

02

## Центры окраски и свечения в кристаллах LuAG и LuAG:Pr до и после воздействия $^{60}\text{Co}$ гамма-излучения

© А.Х. Исламов<sup>1,2</sup>, Э.М. Ибрагимова<sup>1</sup>, И.А. Хайитов<sup>1</sup>, Р.Р. Вильданов<sup>2</sup>, М.З. Амонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики АН Узбекистана,  
100214 Ташкент, пос. Улугбек, Узбекистан

<sup>2</sup> Национальный университет Узбекистана,  
100174 Ташкент, Узбекистан

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

Поступила в редакцию 10.01.2018 г.

Проведено сравнительное изучение спектров поглощения, термолюминесценции и их релаксации в чистых кристаллах LuAG и активированных ионами празеодима LuAG:Pr для выявления вклада собственных и примесных дефектов до и после облучения гамма-квантами со средней энергией 1.25 MeV источника  $^{60}\text{Co}$  при мощности дозы 0.8 Gy/s дозой  $10^3$  Gy при 310 K. Существование собственных дефектов  $F^+$  с характерной полосой поглощения 375 nm и примесных центров  $\text{Cr}^{4+}$ , поглощающих в 285, 420, 490 и 595 nm, в обоих образцах LuAG и LuAG:Pr до облучения связано с технологией выращивания кристаллов и примесным составом шихты. Рост  $F^+$ - и  $\text{Cr}^{4+}$ -центров после гамма-облучения обусловлен зарядкой нейтральных  $F$ -центров и изменением электронного состояния (валентности) примесных ионов  $\text{Cr}^{3+}$ . Предполагается образование антиузельного дефектного комплекса  $\text{Lu}_{\text{Al}}^{3+}-\text{V}_{\text{O}}$ , ответственного за люминесценцию в полосе 335 nm. Первый широкий пик 340 K на кривых термовысвечивания обоих образцов после облучения дозой  $10^3$  Gy связан с освобождением носителей заряда из мелких уровней захвата, термическая активация и излучательная рекомбинация с центрами свечения начинается с 310 K, что ограничивает сверху интервал температур применения этих сцинтилляционных кристаллов.

DOI: 10.21883/OS.2018.07.46265.5-18

### Введение

Монокристаллы алюминиевого лютециевого граната  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (LuAG), активированного ионами празеодима ( $\text{Pr}^{3+}$ ), имеют высокую плотность ( $6.7 \text{ g/cm}^3$ ), высокий световой выход (приблизительно 20000 photon/MeV) и быстрое действие (20 ns) [1–4]. Такие физические характеристики делают этот материал многообещающим кристаллическим сцинтиллятором для применения в медицинской диагностике и установках физики высоких энергий [5,6]. Но световой выход и быстрое действие сцинтиллятора будут сильно уменьшаться за счет нежелательной локализации свободных носителей заряда на собственных и примесных дефектах и конкурирующих безызлучательных рекомбинаций. Однако в имеющейся литературе недостает данных о дефектности кристаллической матрицы чистых LuAG, из которых можно было бы оценить безызлучательные процессы, конкурирующие с излучением  $\text{Pr}^{3+}$ . Сравнительное изучение спектральных характеристик чистых кристаллов LuAG и активированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$  (LuAG:Pr) до и после гамма-облучения способствовало бы более полному пониманию природы дефектов в матрице и помогло бы поиску методов для улучшения оптических характеристик кристаллов LuAG:Pr.

Известно [7,8], что воздействие гамма-излучения на кристаллы алюмоиттриевого граната  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG), который очень близок по структуре с LuAG, является одним из информативных способов выявления доради-

ационных (или ростовых) дефектов, которые вносятся в технологическом процессе выращивания и высокотемпературной обработки кристаллов, взаимодействуют с примесями (в составе шихты) и сильно влияют на оптические характеристики.

Поэтому настоящая работа посвящена сравнительному изучению образования центров окраски и свечения в чистых кристаллах LuAG и активированных ионами  $\text{Pr}^{3+}$  LuAG до и после воздействий гамма-лучами источника  $^{60}\text{Co}$ .

