

УДК 53.083

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ  
ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ  
КРИСТАЛЛОВ  $\text{Lu}_{3.01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$ , ДОПИРОВАННЫХ  
ИОНАМИ  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , И  $\text{Sc}^{3+}$ , ПОД ДЕЙСТВИЕМ  
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

С. Н. Андреев<sup>1</sup>, М. В. Завертяев<sup>1</sup>, Ю. Д. Заварцев<sup>2</sup>, А. И. Загуменный<sup>2</sup>, В. А. Козлов<sup>1</sup>,  
Н. В. Пестовский<sup>1,3</sup>, С. А. Кутовой<sup>2</sup>, А. А. Петров<sup>1,3</sup>, С. Ю. Савинов<sup>1,3</sup>

*Исследованы спектры импульсной катодоллюминесценции (ИКЛ) и оптического пропускания (ОП) кристаллов, выращенных из расплавов  $\text{Lu}_{3.01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$ , допированных ионами  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Sc}^{3+}$  до и после их облучения гамма-излучением радиоактивного источника  $^{60}\text{Co}$ . Доза гамма-излучения, поглощенная образцами, составила 45 Мрад. Максимальный коэффициент наведенного поглощения в диапазоне 525–700 нм, индуцированного гамма-излучением, составил  $0.48 \text{ см}^{-1}$ . Зафиксировано изменение ИКЛ- и ОП-спектров всех образцов после облучения. Установлено, что относительная интенсивность полос  $\text{Cr}^{3+}$  увеличилась после облучения по отношению к интенсивности полос  $\text{Ce}^{3+}$  в 1.6–8 раз, а ОП-спектры всех образцов после облучения потеряли индивидуальные особенности и стали идентичны. Дано качественное объяснение полученным результатам. В соответствии с ним наведенное поглощение определяется, в первую очередь, возникающими после облучения оптически-активными дефектами по Френкелю, включающими кислородную вакансию и междоузельный ион кислорода.*

**Ключевые слова:** LuYAG, радиационная стойкость, сцинтилляционные кристаллы.

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

<sup>2</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (МФТИ), 141707 Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: pestovsky@phystech.edu.

Кристаллы, относящиеся к группе алюминиевых гранатов, имеют химическую формулу  $\text{Re}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (ReAG), где Re обозначает ион редкоземельного элемента (Y, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Sc, Ce или Lu) или комбинацию этих ионов [1]. Алюминиевые гранаты широко используются в качестве активных сред твердотельных лазеров, как сцинтилляционные кристаллы для медицины и ядерной спектроскопии, а также в других приложениях. Сцинтилляционные свойства кристалла  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  исследованы в работе [2]. Для увеличения эффективности поглощения частиц высокой энергии кристаллом YAG, имеющим плотность  $4.56 \text{ г/см}^3$  и эффективный атомный номер 32.6, все или часть ионов Y замещается более тяжелыми редкоземельными ионами. Так, лютециевый гранат  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (LuAG) [3] имеет плотность  $6.7 \text{ г/см}^3$  и эффективный атомный номер  $\sim 60$  [1, 3–5]. В [5] было измерено время высвечивания LuAG:Ce под воздействием гамма-излучения от источника  $^{60}\text{Co}$ . Установлено, что зависимость интенсивности люминесценции от времени представляется в виде суммы трёх экспонент с различными временами затухания:  $44.1 \pm 7.1 \text{ нс}$  (20.2% от полной интенсивности),  $149.6 \pm 2.3 \text{ нс}$  (25.4%) и  $888.5 \pm 20.8 \text{ нс}$  (54.4%). Сцинтилляционные свойства кристаллов LuAG, допированных ионами  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Pr}^{3+}$  и другими, изучались также в работах [3–8]. Так, в [8] установлено, что время высвечивания быстрой компоненты LuAG:Pr составляет  $\sim 20 \text{ нс}$ . Одним из недостатков кристаллической матрицы LuAG является высокая стоимость её компонента – лютеция. Использование кристаллической матрицы  $\text{Lu}_x\text{Y}_{3-x}\text{AG}$  (LuYAG), где  $0 < x < 1$ , позволяет удешевить кристаллическую матрицу с сохранением более высокой плотности и эффективного атомного номера по сравнению с YAG-матрицей [9, 10].

