

УДК 546.62:546.64:546.655.3:621.3.032

**О. В. Давыдова, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный**

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

**СИНТЕЗ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА,  
АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЦЕРИЯ, ТЕРМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Разработан метод синтеза дегидроксилированных ультрадисперсных порошков граната, легированного ионами церия (желтого люминофора), низкотемпературной термохимической реакцией. Установлено, что размеры, структура, морфология частиц полученных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия (YAG:Ce), в значительной степени зависят от состава горючей смеси и режима последующей термической обработки. Средние размеры кристаллических частиц, рассчитанные по данным удельной поверхности порошков, находятся в области от 0,9 мкм до 1,6 мкм в зависимости от температуры обжига (от 650 до 1200°C), а диаметр первичных частиц YAG:Ce (средний размер области когерентного рассеяния) составляет 45 нм при температуре обжига 650°C. Порошки на основе YAG:Ce, синтезированные термохимическим методом с использованием смеси нитратов иттрия, алюминия, церия и смешанного горючего (карбамид и гексаметиленetetрамин), при возбуждении синим светом люминесцируют в широкой полосе в диапазоне 470–750 нм с центром у 550 нм (желтое излучение). Установлено, что при получении YAG:Ce термохимическим методом в карбамиде и гексаметиленetetрамине развивается температура, достаточная для образования соединения  $Y_3Al_5O_{12}$  и вхождения ионов церия в структуру граната. Газовая восстановительная среда, образующаяся при термохимической реакции, способствует формированию ионов  $Ce^{3+}$ .

**Ключевые слова:** иттрий-алюминиевый гранат, ультрадисперсные порошки, активация, ионы церия, термохимический метод.

**O. V. Davydova, N. Ye. Drobyshevskaya, Ye. N. Poddenezhnyy**

Sukhoi State Technical University of Gomel

**SYNTHESIS OF YTTRIUM-ALUMINUM GARNET DOPED WITH CERIUM,  
THERMOCHEMICAL METHOD**

The method of synthesis of dehydroxylated ultrafine powder of garnet doped with cerium ions (yellow phosphor) by low-temperature thermo chemical reaction is developed. It was found that the size, structure and morphology of the particles of yttrium-aluminum garnet powders, activated by cerium ions, largely depend on the composition of the fuel mixture and the regime of subsequent heat treatment. The average size of the crystalline particles calculated from the data on the specific surface of the powders are in the region from 0.9  $\mu\text{m}$  to 1.6  $\mu\text{m}$  depending on the firing temperature (from 650 to 1200°C), and the diameter of the primary particles YAG:Ce (average size of the coherent scattering) is 45 nm at a firing temperature of 650°C. Powders based on YAG:Ce, synthesized by thermochemical method using a mixture of yttrium nitrates, aluminum, cerium and mixed fuel (carbamide and hexamethylenetetramine), when excited with blue light, luminesce in a wide band in the range of 470–750 nm with a center at 550 nm (yellow light). It is established that upon the preparation of YAG:Ce by thermochemical method in urea and hexamethylenetetramine develops temperature, sufficient for the formation of compounds  $Y_3Al_5O_{12}$  and entering of cerium ions in the garnet structure. The gas reducing medium formed during the thermochemical reaction contributes to the formation of  $Ce^{3+}$  ions.

**Key words:** yttrium-aluminum garnet, ultrafine powders, activation, cerium ions, thermochemical method.

**Введение.** Оксидные люминофоры в последнее десятилетие привлекают повышенное внимание ученых и разработчиков оптических и оптоэлектронных приборов различных классов и назначений. Они применяются в качестве элементов подсветки ЖК-дисплеев, в составе твердотельных источников освещения – светодиодных ламп и светильников, в конструкциях плоских автоэмиссионных экранов (Field Emission Display – FED), экранах цветного те-

левидения высокого разрешения, для маркировки и контроля товаров и продуктов [1]. Промышленностью выпускаются в основном люминесцентные порошки микрометрового размера частиц. Известно, что при переходе к ультрадисперсным (субмикронным и наноразмерным) порошкам происходит изменение их физических и физико-химических параметров [2]. Среди многочисленных применений оксидных люминофоров к настоящему времени вы-

делилась наиболее перспективная отрасль светотехники и оптоэлектроники – твердотельное освещение, которая решает глобальную задачу повсеместной замены содержащих ртуть люминесцентных ламп и экономии энергетических ресурсов.