### Объект и методы исследований

Образцы монокристаллов чистого LuAG и активированного ионами LuAG:Pr<sup>3+</sup> (концентрация Pr 0.22 mol.%) были выращены методом Чохральского в атмосфере аргона (Furukawa Co. Ltd, Япония). Для оптических исследований были приготовлены пластинки размером  $4 \times 4 \text{ mm}$  и толщиной 1 mm. Образцы заворачивали в алюминиевую фольгу для ограничения взаимодействия с ионизованным воздухом и облучали в Институте ядерной физики АН РУз гамма-квантами источника  $^{60}\text{Co}$  со средней энергией 1.25 MeV при мощности дозы 0.8 Gy/s и температуре 310 K дозой  $10^3$  Gy. Для предотвращения возможного фотообесцвечивания образцов при воздействии дневного света они сохранялись в алюминиевой фольге от начала облучения до момента установки в измерительную ячейку спектрального

прибора. Интервал времени от прекращения облучения до начала оптических измерений не превышал 10 min.

Спектры оптического поглощения (ОП) до и после облучения были измерены при температуре 305 K на спектрофотометрах СФ-56 (ЛОМО) и LAMBDA-35 (Perkin Elmer) в спектральной области 200–1100 nm. Интегральные пики термовысвечивания (ТВ) регистрировали с помощью ФЭУ-79 при постоянной скорости нагрева 0.25 K/s в интервале температур 300–600 K при контроле хромель-копелевой термопарой.

Спектральный состав пиков ТВ измеряли в двух спектральных интервалах 250–550 nm (свечение  $\text{Pr}^{3+}$  и собственных дефектов матрицы) и 550–800 nm с использованием специального дифракционного монохроматора (МСД-1 с ФЭУ-100), работающего в спектральной области 200–800 nm. Сканирование спектров свечения осуществляли с максимально возможной скоростью развертки дифракционной решетки 20 nm/s в непрерывном режиме. При этом за время сканирования спектра, которое в интервале 250–550 nm составляло 15 s, а для 550–800 nm — 13 s, температура росла на 4 K, что на порядок величины меньше чем полуширина пика ТВ и не могло существенно повлиять на спектр.

Для интерпретации эффектов проявления центров окраски и свечения проводили последовательный отжиг пиков ТВ в течение 20 min до температур, соответствующих минимумам на кривых ТВ, с последующим охлаждением в печи до 305 K, после чего измеряли спектры оптического поглощения.

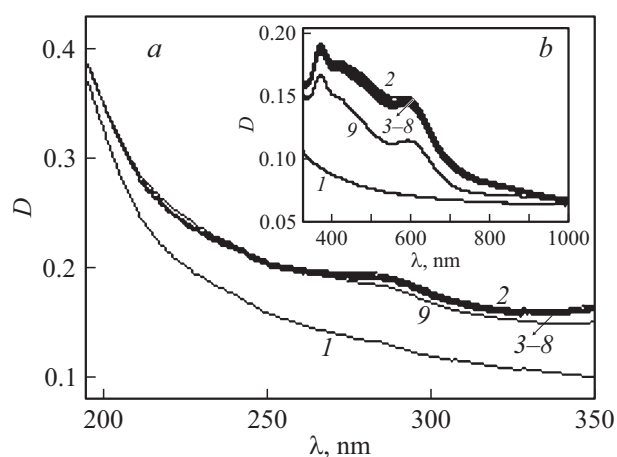
## Результаты и их обсуждение

В спектрах ОП необлученных чистых образцов LuAG наблюдаются очень слабые полосы поглощения в УФ области спектра около 240 и 285 nm (рис. 1, *a*, кривая 1) и в видимой области спектра полоса в области 595 nm (рис. 1, *b*, кривая 1).