Для измерения параметров высокоэнергетического излучения сцинтилляционный кристалл должен обладать достаточной радиационной стойкостью. В работе [11] исследовалась радиационная деградация оптических свойств кристаллов LuAG:Ce и LuAG:Pr под действием гамма-излучения от радиоактивного источника  $^{60}\text{Co}$ . Максимальный наведённый коэффициент поглощения в кристалле LuAG:Ce составил  $0.08 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне длин волн 500–750 нм при поглощенной образцом дозе  $10^5 \text{ Гр}$  (10 Мрад). Максимальный наведенный коэффициент поглощения, возникший после облучения кристалла LuAG:Pr гамма-излучением при дозе, поглощенной образцом, равной  $2 \cdot 10^4 \text{ Гр}$  (2 Мрад), составил  $2.3 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне длин волн 300–900 нм. Авторы пришли к выводу, что радиационная стойкость у LuAG:Ce по отношению к разрушающему воздействию гамма-излучения существенно выше, чем у LuAG:Pr. В работе [10] исследовалась радиационная деградация оптического пропускания кристаллов YAG:Ce, LuYAG:Ce, LuAG:Ce и  $(\text{Gd},\text{Y})_3(\text{Ga},\text{Al})_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (GYGAG:Ce) под действием

гамма-излучения источника  $^{60}\text{Co}$  дозой 38 кГр (3.8 Мрад). Исследовались два различных образца YAG:Ce. Индуцированный гамма-излучением наведенный коэффициент поглощения первого кристалла YAG:Ce не превосходил  $0.01 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне 520–560 нм, второго кристалла YAG:Ce и кристалла LuYAG:Ce не превосходил  $0.1 \text{ см}^{-1}$ , кристалла LuAG не превосходил  $0.04 \text{ см}^{-1}$  и кристалла GYGAG:Ce не превосходил  $0.01 \text{ см}^{-1}$ .

В работе [12] описаны методика синтеза и результаты исследования люминесцентных свойств прозрачной керамики на основе гранатов  $(\text{Ce}_{0.001}\text{Y}_{0.999})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и  $(\text{Ce}_{0.001}\text{Y}_{0.999})_3(\text{Cr}_x\text{Al}_{1-x})_5\text{O}_{12}$  ( $x = 0.001 - 0.005$ ). Люминесцентные характеристики  $\text{Cr}^{3+}$  на переходе  ${}^2\text{E} - {}^4\text{A}_2$  в кристаллах твердых растворов  $\text{Lu}_{3x}\text{Y}_{3-3x}\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ( $0 < x < 1$ ) изучены в [13, 14]. Выращивание крупных нестехиометрических гранатов Nd:Cr:GSGG диаметром 130 мм и весом 21 кг описано в [15]. Ионы хрома  $\text{Cr}^{3+}$  обеспечивают высокую радиационную стойкость Nd:Cr:GSGG и сохранение эффективной лазерной генерации в инфракрасной области после облучения гамма-излучением дозой вплоть до 100 Мрад.

Для целей калориметрии частиц высокой энергии требуются сцинтилляционные кристаллы большого размера (диаметром  $\sim 100$  мм). Выращивание таких кристаллов из стехиометрических расплавов оказалось затруднительным из-за высокой склонности таких кристаллов к образованию трещин в процессе роста и в период послеростового охлаждения. При этом крупные кристаллы, выращенные из нестехиометрических расплавов  $\text{Lu}_{3.01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$ , не проявили склонности к образованию трещин. Нами были выращены и исследованы кристаллы  $\text{Lu}_{3.01-x}\text{Y}_x\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , Cr с концентрацией ионов  $\text{Ce}^{3+} \approx 0.08$  ат. %,  $\text{Cr}^{3+} \approx 0.005$  ат. %, а также кристалл, дополнительно легированный  $\text{Sc}^{3+}$  в концентрации  $\approx 2$  ат. %. Спецификация исследованных кристаллов приведена в табл. 1. Фигурными скобками ( $\{ \}$ ) в кристаллохимической формуле обозначены элементы в додекаэдрической позиции, квадратными ( $[ ]$ ) – в октаэдрической и без скобок – элементы в тетраэдрической позиции. В идеальной кристаллической решетке граната ионы  $\text{Lu}^{3+}$  и  $\text{Y}^{3+}$  занимают додекаэдрические позиции, ионы  $\text{Sc}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  занимают октаэдрические позиции и ионы  $\text{Al}^{3+}$  занимают тетраэдрические позиции [16, 17]. В [17] установлено, что увеличение концентрации Ce в кристаллах LuAG приводит к увеличению числа ионов Lu в октаэдрической позиции. Высокая концентрация указанных дефектов, а также её пространственная неоднородность, являются, по мнению авторов [17], одной из вероятных причин высокой склонности кристаллов LuAG к растрескиванию в процессе роста и послеростового охлаждения. Концентрация ионов  $\text{Cr}^{3+}$  существенно меньше, чем концентрация ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , поэтому передача возбуждения из-за перекрытия спектра люминесценции  $\text{Ce}^{3+}$  и спектра поглощения