Многолетние исследования, увенчавшиеся Нобелевской премией по физике 2014 г., привели к разработке нового класса осветительных приборов на основе полупроводниковой структуры InGaN, покрытой желтым люминофором, излучение которой для глаза воспринимается как белый свет. В качестве желтого люминофора чаще всего используются микрокристаллические порошки иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  (YAG:Ce), распределенные равномерно в полимерном компаунде [3, 4].

Такие светодиоды характеризуются повышенной цветовой температурой (холодный белый свет). Известные промышленные способы синтеза люминесцирующего порошка граната базируются на энергозатратных реакциях прямого синтеза из соответствующих оксидов, требующих высоких температур термической обработки (1500–1600°C) в условиях газовой восстановительной среды [5].

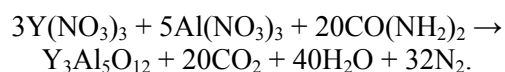
Необходимость разработки ультрадисперсных люминофоров вызвала большое количество вариантов их синтеза: золь-гель процесс, соосаждение гидроксидов и их пиролиз [6–9]. Все эти методы включают в себя смешивание исходных реагентов в жидкой фазе, формирование прекурсоров и последующий обжиг при температурах 1100–1200°C. Недавно начались разработки принципиально нового метода синтеза, основанного на термохимических реакциях взаимодействия азотокислых солей в различных органических соединениях (горючих). Апробированы в качестве восстановителей (горючих) этиленгликоль, карбамид, углеводы (фруктоза, сахароза) и др. [10, 11]. Необходимо отметить, что существующие варианты недостаточно изучены и требуют для получения люминесцирующих порошков стадии обжига прекурсоров при повышенных температурах (1100–1200°C). Это практически сводит на нет преимущества термохимического метода с точки зрения длительности процесса синтеза и экономии энергии.

С учетом вышеизложенного целью данной работы явилась разработка новых методов синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия, в основу которого положены термохимические реакции.

**Основная часть.** Методика процесса синтеза легированного YAG для получения люминесцирующего порошка химического состава

$Y_{2,95}Ce_{0,05}Al_5O_{12}$  включает в себя следующие этапы. Дозировка ингредиентов в следующем соотношении: 23,0 г  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ , ЧДА, ТУ 6–09–4676–83; 38,0 г  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ , ЧДА, ГОСТ 3757–75; 1,0 г  $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ , ЧДА, ТУ 6–09–4081–84; 21,6 г карбамида  $CH_4N_2O$ , ЧДА, ГОСТ 6691–77. Полученную смесь растворяли в 30,0 мл дистиллированной воды и после чего добавляли 2,4 г гексаметилентетрамина  $(CH_2)_6N_4$  (ГМТА, ЧДА, содержание аминов 99,9 %, код CAS # 100–97–0). Размешивали до полного растворения сухой массы и помещали полученный раствор в термостойкой чашке в термошкаф с температурой 80–100°C. При помешивании раствор концентрировался до состояния вязкого геля (1,5–2 ч). Далее чашу, закрытую алюминиевой фольгой с отверстиями для выхода газов, ставили в муфельную печь, нагретую до 350°C. В печи под воздействием быстрого нагрева проходила бурная химическая реакция окисления-восстановления, инициируемая с помощью гексаметилентетрамина. Температура в зоне реакции повышается до 1200–1300°C. Затем продукт выдерживали в печи при температуре 650°C в течение 1 ч. За время выдержки удалялась остаточная вода и выгорали органические остатки. После остывания из печи извлекали выпарительную чашу, в которой формировался пенообразный губчатый продукт ярко-желтого цвета.