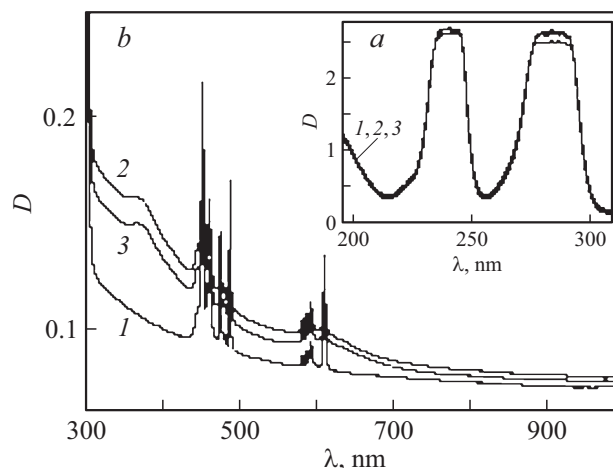
В отличие от чистых образцов в присутствии активатора LuAG:Pr в спектре ОП наблюдаются известные полосы поглощения 240 и 285 nm ( $4f \rightarrow 5d$ ) и мультиплетные линии поглощения около 450–500 nm и 580–620 nm, связанные с ( $4f \rightarrow 4f$ ) переходами иона  $\text{Pr}^{3+}$  (рис. 2, *a, b*, кривая 1) и детально описанные в работе [9]. Максимумы УФ полос поглощения 240 и 285 nm имеют величину оптической плотности выше 2.7 (предел шкалы прибора) при толщине образцов 1 mm, поэтому невозможно оценить изменение оптической плотности после облучения и термообработки.

Наблюдаемые в чистом кристалле LuAG полосы ОП 240 и 285 nm сильно перекрываются с полосами 240 и 285 nm, связанными с  $4f \rightarrow 5d$ -переходами иона  $\text{Pr}^{3+}$  в кристалле LuAG:Pr<sup>3+</sup> (рис. 1, *a*, кривая 1 и рис. 2, *a*, кривая 1).

В чистых образцах LuAG после <sup>60</sup>Со гамма-облучения дозой 10<sup>3</sup> Gy в УФ области кроме полосы 240 nm



**Рис. 1.** Спектры поглощения кристаллов LuAG в УФ (*a*) и видимой области (*b*): исходный (1), измеренные через 3 min при 305 K после облучения дозой 10<sup>3</sup> Gy (2); далее через каждые 10 min (3–7), затем через 20 min (8) и 24 h (9).



**Рис. 2.** Спектры поглощения кристаллов LuAG:Pr в УФ (*a*) и видимой области (*b*): исходный (1), измеренные через 3 min после облучения дозой 10<sup>3</sup> Gy (2) и через 24 h (3).

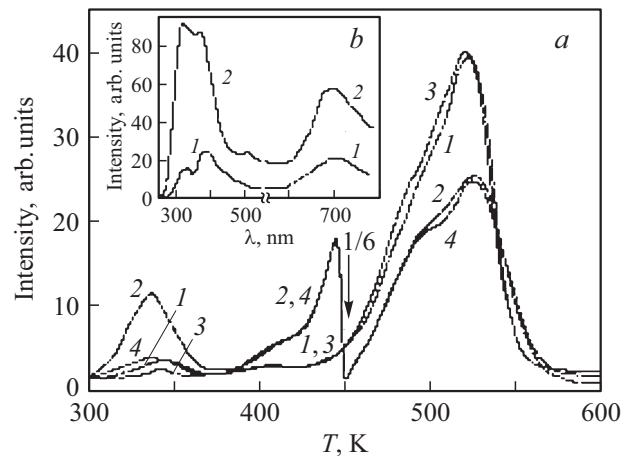
наблюдается увеличение оптической плотности в полосе 285 nm, что свидетельствует о росте концентрации центров окраски (рис. 1, *a*, кривая 2). В видимой области спектра появляются полосы 375, 420, 490 и 595 nm (рис. 1, *b*, кривая 2). При этом в спектре ОП активированного образца LuAG:Pr после гамма-облучения дозой 10<sup>3</sup> Gy интенсивности полос 240 и 285 nm, связанных с ( $4f \rightarrow 5d$ ) переходами активатора  $\text{Pr}^{3+}$ , превышают верхний предел прибора (рис. 2, *a*, кривая 2). В видимой области спектра кроме мультиплетных линий поглощения  $\text{Pr}^{3+}$  около 500 и 600 nm наблюдаются такие же наведенные полосы 375 и 595 nm, как и в чистом образце LuAG (рис. 2, *b*, кривая 2 и рис. 1, *b*, кривая 2). Эти данные свидетельствуют о том, что независимо от присутствия активатора  $\text{Pr}^{3+}$  в обоих образцах существуют дефекты, собственные или