$\text{Cr}^{3+}$  мала, что является условием минимизации прямого процесса передачи энергии от ионов церия к ионам хрома.

Т а б л и ц а 1

## Спецификация исследованных кристаллов

| Номер образца | Соотн. матр. компонент. в исходном расплаве (хим. и кристаллохим. формула)  | Легир. ионы                          | Плотность кристалла, г/см <sup>3</sup> | Максимум фотолюминесценции иона $\text{Ce}^{3+}$ |
|---------------|---|--------------------------------------|--|--|
| 1             | $\text{Lu}_{3.01}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$<br>{Lu <sub>3</sub> } [Al <sub>1.973</sub> ]Al <sub>3</sub> O <sub>11.96</sub>  | $\text{Ce}^{3+}$<br>$\text{Cr}^{3+}$ | 6.70                                   | 509 нм   |
| 2             | $\text{Lu}_{1.96}\text{Y}_{1.05}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$<br>{Lu <sub>1.953</sub> Y <sub>1.047</sub> } [Al <sub>1.973</sub> ]Al <sub>3</sub> O <sub>11.96</sub>                                  | $\text{Ce}^{3+}$<br>$\text{Cr}^{3+}$ | 5.94                                   | 517 нм   |
| 3             | $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$<br>{Lu <sub>1.505</sub> Y <sub>1.495</sub> } [Al <sub>1.973</sub> ] Al <sub>3</sub> O <sub>11.96</sub>                                  | $\text{Ce}^{3+}$<br>$\text{Cr}^{3+}$ | 5.62                                   | 522 нм   |
| 4             | $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Sc}_{0.06}\text{Al}_{4.93}\text{O}_{12}$<br>{Lu <sub>1.505</sub> Y <sub>1.495</sub> }[Sc <sub>0.06</sub> Al <sub>1.913</sub> ]Al <sub>3</sub> O <sub>11.96</sub> | $\text{Ce}^{3+}$<br>$\text{Cr}^{3+}$ | 5.64                                   | 522 нм   |

Под воздействием лазерного излучения на длине волны 450 нм, соответствующей поглощению ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , наблюдалась интенсивная широкополосная фотолюминесценция  $\text{Ce}^{3+}$  во всех кристаллах, с максимумами на длинах волн 509, 517 и 522 нм, соответственно (табл. 1). При этом интенсивность люминесценции максимума ионов  $\text{Cr}^{3+}$  на длине волны 687 нм была в 8–9 раз слабее по сравнению с интенсивностью  $\text{Ce}^{3+}$ .

