

УДК 535.3;538.958;620.178

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ ГАЛЛИЯ АЛЮМИНИЕМ НА СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ ГАДОЛИНИЙ- АЛЮМИНИЙ-ГАЛЛИЕВОГО ГРАНАТА

© 2022 г. В. М. Касимова<sup>1</sup>, \*, Н. С. Козлова<sup>1</sup>, О. А. Бузанов<sup>2</sup>,  
Е. В. Забелина<sup>1</sup>, А. В. Таргонский<sup>3,4</sup>, А. В. Рогачев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,  
Ленинский пр., 4, стр. 1, Москва, 119049 Россия

<sup>2</sup>АО “Фомос-Материалы”, ул. Буженинова, 16, Москва, 107023 Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,  
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

<sup>4</sup>Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова, ФНИЦ “Кристаллография и фотоника”  
Российской академии наук, Ленинский пр., 59, Москва, 119333 Россия

\*e-mail: kasimova.vt@misis.ru

Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

После доработки 08.12.2021 г.

Принята к публикации 20.12.2021 г.

Исследованы оптические свойства и микротвердость кристаллов гадолиний-алюминий-галлиевых гранатов с частичным замещением галлия на алюминий:  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  ( $\text{Al} : \text{Ga} = 2 : 3$ ) и  $\text{Gd}_3\text{Al}_3\text{Ga}_2\text{O}_{12}$  ( $\text{Al} : \text{Ga} = 3 : 2$ ), а также кристаллов  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$  ( $\text{Al} : \text{Ga} = 2 : 3$ ), легированных церием. Установлено влияние соотношения  $\text{Al} : \text{Ga}$  и легирования церием на показатель ослабления света и оптическую ширину запрещенной зоны. На основе данных XANES-спектроскопии оценена степень окисления церия в кристалле  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ .

**Ключевые слова:** сцинтилятор, степень окисления церия, синхротронное излучение, показатель ослабления, оптическая ширина запрещенной зоны, микротвердость по Виккерсу

DOI: 10.31857/S0002337X2203006X

### ВВЕДЕНИЕ

Поиск новых сцинтиляционных материалов является одним из развивающихся направлений в материаловедении, поскольку в разных областях медицины, радиационного контроля, физике высоких энергий постоянно растет потребность в рабочих элементах с высоким значением световыхода и быстрым временем спада сцинтиляции [1, 2]. Ионом-активатором в материалах для таких применений является, в первую очередь, церий [3, 4].

В 2011 г. [5] был получен монокристалл кубической сингонии (точечная группа симметрии  $m\bar{3}m$ , пр. гр.  $Ia3d$ )  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (GAGG:Ce) с сцинтиляционными и физическими свойствами [6], необходимыми для применения в качестве элементов детекторов, чувствительных к высокоэнергетическому излучению: высоким световыходом, высокой плотностью, быстрым временем спада сцинтиляции и др. [6–8].

Как показано в работах [2, 9], быстродействие сцинтилятора зависит от степени окисления Ce:

$3+$  или  $4+$ . Дело в том, что у ионов церия с разной степенью окисления различные механизмы сцинтиляции и процесс сцинтиляции происходит с разной скоростью. Это связано с расположением энергетических уровней церия ( $4f$  и  $5d^1$ ) в запрещенной зоне. Эти энергетические уровни у  $\text{Ce}^{4+}$  расположены ближе ко дну зоны проводимости, чем у  $\text{Ce}^{3+}$  [9], поэтому захватить электрон из зоны проводимости легче в случае  $\text{Ce}^{4+}$ . В работах [2, 10] считается, что в GAGG:Ce церий находится в трехвалентном состоянии, но ионы  $\text{Ce}^{3+}$  могут с некоторой вероятностью перезарядиться в  $\text{Ce}^{4+}$ . Так, в работе [9] при исследовании GAGG:Ce,  $\text{Ca}^{2+}$  было обнаружено наличие  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Ce}^{4+}$ .