примесные, которые создаются в процессе выращивания кристаллов в инертной среде. После гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy рост полос ОП 285 и 595 nm и появление полос 375, 420 и 490 nm в LuAG (рис. 1, *a, b*, кривая 2) и полос 375 и 595 nm в LuAG:Pr (рис. 2, *b*, кривая 2), по видимому, связаны с зарядкой собственных дефектов и изменением электронного состояния (валентности) примесных дефектов. Схожесть кубической структуры кристаллов YAG и LuAG состоит в том, что оба содержат алюминиевые октаэдры и тетраэдры, а различие заключается в размерах додекаэдрического окружения  $Y^{3+}$  и  $Lu^{3+}$ . Анализ литературных данных по центрам окраски и свечения в кристаллах YAG в [7,8,10,11] свидетельствует о том, что наблюдаемая в чистых кристаллах LuAG слабая полоса ОП 240 nm связана с  $F$ -центром (анионная вакансия, захватившая два электрона), полосы 285, 420, 490 и 595 nm связаны с примесью ионов  $Cr^{4+}$ , замещающих  $Al^{3+}$  в октаэдре с кислородной вакансией, и полоса 375 nm обусловлена  $F^+$ -центром (анионная вакансия, захватившая один электрон).

Далее нами изучалась кинетика временной релаксации спектров поглощения образцов LuAG и LuAG:Pr при 305 K после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy для выявления вкладов примесных и собственных центров окраски.

На рис. 1, *a, b* приведены спектры поглощения в образце LuAG (кривая 2), измеренные при 305 K сразу после облучения дозой  $10^3$  Gy и через разные интервалы времени после облучения (кривые 3–9). С увеличением времени релаксации до 70 min (кривые 2–8) интенсивность УФ полосы 240 nm не изменяется даже через 24 h (кривая 9), а интенсивность полосы 285 nm незначительно уменьшается через 24 h (рис. 1, *a*, кривая 9). В то же время в видимой области спектра наблюдается уменьшение полос ОП 375 и 420 nm на 30%, 490 и 595 nm на 45% (рис. 1, *b*, кривые 3–8, 9). Такая же кинетика релаксации для полос ОП 375 и 595 nm наблюдается и в активированных образцах LuAG:Pr (рис. 2, *b*, кривая 3). При этом интенсивности УФ полос поглощения 240 и 285 nm ( $4f \rightarrow 5d$ ) и структура линий  $Pr^{3+}$  около 450–500 nm и 580–620 nm ( $4f \rightarrow 4f$ ) не меняется (рис. 2, *a, b*, кривая 3). Наблюдаемое уменьшение интенсивности полос ОП 285, 375, 420, 490 и 595 nm в образцах LuAG и 375 и 595 nm в LuAG:Pr с ростом времени выдержки до 24 h после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy, по-видимому, связано с миграцией носителей заряда, освобожденных из термически активированных ловушек, к центрам окраски и последующей рекомбинацией. Для выявления возможной излучательной рекомбинации в образцах LuAG и LuAG:Pr нами были зарегистрированы кривые ТВ в области температур от 300 до 650 K, измеренные через 10 min и 24 h выдержки после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy.

На рис. 3, *a* приведены кривые ТВ, измеренные через 5 min (кривые 1 и 2) и 24 h (кривые 3 и 4) после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy образцов LuAG (кривые 1, 3) и LuAG:Pr (кривые 2, 4). Все кривые ТВ содержат четыре пика: 1 — 340, 2 — 410, 3 — 490–500, 4 — 530 K.

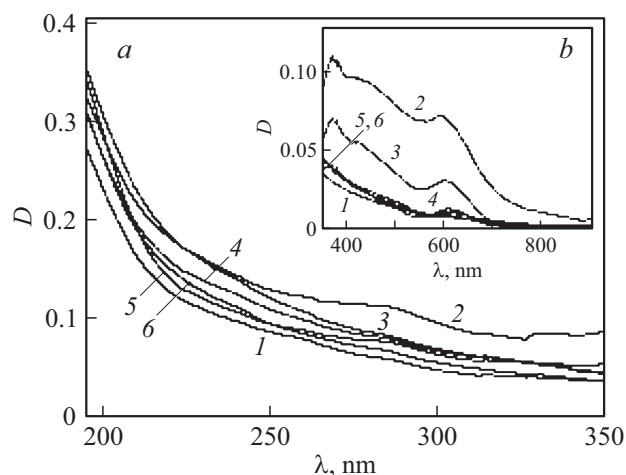


**Рис. 3.** (*a*) Кривые термовысвечивания в кристаллах LuAG (1, 3) и LuAG:Pr (2, 4), измеренные через 5 min (1, 2) и 24 h (3, 4) после облучения дозой  $10^3$  Gy; (*b*) спектр свечения кристаллов LuAG (1) и LuAG:Pr (2) при 530 K.