Радиационная стойкость кристаллов исследовалась под действием гамма-излучения источника  $^{60}\text{Co}$  с максимальной мощностью 4 крад/мин. ОП-спектры кристаллов были записаны до и через 1 день после облучения их гамма-излучением дозой 45 Мрад. Для исследования влияния гамма-облучения на люминесценцию кристаллов был использован метод импульсной катодолюминесценции (ИКЛ) [18–22], основанный на исследовании люминесценции, возникающей при мощном ( $\sim 10$  МВт/см<sup>2</sup>) кратковременном ( $\sim 2$  нс) воздействии на образец электронного пучка со средней энергией электронов 150 кэВ. В [20–22] было показано, что спектры и времена затухания ИКЛ тождественны спектрам и временам затухания люминесценции под действием гамма-излучения – гамма-люминесценции (ГЛ). При этом интенсивность ИКЛ на несколько порядков выше, чем интенсивность ГЛ, что позволяет оценивать интенсивность люминесценции сцинтилляторов, разрабатываемых для измерения параметров гамма-излучения, а также позволяет с высокой чувствительностью определить в образце наличие малых

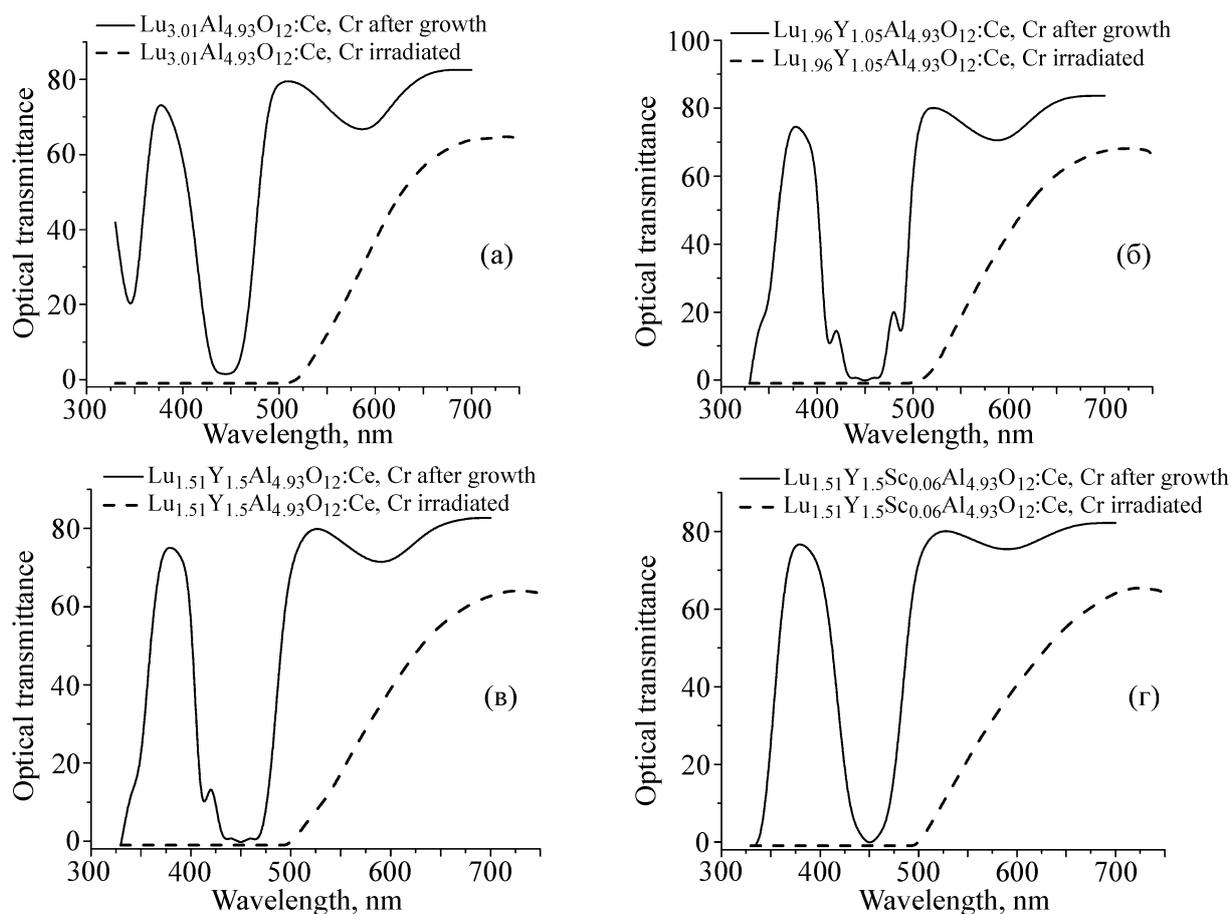


Рис. 1: Спектры оптического пропускания кристаллов  $\text{Lu}_{3.01}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (а),  $\text{Lu}_{1.96}\text{Y}_{1.05}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (б),  $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (в) и  $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Sc}_{0.06}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (г) до (черная кривая) и через 1 день после (штриховая кривая) облучения их гамма-излучением дозой 45 Мрад.