В элементарной ячейке граната содержится 160 атомов, катионы распределены по 3 типам позиций. Для структуры гранатов характерны антиструктурные дефекты, способствующие замещению катионов данной позиции на другие катионы, близкие по ионному радиусу, также возможно изменение их заряда [11, 12]. Подобные дефекты в значительной степени влияют на сцинтиляцион-

ные свойства кристалла [10, 12–16]. Уменьшить количество дефектов в кристаллических гранатах, согласно [10], можно путем частичного замещения одного элемента на другой в катионной подрешетке в разных соотношениях, а также легированием [6, 16]. Природа дефектной структуры и механизм дефектообразования в GAGG:Ce практически не изучены. Для понимания этих процессов необходимо исследовать исходную, нелегированную, кристаллическую матрицу.

Целью данной работы были оценка степени окисления церия в кристалле и определение влияния частичного катионного замещения галлия алюминием на физические свойства кристаллов GAGG.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кристаллы GAGG были выращены в компании АО “ФОМОС-МАТЕРИАЛЫ” в иридиевых тиглях методом Чохральского в атмосфере аргона с 1–2% кислорода из исходной шихты следующих составов:  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$  ( $\text{Al} : \text{Ga} = 2 : 3$ ),  $\text{Gd}_3\text{Al}_3\text{Ga}_2\text{O}_{12}$  ( $\text{Al} : \text{Ga} = 3 : 2$ ) и  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}\text{:Ce}$  ( $\text{Al} : \text{Ga} = 2 : 3$ , GAGG:Ce). Образцы имели форму пластин, перпендикулярных оси роста [100], полированных с двух сторон.

Оценка степени окисления ионов церия проводилась на основе анализа околопороговой тонкой структуры рентгеновского спектра поглощения (X-ray absorption near edge structure – XANES). Методика позволяет получать информацию о локальной электронной структуре вещества: распределении электронной плотности на атомах, степени окисления поглащающего атома. Измерения XANES-спектров вблизи  $L_3$ -края поглощения церия от кристаллов GAGG:Ce проводились на станции “Ленгмюр” Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований. В экспериментах использовалось синхротронное излучение из поворотных магнитов, монохроматизированное двукратным монохроматором прорезного типа Si(111). Энергетическое разрешение составляло порядка 3 эВ. Низкая объемная концентрация церия в кристаллах не позволила провести регистрацию спектров поглощения в режиме “на пропуск”. Измерения проводились во флуоресцентной моде, дающей большую чувствительность за счет высокой селективности наблюдаемого сигнала. Флуоресцентное излучение регистрировалось дрейфовым детектором VORTEX EX-90 (под прямым углом к поверхности образца).

Физические свойства изучали в аккредитованной испытательной лаборатории “Монокристаллы и заготовки на их основе” (ИЛМЗ) НИТУ “МИСиС”. На спектрофотометре Cary-5000 Agilent Technologies с автоматической универсальной измерительной приставкой UMA проведены

измерения спектральных зависимостей коэффициента пропускания  $T$  (отн. ед.) при нормальном падении света естественной поляризации. Экспериментальные результаты использовались для расчета показателей поглощения  $\alpha$  ( $\text{см}^{-1}$ ), ослабления  $\mu$  ( $\text{см}^{-1}$ ), оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$  (эВ). Микротвердость  $H_V$  измеряли методом Виккерса на автоматическом микротвердомере DM 8 В Affri.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Степень окисления церия.** На эталонных образцах ( $\text{CeCl}_3$  и  $\text{CeO}_2$ ) со степенями окисления церия 3+ и 4+ получены спектральные зависимости поглощения света (рис. 1). На спектрах поглощения  $\text{CeCl}_3$  наблюдается один пик в районе 5730 эВ, который характерен для  $\text{Ce}^{3+}$ . В то время как для  $\text{CeO}_2$  наблюдаются два пика – при 5735 и 5740 эВ, которые характерны для  $\text{Ce}^{4+}$ .

Экспериментально полученные XANES-спектры вблизи  $L_3$ -края поглощения церия от исследованных кристаллов GAGG:Ce обладают формой и соотношением интенсивностей, свойственными  $\text{Ce}^{3+}$ . На полученных спектральных зависимостях поглощения света для кристалла  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}\text{:Ce}$  наблюдается пик при 5730 эВ, характерный для церия в степени окисления 3+. Особенности спектра, характерные для  $\text{Ce}^{4+}$ , не наблюдаются, что свидетельствует либо о его малой концентрации в кристалле, либо о полном отсутствии (рис. 1).

Таким образом, установлено, что степень окисления церия 3+, а исследованные кристаллы можно записать в виде GAGG:Ce<sup>3+</sup>.