Интенсивности пиков ТВ 340 и 410 K в чистом LuAG приблизительно в 3 и в 2 раза, а пики 490–500 и 530 K в 4 раза меньше, чем в активированном образце LuAG:Pr (рис. 3, *a*, кривые 1 и 2). Это, возможно, связано с излучательной рекомбинацией на центрах Pr, что можно выяснить из спектров свечения во всех пиках ТВ по отдельности.

На рис. 3, *b* показаны спектры свечения в двух спектральных областях 250–550 и 550–800 nm наиболее интенсивного пика ТВ при 530 K в образцах LuAG (кривая 1) и LuAG:Pr (кривая 2). Наблюдаемая в LuAG полоса свечения 335 nm авторами [12] связывается с  $Lu_{Al}^{3+}$  — антиузельным центром в LuAG:Pr ( $Al^{3+}$  в узле замещен изовалентным  $Lu^{3+}$ ). По нашему представлению, вследствие большего размера иона  $Lu^{3+}$  (0.091 nm) при замене им иона  $Al^{3+}$  (0.051 nm) [13] кислород из соседнего узла решетки смещается, оставляя вакансию кислорода в октаэдре с образованием антиузельного дефектного комплекса  $Lu_{Al}^{3+}-V_O$ , ответственного за люминесценцию в полосе 335 nm. Полоса 395 nm известна как переход в  $F^+$ -центре в LuAG [14]. Наблюдаемая нами дополнительная полоса 720 nm в чистом LuAG приписывается  $Cr^{3+}$ -центрам по аналогии с YAG в [7,8,11] (рис. 3, *b*, кривая 1). В образце LuAG:Pr кроме известного интенсивного свечения 325 и 370 nm, связанного с переходами  $5d \rightarrow 4f$ , и более слабого в области 520 nm, связанного с  $4f \rightarrow 4f$  переходами активатора  $Pr^{3+}$  [9], тоже наблюдается свечение 700 nm, приписываемое  $Cr^{3+}$ -центрам (рис. 3, *b*, кривая 2).

С увеличением времени выдержки до 24 h после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy интенсивность пика ТВ 340 K в обоих образцах заметно уменьшается (рис. 3, *a*, кривые 2 и 4). Выше было показано (рис. 1, *b* и рис. 2, *b*) уменьшение полос ОП 375, 420, 490 и 595 nm в течение 24 h, которое, очевидно, связано с освобождением носителей заряда из мелких уровней захвата (термическая



**Рис. 4.** Спектры поглощения кристаллов LuAG в УФ (*a*) и видимой области (*b*): исходный (1); после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy (2); после отжига при температуре 373 (3), 473 (4), 523 (5), 623 K (6).

активация с 310 K), их миграцией и излучательной рекомбинацией с центрами свечения. Интенсивности высокотемпературных пиков ТВ 410, 490–500 и 530 K за 24 h выдержки практически не меняются (рис. 3, *a*, кривые 2 и 4), т.е. они не участвуют в процессе релаксации центров окраски при 305 K.

В дальнейшем исследовалось термообесцвечивание наведенных гамма-облучением полос поглощения, характеризующих центры захвата носителей заряда (центры окраски). Для этого проводился последовательный отжиг пиков ТВ в течение 20 min до температур, соответствующих минимумам на кривых ТВ, с последующим охлаждением до 300 K.

На рис. 4, *a, b* представлены спектры поглощения, снятые до и после отжига при указанных температурах 373, 473, 523 и 623 K облученных дозой  $10^3$  Gy образцов LuAG (рис. 4, *a, b*, кривые 1–6). Более половины центров окраски в LuAG отожглись при 373 K, а остальные центры — при 473 K, после самых слабых пиков ТВ, т.е. рекомбинация была в основном безызлучательная. Таким образом, в матрице имеются или образуются при облучении мелкие центры безызлучательной рекомбинации, ослабляющие световыход. Скорее всего, это вакансии кислорода, образующиеся в приповерхностном слое при синтезе кристаллов в атмосфере аргона. Чтобы их устранить и повысить световыход, необходимо отжигать кристаллы в атмосфере кислорода при температурах более  $1000^\circ\text{C}$ .