примесей и собственных дефектов. ИКЛ образцов исследовалась на установке, аналогичной [19–22]. Излучение люминесцирующих образцов кварцевым оптоволоконным кабелем направлялось на вход спектрометра OCEAN USB2000 со спектральным разрешением 1.5 нм. Спектральный диапазон прибора – 200–800 нм. Спектры были скорректированы с учетом спектральной чувствительности оптического и приёмного трактов. ПЗС-линейка спектрометра находилась в режиме накопления светового сигнала в течение времени экспозиции, равного 30 с. Частота импульсов ускорителя электронов РАДАН-ЭКСПЕРТ [23] составляла 1 Гц. Полученные ИКЛ-спектры являются суммой интенсивностей всех световых сигналов, испущенных в течение 30 с, и представляют собой результат усреднения 29 импульсов люминесценции. ОП-спектры образцов до

и после облучения гамма-излучением регистрировались спектрофотометром Shimadzu UV-3101PC.

На рис. 1 изображены ОП-спектры всех образцов до (сплошная линия) и через 1 день после (пунктирная линия) облучения его гамма-излучением дозой 45 Мрад. Полоса поглощения в районе 450 нм в ОП-спектре всех кристаллов до облучения гамма-квантами соответствует поглощению ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , а в районе 580 нм – поглощению ионов  $\text{Cr}^{3+}$ .

Из рис. 1 видно, что после воздействия гамма-излучения при поглощенной дозе 45 Мрад образцы стали непрозрачными в диапазоне от 300–500 нм, а в диапазоне от 500–700 нм спектры потеряли индивидуальную для каждого образца структуру и стали одинаковы для всех образцов.