На первом этапе процесса синтеза образуются соединения между азотокислыми солями и карбамидом, которые вскоре разлагаются с образованием оксидов иттрия и алюминия и выделением большого количества газов и паров воды, далее происходит формирование соединения  $Y_3Al_5O_{12}$ . Суммарная реакция синтеза граната для безводных солей и карбамида в качестве горючего может быть представлена в следующем виде:



ИК-спектры диффузного отражения порошков в интервале 4000–400  $cm^{-1}$  регистрировали с помощью спектрометра с фурье-преобразованием Thermo Nicolet Nexus FT-IR (соотношение образец : KBr = 1 : 9). Фазовый состав изучали на автоматическом рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 в излучении медного анода с никелевым фильтром. Термическую деструкцию образцов исследовали в условиях атмосферного воздуха с помощью дериватографа Q-1500D. Скорость нагрева составляла 10°C/мин. Величину удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) измеряли методом низкотемпературной десорбции аргона. Для изучения морфологии и распределения частиц по размерам использовали растровый электронный микроскоп

TESCAN. Спектры люминесценции полученных порошков регистрировали с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2 при возбуждении люминесценции светом ртутной лампы с фильтрами.

Данные по удельной поверхности порошкообразных образцов после их размола и обжига в интервале 650–1200°C, а также условный диаметр частиц, рассчитанный из данных по удельной поверхности, приведены в таблице.

**Удельная поверхность порошков иттрий-алюминиевого граната и размер частиц в зависимости от температуры обжига**

| $T, ^\circ\text{C}$ | $S_{\text{уд. YAG:Ce, синтез в карбамиде, м}^2/\text{г}}$ | $d, \text{ мкм}$ | $S_{\text{уд. YAG:Ce, синтез в карбамиде и ГМТА, м}^2/\text{г}}$ | $d, \text{ мкм}$ |
|---------------------|---|------------------|--|------------------|
| 650                 | 0,2   | 3,9              | 0,6  | 1,3              |
| 900                 | 0,3   | 2,6              | 0,8  | 0,9              |
| 1100                | 0,6   | 1,3              | 0,5  | 1,6              |
| 1200                | 0,3   | 2,6              | 0,7  | 1,1              |

Размеры частиц, формируемых при синтезе в смеси карбамида и ГМТА, находятся в микронной и субмикронной областях (от 0,9 мкм до 1,6 мкм в зависимости от температуры обжига). При термообработке с поверхности агрегатов удаляются адсорбированные газы и гидроксильные группы. Минимум размеров частиц находится в области температуры 1100°C для карбамида, используемого в качестве горючего, и 900°C – для смешанного горючего «карбамид – ГМТА». Отличия в размерах частиц связаны, скорее всего, с более высокой температурой, развиваемой при использовании смешанного горючего и более интенсивным удалением адсорбированных газов и гидроксидов с поверхности агрегатов.

Для уточнения физико-химических процессов, проходящих при термохимической реакции, был проведен дифференциально-термический анализ (ДТА) навески исходной смеси азотнокислых солей с карбамидом и ГМТА в виде геля, полученного после проведения процесса упаривания в термошкафу. Исследования проводили в интервале температур 20–1000°C. На кривых ТГ при термохимической реакции азотнокислых солей в смеси карбамида и ГМТА (рис. 1) имеется четыре ступени потери массы, границы которых припадают на 120, 180, 300 и около 450°C. На первом участке (20–120°C) происходит удаление сорбированной воды (эндотермический процесс), на втором и третьем участках (180–280°C) – распад карбамид-оксидных соединений (эндотермический процесс). При 300°C начинается экзотермическая реакция и далее происходит выгорание карбамида (350–450°C). Масса образцов при

этом резко уменьшается, а после 450°C остается практически неизменной, что подтверждается отсутствием термических эффектов до температуры 1000°C. Потеря массы гелевой смеси составляет более 90%.