В активированных образцах LuAG:Pr центры окраски при всех 4 пиках термовысвечивания отжигались практически равномерно, но не полностью, так как интенсивности полос ОП 240 и 285 nm, связанных с  $\text{Pr}^{3+}$ -центрами, практически не изменились. И только с отжигом пика при  $T \geq 523$  K в обоих образцах LuAG и LuAG:Pr наведенные полосы ОП 375, 420 и 490 nm ис-

чезают, только полоса 595 nm полностью не отжигается (рис. 4, *b*, кривые 5 и 6). Совпадение температуры пика ТВ при 523 K и отжига наведенных полос ОП 375, 420 и 490 nm указывает на излучательный рекомбинационный процесс в полосах излучения 335, 395 и 720 nm в чистом LuAG (рис. 3, *b*, кривая 1), и в полосах 325, 380 и 700 nm в LuAG:Pr (рис. 3, *b*, кривая 2). По нашему мнению, наблюдение пиков ТВ до 600 K связано с освобождением дырок и излучательной рекомбинацией с электронами, локализованными на кислородных вакансиях и антиузельных дефектах, а также излучательной рекомбинацией электронов с дырками на примесях  $\text{Cr}^{4+}$ , которые отжигаются не полностью при 623 K.

Оптические методы позволяют увидеть примеси с малыми концентрациями  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (поглощение) и  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  (люминесценция), что соответствует содержанию менее  $10^{-5}$  at.%. При технологическом процессе выращивания монокристаллов LuAG и LuAG:Pr невозможна такая очистка сырья  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от переходных металлов, например, от примесей титана или хрома, а  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  от других редкоземельных ионов. При выращивании кристаллов медленным охлаждением от  $1980^\circ\text{C}$  в инертной среде неизбежно образование в приповерхностном слое термодинамических равновесных незаряженных вакансий анионов и антиузельных дефектов. Этим можно объяснить образование при облучении даже в чистом кристалле LuAG *F*-центров с характерной полосой ОП 240 nm (рис. 1, *a, b*, кривая 1), *F*<sup>+</sup>-центров с 375 nm, а также полос 285, 420, 490 и 595 nm, обусловленных примесью  $\text{Cr}^{4+}$ -центра (рис. 1, *b*, кривая 2).

В сцинтилляционных кристаллах одним из критических параметров является длительное послесвечение, которое вызывается имеющимися в кристаллах центрами захвата (ловушками заряда) и приводит, в частности, к нарушению контраста изображения в сцинтилляционном экране из-за эффектов запоминания. В связи с этим полагаем, что наблюдаемый нами низкотемпературный пик ТВ при 340 K в LuAG:Pr (рис. 3, *a*, кривая 2) обуславливает нежелательное послесвечение.

## Заключение

Проведено сравнительное изучение оптических свойств (поглощение и люминесценция) кристаллов чистого LuAG и активированного ионами празеодима LuAG Pr до и после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy.

Происхождение собственных *F*<sup>+</sup>-центров с характерной полосой поглощения 375 nm и примесных  $\text{Cr}^{4+}$ -центров, поглощающих в 285, 420, 490 и 595 nm, в обоих образцах LuAG и LuAG:Pr связано и с технологическим процессом, и с чистотой шихты; их более отчетливое проявление после гамма-облучения связано с зарядкой собственных дефектов и изменением электронного состояния (валентности) примесных дефектов. Таким образом, в матрице имеются или образуются при

облучении мелкие центры безызлучательной рекомбинации — вакансии кислорода, образующиеся в приповерхностном слое и ослабляющие световыход. Чтобы их устранить и повысить световыход, необходимо отжигать кристаллы в атмосфере кислорода при температурах более 1000°C.