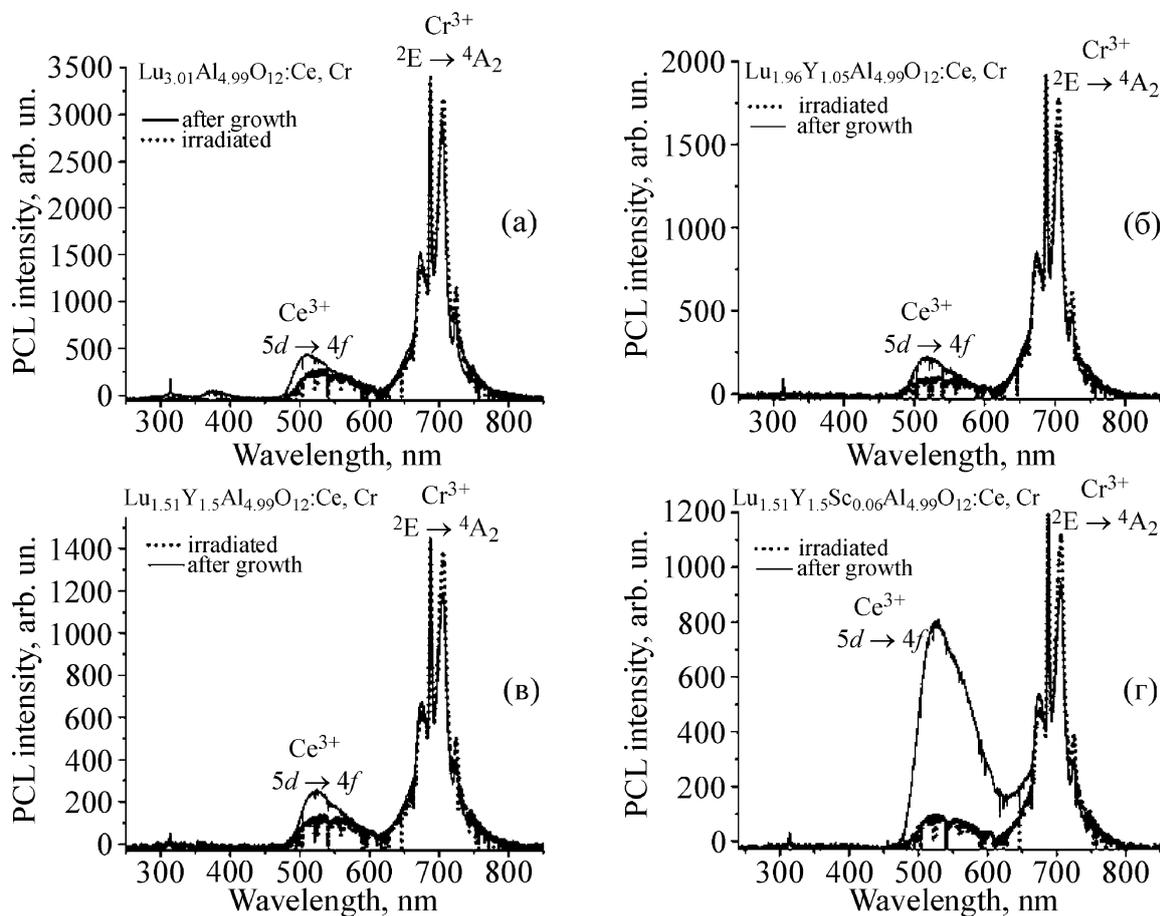


Рис. 2: ИКЛ-спектры кристаллов  $\text{Lu}_{3.01}\text{Al}_{4.93}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (а),  $\text{Lu}_{1.96}\text{Y}_{1.05}\text{Al}_{4.93}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (б),  $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Al}_{4.93}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (в) и  $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Sc}_{0.06}\text{Al}_{4.93}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (г), не подвергавшиеся облучению (черная кривая), а также ИКЛ-спектры тех же кристаллов, снятые на 1090 день после облучения гамма-излучением с дозой 45 Мрад (пунктир).

На рис. 2 изображены ИКЛ-спектры кристаллов до облучения гамма-излучением с дозой 45 Мрад (сплошная линия), а также на 1090 день после облучения (пунктирная линия). Все ИКЛ-спектры до и после облучения нормированы таким образом, чтобы оказались равны максимальные интенсивности в каждом из спектров. На всех спектрах полоса в районе 480–610 нм обусловлена переходом  $5d \rightarrow 4f$  иона  $\text{Ce}^{3+}$  [10], а в районе 610–800 нм переходом  ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$  иона  $\text{Cr}^{3+}$  [24–26]. Изменение ИКЛ-спектра в результате воздействия гамма-излучения проявляется в уменьшении интенсивности полосы  $\text{Ce}^{3+}$  по отношению к интенсивности полосы, соответствующей ионам  $\text{Cr}^{3+}$ . Для кристалла  $\text{Lu}_{3.01}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  (рис. 2(а)) относительная интенсивность полосы  $\text{Cr}^{3+}$  возрастает в 1.6 раза, для кристалла  $\text{Lu}_{1.96}\text{Y}_{1.05}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  – в 2.2 раза (рис. 2(б)), для кристалла  $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  – в 1.9 раза (рис. 2(в)) и для кристалла  $\text{Lu}_{1.51}\text{Y}_{1.5}\text{Sc}_{0.06}\text{Al}_{4.93}\text{O}_{12}:\text{Ce}, \text{Cr}$  – в 8 раз (рис. 2(г)). Узкий пик в районе 317 нм на всех ИКЛ-спектрах мы относим к излучению ионов  $\text{Gd}^{3+}$ , содержащихся в исходном реактиве  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  (чистота реактива – 99.99%) в качестве паразитной примеси.