**Оптические свойства кристаллов.** Показатель ослабления света  $\mu$  определялся по формуле (1) в соответствии с ГОСТ 3520-92 [17]:

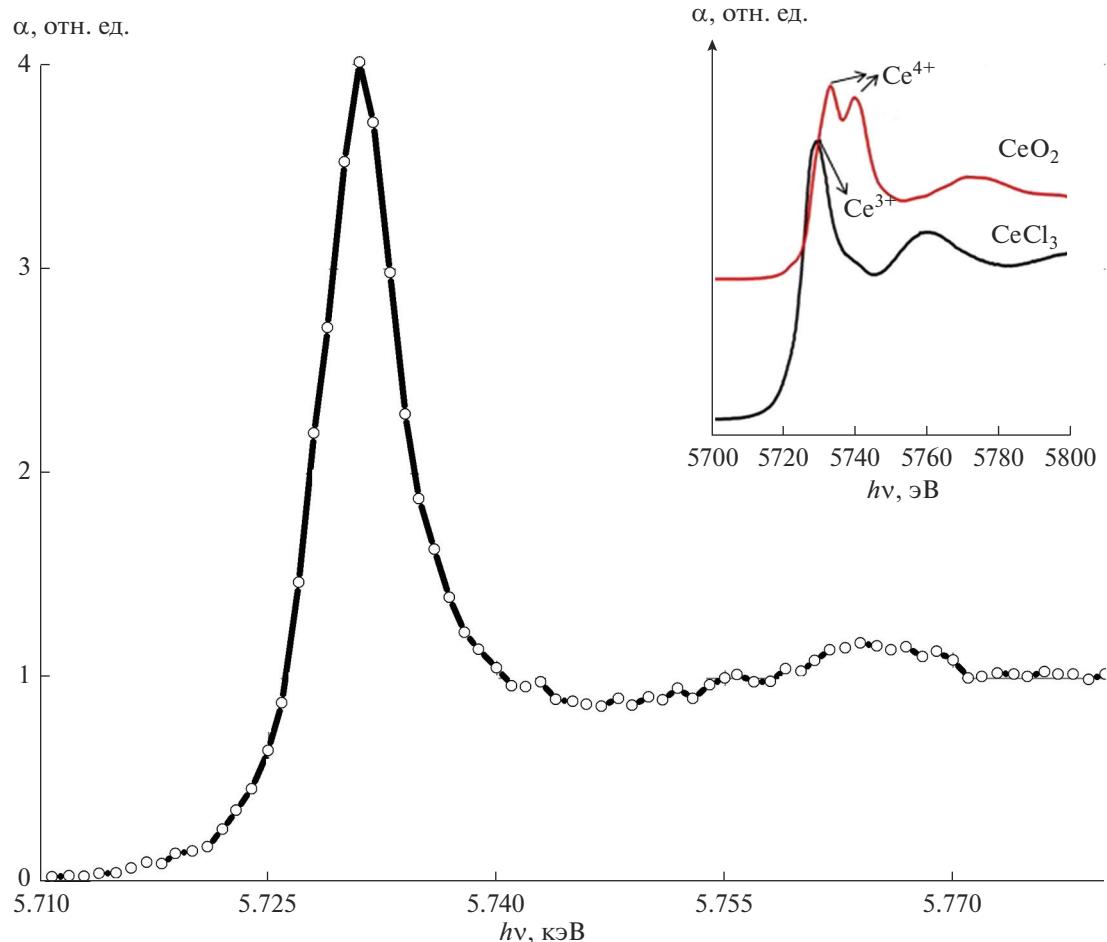
$$\mu = -\frac{\ln \tau}{d} = -\frac{1}{d} \ln \left( \sqrt{\left[ \frac{1}{T(n-1)} \frac{8n^2}{(n-1)^4} \right]^2 + \left[ \frac{n+1}{n-1} \right]^4} - \frac{1}{T(n-1)} \frac{8n^2}{(n-1)^4} \right), \quad (1)$$

где  $\tau$  – внутреннее пропускание с учетом отражения (отн. ед.);  $d$  – толщина образца (см);  $T$  – пропускание, которое измеряется на приборе (отн. ед.);  $n$  – коэффициенты преломления.