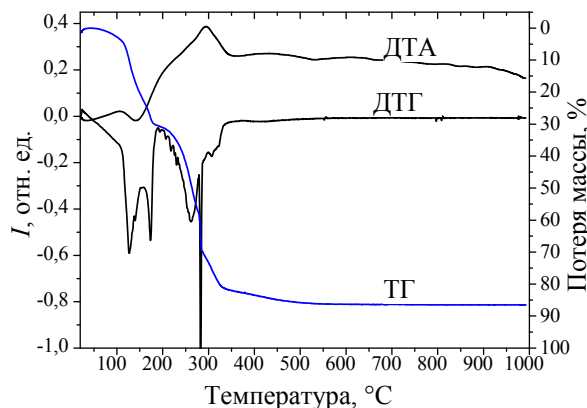


Рис. 1. Дериватограмма гелевой смеси азотнокислых солей, карбамида и ГМТА

В результате анализа ИК-спектров порошков, полученных термохимическим методом в муфельной печи (рис. 2), установлено, что в области 3200–3600  $\text{см}^{-1}$ , соответствующей вибрационным колебаниям групп О–Н, полосы гидроксидов практически отсутствуют, имеются только незначительные полосы у 3770  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие остаточным группам ОН. Полоса поглощения у 2375  $\text{см}^{-1}$  обусловлена, скорее всего, колебаниями связей С–О, принадлежащих соединениям углерода, формируемых при интенсивном выгорании органических компонентов и адсорбированных на пористых частицах граната. Причем эти полосы остаются и при дальнейшей термической обработке, что доказывает их прочную связь с поверхностью частиц. Колебания при 1320 и 1520  $\text{см}^{-1}$  принадлежат, вероятно, карбонатам алюминия и иттрия и их интенсивность незначительно уменьшается при термообработке. Полосы у 783, 505 и 438  $\text{см}^{-1}$  характеризуют колебания металлоксислородных связей Al – O, в то время как максимумы у 706 и 567  $\text{см}^{-1}$  характеризуют колебания Y – O, что доказывает формирование кристаллической фазы YAG непосредственно при использовании смеси карбамида и ГМТА.

Для определения фазового состава исследуемых образцов и условного диаметра получаемых частиц применен рентгенофазовый анализ (РФА) с помощью дифрактометра ДРОН-7 с выводом дифрактограмм на компьютер и каталога стандартных карточек для анализа основных и загрязняющих кристаллических фаз экспериментальных образцов.

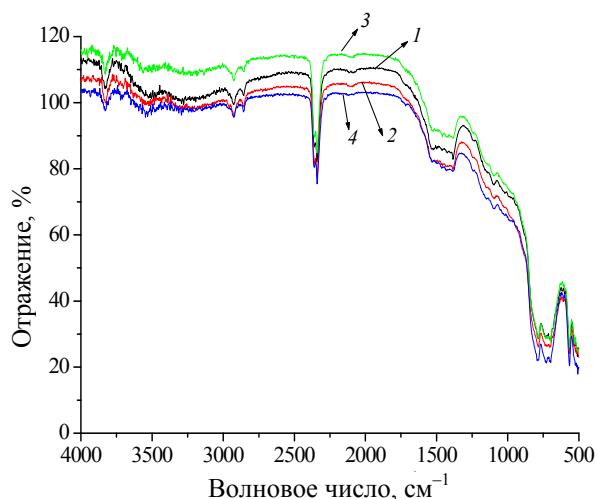


Рис. 2. ИК-спектры порошков, полученных термохимическим методом в муфельной печи (1) и обожженных в течение 1 ч при следующих температурах: 2 – 900°C; 3 – 1100°C; 4 – 1200°C

Средний размер области когерентного рассеяния частиц (условный диаметр  $D$ ) определен по величине уширения рентгенографических максимумов (расчет по формуле Шеррера [12]):

$$D(\lambda) = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \Theta},$$

где  $D$  – диаметр наночастицы, нм;  $k$  – коэффициент формы частиц (для сферических частиц обычно  $k \approx 0,9$ );  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения ( $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$ );  $\beta$  – ширина рентгеновского максимума на полувысоте (радиан). Подставляя полученные значения в формулу для  $D(\lambda)$ , получаем  $D \approx 45,3 \text{ нм}$  – для порошка

YAG:Ce при термообработке в муфельной печи при  $T = 650^\circ\text{C}$  в течение 1 ч.