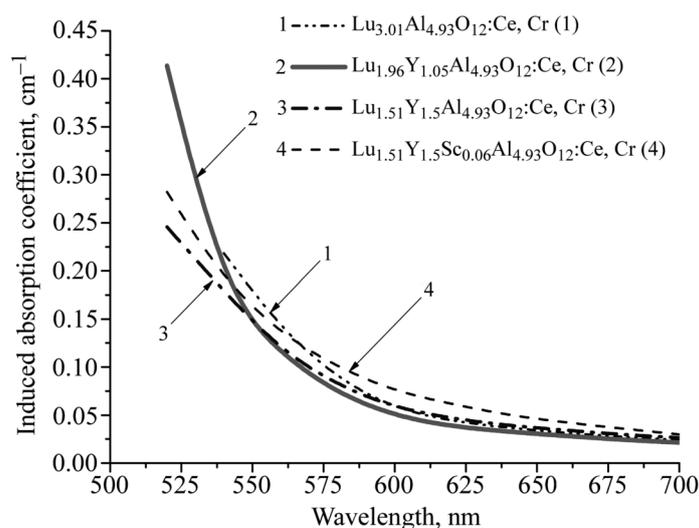


Рис. 3: Спектры наведенного поглощения, индуцированного гамма-излучением при поглощенной дозе 45 Мрад.

На рис. 3 изображены спектры наведенного поглощения, индуцированного в исследуемых кристаллах под действием гамма-излучения при поглощенной дозе в 45 Мрад. Зависимость коэффициента наведенного поглощения от частоты представляет собой монотонную спадающую кривую. Видно, что для исследуемых образцов наибольший показатель наведенного поглощения  $\sim 0.43 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне 525–700 нм наблюдается

у  $\text{Lu}_{1.96}\text{Y}_{1.05}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}:\text{Ce}$ ,  $\text{Cr}$  (рис 3(2)). Другие исследованные кристаллы имеют приблизительно одинаковый коэффициент наведенного в результате гамма-облучения поглощения, максимальное значение которого составляет  $0.25\text{--}0.35\text{ см}^{-1}$  в диапазоне  $525\text{--}700\text{ нм}$ .

Известно, что высокая концентрация ионов  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Cr}^{3+}$  в кристаллах и стёклах может повышать их радиационную стойкость. Из рис. 1–3 видно, что оптические свойства исследованных образцов подвержены значительной радиационной деградации после их гамма-облучения дозой 45 Мрад, несмотря на высокую концентрацию  $\text{Ce}^{3+}$  и примесь  $\text{Cr}^{3+}$ . При этом было установлено, что крупные (диаметром  $\sim 100\text{ мм}$ ) нестехиометрические кристаллы  $\text{LuYAG}$  имеют меньшую склонность к растрескиванию в процессе роста и послеростового охлаждения, чем кристаллы, выращенные из стехиометрических расплавов. Указанные явления мы объясняем с единой позиции, основанной на учете исходного наличия в исследованных кристаллах значительного количества анионных и катионных вакансий. Так, химическая формула  $\text{Lu}_{3.01}\text{Al}_{4.99}\text{O}_{12}$  после умножения на коэффициент  $k = 3/3.01$  преобразуется в эквивалентную –  $\text{Lu}_3\text{Al}_{4.973}\text{O}_{11.960}$ . Можно заключить, сколько позиций в кристаллической структуре (0.027 формульных единиц) не занято ионами  $\text{Al}^{3+}$  и (0.04 формульных единицы) не занято ионами  $\text{O}^{2-}$ . По нашему мнению, наличие в образце большой концентрации вакансий облегчает перемещение, в частности, термодиффузию ионов в объеме образцов в процессе роста и при остывании расплава, снимая термические напряжения. Так становится возможным выращивать крупные (диаметром  $\sim 100\text{ мм}$ ) кристаллы. Однако наличие катионных и анионных вакансий в образцах при этом ухудшает их радиационную стойкость по сравнению со стехиометрическими кристаллами. Основным процессом, происходящим при облучении твёрдых тел высокоэнергетическим излучением, является образование дефектов по Френкелю (пар вакансия – междуузельный атом) [27, 28]. Данный процесс затруднён в стехиометрических кристаллах, однако в кристаллах, изначально содержащих большую концентрацию вакансий, он происходит значительно чаще. Как показал наш эксперимент, вне зависимости от типа катионных добавок после облучения все кристаллы обладают одинаковыми ОП-спектрами. Это, по нашему мнению, свидетельство того, что во всех образцах образовались одинаковые оптически-активные дефекты. Так как на их оптические свойства не влияет концентрация ионов  $\text{Y}^{3+}$  и  $\text{Sc}^{3+}$ , замещающих ионы  $\text{Lu}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ , мы делаем вывод, что наведенное поглощение определяется, в первую очередь, возникающими после облучения оптически-активными дефектами по Френкелю, включающими кислородную вакансию и междуузельный ион кислорода.

Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (проект № 14–12–00784).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Nikl, A. Yoshikawa, K. Kamada, et al., *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* **59**, 47 (2013).
- [2] M. Moszynski, T. Ludziejewski, D. Wolski, et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **345**, 461 (1994).
- [3] A. Lempicki, M. H. Randles, D. Wisniewski, et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science* **42**(4), 280 (1995).
- [4] W. Chewpraditkul, L. Swiderski, M. Moszynski, et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science* **56**(6), 3800 (2009).
- [5] E. G. Devitsin, V. A. Kozlov, S. Yu. Potashov, et al., *SCINT'95, Book of Abstracts*, p. 127, Ed.: C.V.E. van Eijk (Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1995).
- [6] J. Xu, L. Fan, Y. Shi, et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science* **61**(1), 373 (2014).
- [7] H. Li, X. Liu and L. Huang, *Optical Materials* **29**, 1138 (2007).
- [8] J. Pejchal, M. Nikl, E. Mihokova, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **42**, 055117 (2009).
- [9] J. A. Mares, M. Nikl, A. Beitlerova, et al., *IEEE Transactions on Nuclear Science* **59**(5), 2120 (2012).
- [10] G. Dissertori et al., *2012 IEEE Nuclear Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC)*, Anaheim, CA, 2012 (IEEE, New York, 2012), p. 305.
- [11] M. V. Derdzian, K. L. Ovanesyan, A. G. Petrosyan, et al., *Journal of Crystal Growth* **361**, 212 (2012).
- [12] X. Yi, C. Chen, H. Lin, et al., *Ceramics International* **40**, 7043 (2014).
- [13] А. И. Загуменный, В. И. Власов, Ю. Д. Заварцев и др., *Физика твёрдого тела* **38**(9), 2837 (1996).
- [14] S. P. Feofilov, A. B. Kulinkin, K. L. Ovanesyan, et al., *Solid State Communications* **226**, 39 (1996).
- [15] S. E. Stokowski, M. H. Randles, R. C. Morris, et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics* **24**(6), 934 (1988).

- [16] K. L. Ovanesyan, A. G. Petrosyan, G. O. Shirinyan, et al., *Izv. Akad. Nauk. SSSR, ser, Neorg. Mater.* **17**, 459 (1981).
- [17] A. G. Petrosyan, K. L. Ovanesyan, R. V. Sargsyan, et al., *Journal of Crystal Growth* **312**, 3136 (2010).
- [18] В. И. Соломонов, С. Г. Михайлов, *Импульсная катодоллюминесценция и её применение для анализа конденсированных веществ* (Екатеринбург, Типография УРО РАН, 2003).
- [19] V. I. Solomonov, S. G. Michailov, A. I. Lipchak, et al., *Laser Physics* **16**(1), 126 (2006).
- [20] М. В. Завертяев, А. И. Загуменный, В. А. Козлов и др., *Письма в ЖТФ* **40**(10), 73 (2014).
- [21] А. И. Загуменный, А. Н. Лобанов, А. В. Михайлов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42**(1), 15 (2015).
- [22] V. A. Kozlov, V. N. Ochkin, N. V. Pestovskii, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **653**, 012017, 1 (2015).
- [23] В. Н. Афанасьев, В. Б. Бычков, В. Д. Ларцев и др., *Приборы и техника эксперимента* **5**, 88 (2005).
- [24] C. Collins et al., *ORNL/TM-2015 627*, 1 (2015).
- [25] W. Nie, Y. Kaliski, C. Pedrini, et al, *Optical and Quantum Electronics* **22**, S123 (1990).
- [26] W. Nie, G. Boulon, and A. Monteil, *J. Phys. France* **50**, 3309 (1989).
- [27] В. М. Агранович, В. В. Кирсанов, *Успехи физических наук* **118** (1), 3 (1976).
- [28] E. A. Kotomin and A. I. Popov, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **141**, 1 (1998).

Поступила в редакцию 13 мая 2016 г.