ФАН, Ташкент, 1979), С. 104.
- [17] E. Auffray, A. Barysevich, A. Fedorov, M. Korjik, M. Koschan, M. Lucchini, V. Mechinski, C.L. Melcher, A. Voitovich. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, **721**, 76 (2013). DOI: 10.1016/j.nima.2013.04.065
- [18] L. Ning, L. Lin, L. Li, Ch. Wu, Ch. Duan, Y. Zhang, L. Seijo. J. Mater. Chem., **22**, 13723 (2012).
- [19] R.D. Shannon. Acta Cryst. A, **32**, 751 (1976).
- [20] H. Suzuki, T.A. Tombrello, C.L. Melcher, J.S. Schweitzer. IEEE Trans. Nucl. Sci., **40**, 380 (1993).