Коэффициенты преломления получены спектрофотометрическим методом Брюстера (Brewster) [18, 19] и определялись по формуле

$$n = \operatorname{tg} \theta_{\text{Бр}}, \quad (2)$$

где  $\theta_{\text{Бр}}$  – угол Брюстера, характерный для определенной длины волны.



**Рис. 1.** XANES-спектр вблизи  $L_3$ -края поглощения церия в кристаллах GAGG:Ce<sup>3+</sup> и спектры эталонных образцов CeCl<sub>3</sub> и CeO<sub>2</sub>.

Построенные спектральные зависимости показателей ослабления света кристаллов (рис. 2) представляют собой немонотонные зависимости с ярко выраженным полосами поглощения. Показатели ослабления кристаллов Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> и Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub> практически идентичны, максимальное расхождение не превышает 5%.

Для всех исследуемых кристаллов наблюдалась полосы поглощения с максимумами  $\lambda_{\max} \sim 275$  нм и области полос в диапазоне  $\lambda \sim$  от 300 до 320 нм, которые являются типичными для гадолинийсодержащих кристаллов [13, 20].

Легирование церием приводит к увеличению поглощения во всем диапазоне, на спектральных зависимостях показателей ослабления появляются ярковыраженные широкие полосы при  $\lambda_{\max} \sim 340$  и  $\sim 440$  нм.

Оценка оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$  кристаллов проводилась по методу Таука (Tauc). Для этого строятся зависимости

$$(\alpha h\nu)^r = f(h\nu), \quad (3)$$

где  $v$  – частота света ( $\text{см}^{-1}$ );  $h$  – постоянная Планка (эВ с);  $r$  – степенной коэффициент (равный 2 в случае прямозонных материалов, 1/2 в случае не-прямозонных материалов [21]);  $\alpha$  – показатель поглощения ( $\text{см}^{-1}$ ).

Далее линейная часть построенной зависимости экстраполируется к оси абсцисс [21–23]. Точка пересечения полученной прямой с осью абсцисс соответствует оптической ширине запрещенной зоны.

Коэффициент  $r$  принят равным 2 на основании того, что родственные исследуемому кристаллу гранаты являются прямозонными [24].

Полученные результаты представлены на рис. 3. Наблюдается увеличение оптической ширины запрещенной зоны в кристаллах при изменении соотношения алюминия и галлия от 2 : 3 к 3 : 2 (табл. 1).

**Микротвердость.** В процессе роста наблюдается растрескивание кристаллов Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (Al : Ga = 3 : 2). В связи с этим проведено иссле-