Данные анализа РФА-спектров говорят о том, что в процессе термохимической реакции формируется основная кристаллическая фаза – иттрий-алюминиевый гранат  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  пространственной группы  $Ia3d$  кубической сингонии (карточка PDF № 33–40 по каталогу JCPDS–1996). А пик на  $34,2138^\circ$  принадлежит примесной фазе иттрий-алюминиевого перовскита  $\text{YAlO}_3$  (карточка PDF № 16–219 по каталогу JCPDS–1996), которая формируется при неполном прохождении реакции синтеза  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  при недостатке ионов кислорода либо недостаточном времени протекания процесса синтеза (рис. 3).

Причем при обжиге на воздухе в результате увеличения времени термообработки на максимальной температуре ( $650^\circ\text{C}$ , 1 ч) происходит рост фазы основного материала в виде поликристаллов сложного стехиометрического состава с уменьшением средней дисперсии их размеров примерно на 24%.

Спектры люминесценции порошкообразных образцов регистрировались методом синхронного детектирования на экспериментальной установке на базе комплекса СДЛ-2 и системы фазочувствительного детектирования. В качестве источника возбуждения использовали ксеноновую лампу с набором стеклянных фильтров, излучающих в спектральном диапазоне 300–650 нм. На входе монохроматора, анализирующего излучение люминесценции, был установлен стеклянный фильтр, отсекающий возбуждающее излучение. Спектрально-люминесцентные исследования порошков проводились с фильтром ( $\lambda_{\text{возб.}} - 450 \text{ нм}$ ) при комнатной температуре.

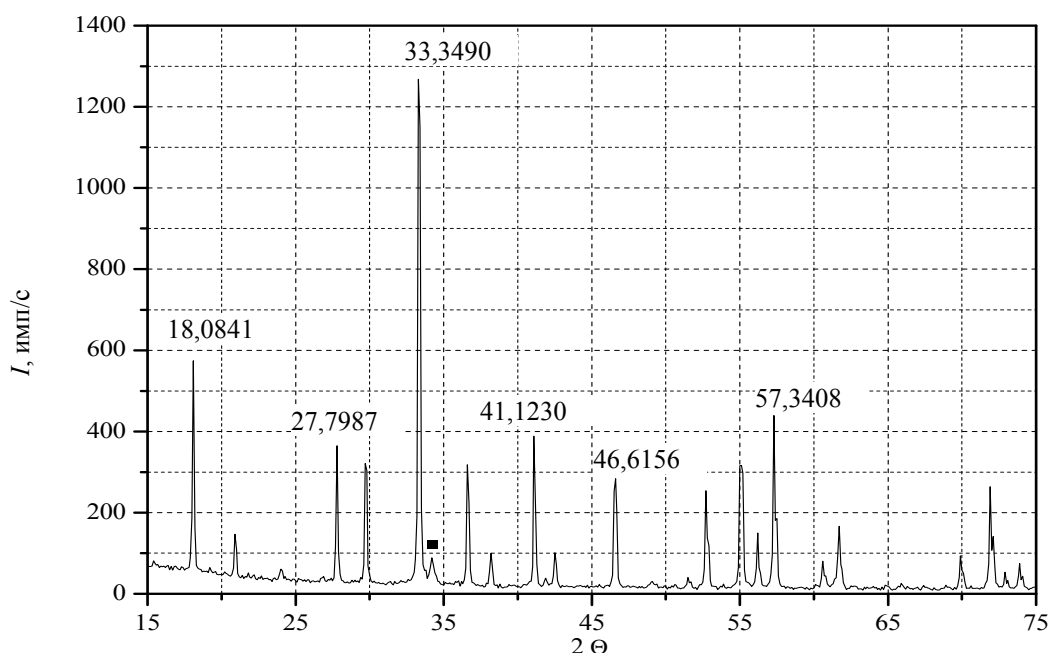


Рис. 3. Дифрактограмма порошка YAG:Ce, обожженного в течение одного часа при  $650^\circ\text{C}$ ; ■ –  $\text{YAlO}_3$

Порошки  $\text{YAG:Ce}^{3+}$ , синтезированные термохимическим методом с использованием смеси нитратов иттрия, алюминия и церия, при возбуждении синим светом люминесцируют в диапазоне 470–720 нм с центром у 520 нм (желто-зеленое излучение). На рис. 4 приведены спектры люминесценции в зависимости от температуры обжига.