Релаксация полос поглощения  $F^+$  и  $Cr^{4+}$ , а также пика термовысвечивания в области 340 К после гамма-облучения дозой  $10^3$  Gy обусловлена освобождением носителей заряда из мелких уровней захвата (термическая активация > 310 К) и излучательной рекомбинацией с центрами свечения. Излучательная рекомбинация дырок с электронными центрами окраски вызывает свечение 335 nm, связанное с  $Lu_{Al}$  — антиузельным центром около вакансии кислорода, а свечение 395 nm — с  $F^+$ -центром. Рекомбинация электронов с примесными  $Cr^{4+}$ -центрами вызывает свечение 700 nm в LuAG, а в LuAG:Pr кроме свечения 325 и 370 nm активатора  $Pr^{3+}$  также наблюдается свечение 700 nm ионов  $Cr^{4+}$ . Полагаем, что присущие процессу выращивания и проявляющиеся после гамма-облучения мелкие дефекты, связанные с широким пиком ТВ при 340 К, возможно, приведут к усилению интенсивности длительного послесвечения, которое является нежелательным для скоростной сцинтилляции кристалла.

Авторы благодарят докторов А.Ф. Ракова и К. Камаду за предоставленные образцы и участие в обсуждении результатов работы.

Работа выполнена в рамках фундаментальных грантов ОТ-Ф2-09 и ОТ-Ф2-26 Агентства науки и технологий Республики Узбекистан.

## Список литературы

- [1] Ogino H., Yoshikawa A., Nikl M., Kamada K., Fukuda T. // J. Cryst. Growth. 2006. V. 292. P. 239.
- [2] Kamada K., Tsutsumi K., Usuki Y., Ogino H., Yanagida T., Yoshikawa A. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. N 3. P. 1488.
- [3] Drozdowski W., Dorenbos P., de Haas J.T.M., Drozdowska R., Owens A., Kamada K., Tsutsumi K., Usuki Y., Yanagida T., Yoshikawa A. // IEEE. Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. N 4. P. 2420.
- [4] Kamada K., Yanagida T., Tsutsumi K., Usuki Y., Sato M., Ogino H., Novoselov A., Yoshikawa A., Kobayashi M., Sugimoto Sh., Saito F. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. V. 56. N 3. P. 570.
- [5] Yoshikawa A., Yanagida T., Kamada K., Yokota Y., Pejchal J., Yamaji A., Usuki Y., Yamamoto S., Miyake M., Kumagai K., Sasaki K., dos Santos T.R., Baba M., Ito M., Takeda M., Ohuchi N., Nikl M. // Opt. Mater. 2010. V. 32. N 10. P. 1294.
- [6] Kamada K., Tsutsumi K., Usuki Y., Yanagida T., Sato M., Ogino H., Novoselov A., Yoshikawa A., Kobayashi M., Sugimoto Sh., Saito F. // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Hawaii, USA. 2007. N 57-8. P. 2488.
- [7] Вахидов Ш.А., Ибрагимова Э.М., Каинов Б., Тавиунский Т.А., Юсунов А.А. Радиационные явления в некоторых лазерных кристаллах. Ташкент: Изд-во ФАН, УзССР. 1977. С. 152.
- [8] Varney Ch.R. Studies of trapping and luminescence phenomena in yttrium aluminum garnets, Washington State University, Department of Physics and Astronomy. 2012, P. 258.
- [9] Yanagida T., Sato M., Kamada K., Fujimoto Y., Yokota Y., Yoshikawa A., Chani V. // Opt. Mater. 2011. V. 33. P. 413.
- [10] Қўлагин Н.А., Дойчилович Я. // ФТТ. 2007. Т. 49. В. 2. С. 234.
- [11] Багдасаров Х.С., Пастернак Л.Б., Севастьянов Б.К. // Квант. электрон. 1977. Т. 4. № 3. С. 1702.
- [12] Zorenko Yu., Voloshinovskii A., Savchyn V., Voznyak T., Nikl M., Nejezhleb K., Mikhailin V., Kolobanov V., Spassky D. // Phys. Stat. Sol. (b). 2007. V. 244. N 6. P. 2180.
- [13] Бугаенко Л.Т., Рябых С.М., Бугаенко А.Л. // Вестник МГУ. Сер. 2. 2008. Т. 49. № 6. С. 363.
- [14] Babin V., Laguta V.V., Maarros A., Makhov A., Nikl M., Zazubovich S. // Phys. Stat. Sol. B. 2011. V. 248. N 1. P. 239.