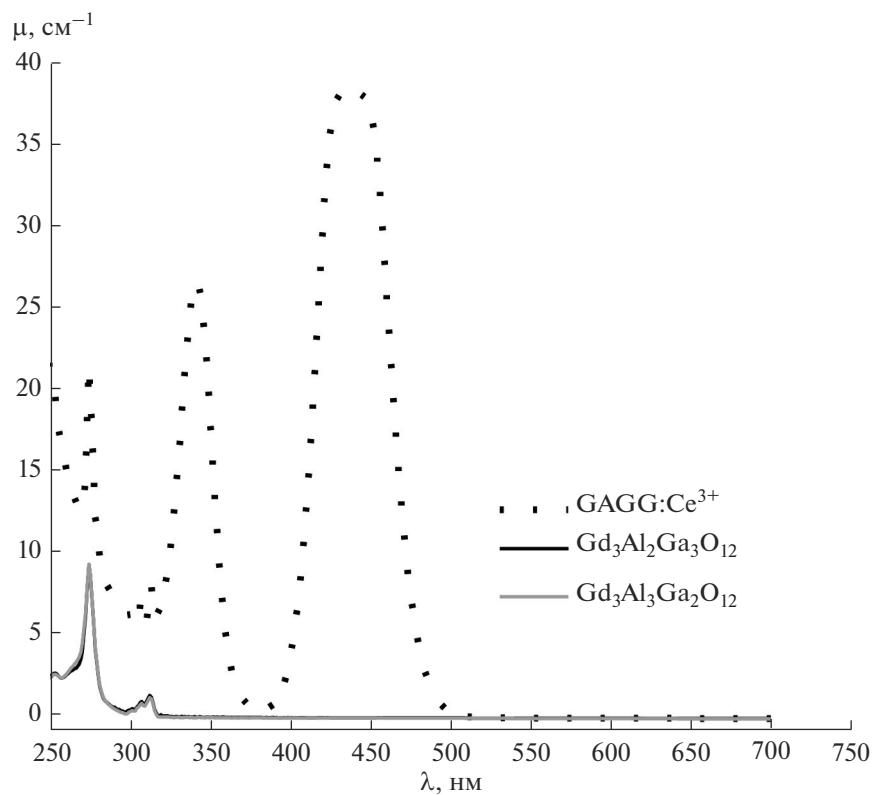


Рис. 2. Спектральные зависимости показателей ослабления света кристаллов GAGG:Ce<sup>3+</sup>, Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> и Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub>.

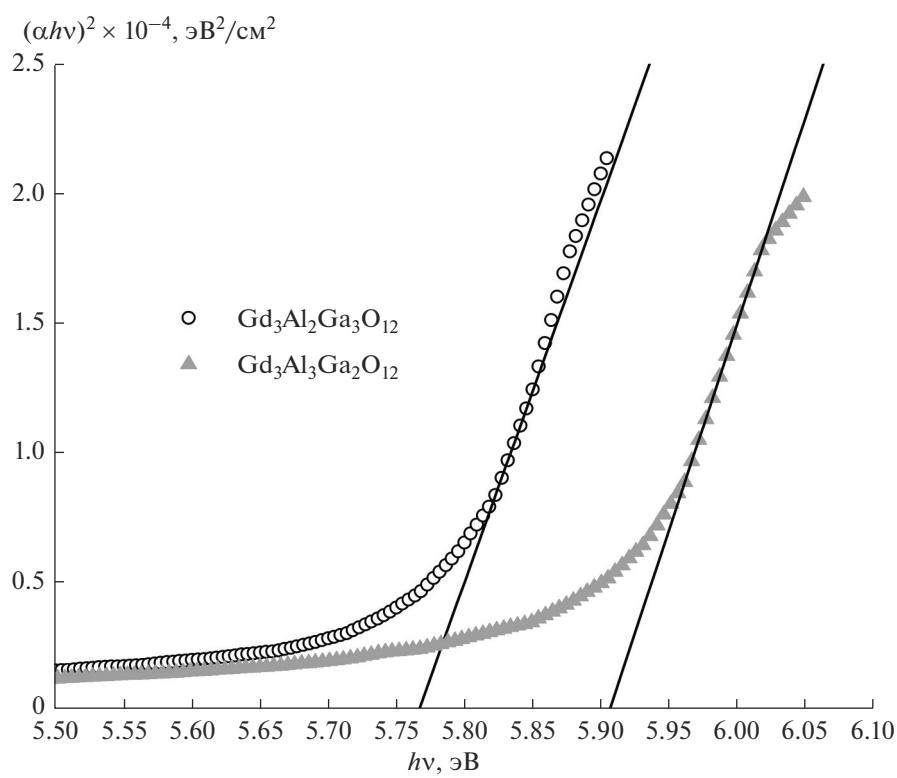


Рис. 3. Определение оптической ширины запрещенной зоны Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> и Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub> методом Таука.

**Таблица 1.** Оптические и механические свойства кристаллов GAGG:Ce<sup>3+</sup>, Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> и Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub>

Кристалл	GAGG:Ce <sup>3+</sup>	Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> Ga <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	Gd <sub>3</sub> Al <sub>3</sub> Ga <sub>2</sub> O <sub>12</sub>
$E_g \pm 0.05$ , эВ (3)	5.88 [25]	5.77	5.91
$n \pm 0.001$ (2)	$\lambda = 340$ нм	1.986	1.956
	$\lambda = 440$ нм	1.910	1.919
	$\lambda = 589$ нм	1.889	1.896
	$\lambda = 633$ нм	1.889	1.892
$H_V \pm 5\%$ , ГПа (4)	12.7	12.6	15.1
$H_M$ (5)	7.4	7.3	7.8
$I$ (6)	0.74	0.75	0.70

Примечание. В круглых скобках указаны номера уравнений в тексте.

дование микротвердости кристаллов, представленных в данной работе, методом Виккерса  $H_V$  [26] с пересчетом на твердость по Моосу (Mohs)  $H_M$  по формуле Мотта (Mott) [27]:

$$H_V = 1854 \frac{P}{l^2}, \quad (4)$$

$$H_M = 0.675 \sqrt[3]{H_V}, \quad (5)$$

где  $P$  – нагрузка, используемая при измерении (Н);  $l$  – среднеарифметическое значение длин диагоналей полученного отпечатка (мкм).

При измерениях микротвердости в первую очередь проводят построение кривой нагружения  $H_V(P)$ . За величину микротвердости принимают значения, получаемые на горизонтальном участке кривой  $H_V(P)$ . Различимые, но недостаточно четкие отпечатки проявлялись при нагрузке 0.09807 Н (рис. 4). Для этой нагрузки отпечаток не содержит видимых трещин и сколов. Однако уже при 0.2452 Н для всех кристаллов наблюдается образование трещин в области отпечатка. При 0.4903 Н наблюдается скол с одной стороны отпе-

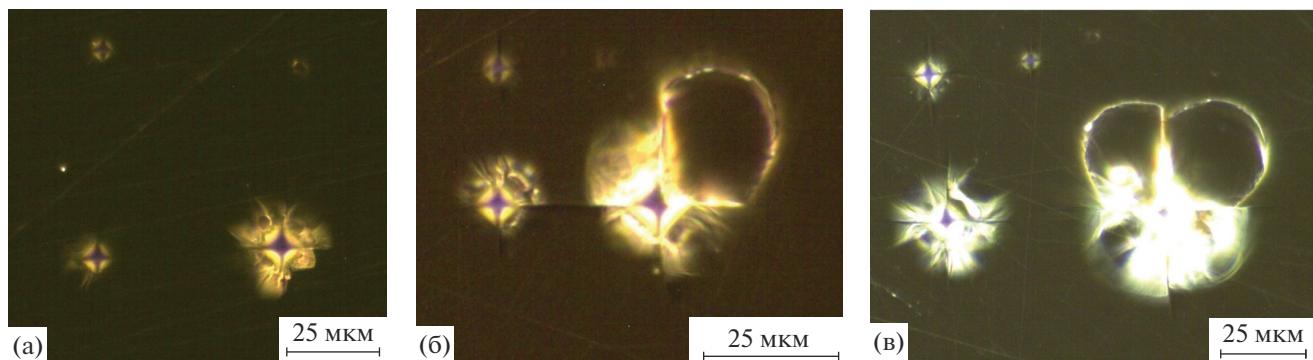
чатка или три трещины в разных углах. По форме отпечатков оценивалась хрупкость материала  $Z$  [26]. Установлено, что балл хрупкости отпечатка при 0.2452 Н соответствует  $Z = 2$ , а при 0.4903 Н  $Z = 3$ . В связи с этим микротвердость  $H_V$  рассчитывалась при нагрузке 0.2452 Н. Результаты представлены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показал, что легирование церием не влияет на величину микротвердости  $H_V$ , а увеличение содержания алюминия в кристалле приводит к увеличению  $H_V$ .

Полученные по формуле (5) величины  $H_M$  позволяют оценить степень ионности связи  $I$  по формуле Пилляя (Pillay) [27]

$$H_M = -15.79I^2 + 11.33I + 7.63. \quad (6)$$

Чем ближе полученное значение  $I$  к 1, тем более ионный характер связи наблюдается у материала. Полученные с использованием уравнения (6) значения  $I$  (табл. 1) свидетельствуют о преоблада-



**Рис. 4.** Отпечатки на поверхности кристаллов GAGG:Ce<sup>3+</sup>(а), Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> (б) и Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub> (в) при нагрузках  $P$ , равных 0.09807, 0.2452, 0.4903, 0.9807, 1.961 Н.

нии ионного характера межатомных связей у исследуемых кристаллов.

В табл. 1 содержатся данные о величине оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$ , коэффициентах преломления  $n$  [18], микротвердости по методу Виккерса  $H_V$  для нагрузки 0.2452 Н, твердости по Моосу  $H_M$  и степени ионности связи  $I$  исследуемых кристаллов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные XANES-спектроскопии вблизи  $L_3$ -края поглощения церия и оценена степень окисления церия в кристалле, равная 3+.

Изменение соотношения Al : Ga с 2 : 3 до 3 : 2 не оказывает существенного влияния на величины показателей ослабления света. В кристаллах с соотношением Al : Ga = 3 : 2 наблюдается увеличение ширины запрещенной зоны и микротвердости по Виккерсу.

Легирование кристаллов церием (GAGG:Ce<sup>3+</sup>) приводит к увеличению ширины запрещенной зоны. Спектральные зависимости показателей ослабления света в таких кристаллах отличаются от нелегированных кристаллов: наблюдается увеличение поглощения в диапазоне от 250 до 500 нм; появляются широкие ярковыраженные полосы при  $\lambda_{\max} \sim 340$  и  $\sim 440$  нм. Легирование Ce<sup>3+</sup> не оказывает заметного влияния на величину микротвердости.

Оценка степени ионности связей свидетельствует о преобладании ионного характера межатомных связей в исследуемых кристаллах.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90211 и в рамках госзадания FSME-2020-0031 (0718-2020-0031).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nikl M., Kamada K., Kurosawa S., Yokota Y., Yoshikawa A., Pejchal J., Babin V. Luminescence and Scintillation Mechanism in Ce<sup>3+</sup> and Pr<sup>3+</sup> Doped (Lu,Y,Gd)<sub>3</sub>(Ga,Al)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Single Crystal Scintillators // Phys. Status Solidi C. 2013. V. 10. № 2. P. 172–175. <https://doi.org/10.1002/pssc.201200499>
- Nikl M., Yoshikawa A. Recent R&D Trends in Inorganic Single Crystal Scintillator Materials for Radiation Detection // Adv. Opt. Mater. 2015. V. 3. № 4. P. 463–481. <https://doi.org/10.1002/adom.201400571>
- Dorenbos P. Directions in Scintillation Materials Research // Radiation Detectors for Medical Applications. Dordrecht: Springer, 2006. P. 191–207. [https://doi.org/10.1007/1-4020-5093-3\\_8](https://doi.org/10.1007/1-4020-5093-3_8)
- Lukyashin K.E., Ishchenko A.V. Synthesis and Optical Properties of YAG:Ce Ceramics with a High Cerium Concentration // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 8. P. 1203–1211. <https://doi.org/10.1134/S0036023621080131>
- Kamada K., Yanagida T., Endo T., Tsutumi K., Usuki Y., Nikl M., Fujimoto Yu., Yoshikawa A. 2-inch Size Single Crystal Growth and Scintillation Properties of New Scintillator; Ce:Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> // IEEE NSS/MIC. Valencia (23–29 October 2011). 2011. P. 1927–1929.
- Alenkov V., Buzanov O., Dosovitskiy G., Egorychev V., Fedorov A., Golutvin A., Guz Yu., Jacobsson R., Korjik M., Kozlov D., Mechinsky V., Schopper A., Semennikov A., Shatalov P., Shmanin E. Irradiation Studies of a Multi-Doped Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2019. V. 916. P. 226–229. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.101>
- Lecocq P. Development of New Scintillators for Medical Applications // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2016. V. 809. P. 130. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.041>
- Tyagi M., Sarkar P.S., Singh A.K., Kalyani, Patel T., Bishoi S., Ray N.K., Desai D.G., Gadkari S.C. Development of Neutron Detector Based on Gd<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub>:Ce Single Crystals // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2019. V. 66. № 4. P. 724–728. <https://doi.org/10.1109/TNS.2019.2900440>
- Wu Y., Meng F., Li Q., Koschan M., Melcher C.L. Role of Ce<sup>4+</sup> in the Scintillation Mechanism of Codoped Gd<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>12</sub>:Ce // Phys. Rev. Appl. 2014. V. 2. № 4. P. 044009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.2.044009>
- Wu Y., Luo J., Nikl M., Ren G. Origin of Improved Scintillation Efficiency in (Lu,Gd)<sub>3</sub>(Ga,Al)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce Multicomponent Garnets: an X-ray Absorption Near Edge Spectroscopy Study // APL Mater. 2014. V. 2. P. 012101. <https://doi.org/10.1063/1.4854375>
- Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: уч. пособие. М.: МИСиС, 2007. 432 с.
- Жариков Е.В., Лаптев В.В., Майер А.А., Осико В.В. Конкуренция катионов в октаэдрических положениях галлиевых гранатов // Изв. АН СССР. Неорг. материалы. 1984. Т. 20. № 6. С. 984–991.
- Кузьмичева Г.М., Мухин Б.В., Жариков Е.В., Загуменный А.И., Лутц Г.Б., Чернышов В.В. Дефектообразование в монокристаллах гадолиний-скандий-алюминиевого граната // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 1. С. 94–99.
- Bohacek P., Krasnikov A., Kučera M., Nikl M., Zazubovich S. Defects Creation in the Undoped Gd<sub>3</sub>(Ga,Al)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Single Crystals and Ce<sup>3+</sup>-Doped Gd<sub>3</sub>(Ga,Al)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Single Crystals and Epitaxial Films Under Irradiation in the Gd<sup>3+</sup>-Related Absorption Bands // Opt. Mater. 2019. V. 88. P. 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.12.033>
- Bartosiewicz K., Babin V., Kamada K., Yoshikawa A., Nikl M. Energy Migration Processes in Undoped and Ce-Doped Multicomponent Garnet Single Crystal Scintillators // J. Lumin. 2015. V. 166. P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.05.015>

16. Kamada K., Kurosawa S., Prusa P., Nikl M., Kochurikhin V.V., Endo T., Tsutumi K., Sato H., Yokota Yu., Sugiyama K., Yoshikawa A. Cz Grown 2-in. Size Ce:Gd<sub>3</sub>(Al,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Single Crystal; Relationship between Al, Ga Site Occupancy And Scintillation Properties // Opt. Mater. 2014. V. 36. № 12. P. 1942–1945. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2014.04.001> Get rights and content
17. ГОСТ 3520-92 Методы определения показателей ослабления. Введ. 01.07.1993. М.: Изд-во стандартов, 1992. 19 с.
18. Kasimova V., Kozlova N., Buzanov O., Zabelina E. Optical Properties of Undoped Oxygen-containing Compounds of Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> and Gd<sub>3</sub>Al<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>O<sub>12</sub> Single-Crystals // AIP Conf. Proc. 2020. V. 2308. № 1. P. 020003. <https://doi.org/10.1063/5.0035129>
19. Забелина Е.В., Козлова Н.С., Гореева Ж.А., Касимова В.М. Многоугловые спектрофотометрические методы отражения для определения коэффициентов преломления // Изв. вузов. МЭТ. 2019. Т. 22. № 3. С. 168–178. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2019-3-168-178>
20. Sakthong O., Chewpraditkul W., Wanarak C., Pejchal J., Kamada K., Yoshikawa A., Pazzi G.P., Nikl M. Luminescence and Scintillation Characteristics of Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>-Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:Ce<sup>3+</sup> Scintillators // Opt. Mater. 2013. V. 36. № 2. P. 568–571. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.10.033>
21. Marcus P. Corrosion Mechanism in Theory and Practice: third ed. N.Y.: CRC Press, 2012. 930 p.
22. Hassanien A.S., Akla A.A. Effect of Se Addition on Optical and Electrical Properties of Chalcogenide CdSSe Thin Films // Superlattices Microstruct. 2016. V. 89. P. 153–169. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2015.10.044>
23. Esmaili P., Asgary S. Al<sup>3+</sup> Doped In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Thin Films: Structural and Optical Characterization // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. V. 66. № 4. P. 621–628. <https://doi.org/10.1134/S0036023621040094>
24. Xu Y.N., Ching W.Y., Brickeen B.K. Electronic Structure and Bonding in Garnet Crystals Gd<sub>3</sub>Sc<sub>2</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, Gd<sub>3</sub>Sc<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, and Gd<sub>3</sub>Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub> Compared to Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. № 3. P. 1817. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.1817>
25. Козлова Н.С., Бузанов О.А., Касимова В.М., Козлова А.П., Забелина Е.В. Оптические характеристики монокристаллического материала Gd<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>-Ga<sub>3</sub>O<sub>12</sub>:Ce // Изв. вузов. МЭТ. 2018. Т. 21. № 1. С. 18–25. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-18-25>
26. Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цв. металлургии, 1962. 224 с.
27. Sirdeshmukh D.B., Sirdeshmukh L., Subhadra K.G., Kishan Rao K., Bal Laxman S. Systematic Hardness Measurements on Some Rare Earth Garnet Crystal // Bull. Mater. Sci. 2001. V. 24. № 5. P. 469–473. <https://doi.org/10.1007/BF02706717>