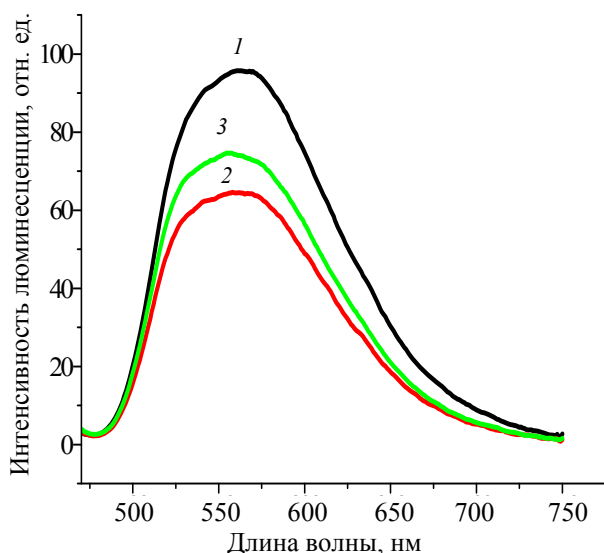


Рис. 4. Спектры люминесценции порошкообразных образцов  $\text{YAG:Ce}$ , полученных термохимическим методом при температуре обжига: 1 – 650°C; 2 – 900°C; 3 – 1000°C

По рис. 4 можно сказать, что увеличение температуры обжига порошка  $\text{YAG:Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$  в интервале 650–1100°C в воздушной среде приводит к уменьшению интенсивности люминесценции, особенно это явно видно для температуры 900°C (примерно в 2 раза). Связано это, по-видимому, с ростом доли ионов  $\text{Ce}^{4+}$  в подрешетке оксида иттрия и, соответственно, с уменьшением доли ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , который является ответственным за желто-зеленую люминесценцию в интервале длин волн 530–590 нм

(рис. 4, кривая 2). Однако при повышении температуры обжига до 1100°C происходит процесс упорядочивания кристаллической структуры, рост кристаллов, уменьшение их удельной поверхности, удаление летучих примесей, что и приводит к увеличению интенсивности люминесценции.

**Заключение.** Синтезированы ультрадисперсные порошки иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия путем термохимических реакций с использованием в качестве горючего смеси карбамида и гексаметилентетрамина. Определено влияние взаимодействия азотнокислых солей иттрия, алюминия, церия и европия в азотсодержащих горючих веществах-восстановителях (смеси карбамида и гексаметилентетрамина) на структуру и морфологию люминесцентных порошков. Установлено, что температура обжига (650°C) намного ниже, чем в прямом методе синтеза (1550–1600°C), а выход готового продукта по твердой фазе составляет около 95%. Показано, что полученные при обжиге при 650°C ультрадисперсные порошки граната при возбуждении синим светом люминесцируют в широкой полосе в диапазоне 470–750 нм с центром у 550 нм (желто-зеленое излучение). Увеличение температуры обработки до 1100°C в воздушной среде приводит к уменьшению интенсивности люминесценции примерно в 2,5 раза, что связано с ростом доли ионов четырехзарядного церия в подрешетке оксида иттрия и, соответственно, с уменьшением доли ионов  $\text{Ce}^{3+}$ , который является ответственным за желто-зеленую люминесценцию в интервале длин волн 530–590 нм.

Таким образом, при получении порошка  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  термохимическим методом в смеси карбамида и ГМТА развивается температура, достаточная для синтеза соединения  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  и вхождения ионов церия в структуру граната, а газовая восстановительная среда способствует формированию ионов трехвалентного церия.

### Литература

1. Kitai A. Luminescent Materials and Applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 374 p.
2. Shionoya S., Yen W. M., Yamamoto H. Phosphor Handbook // CRC Press Laser and Optical Science and Technology. 2nd ed. 2006. 1018 p.
3. Серова В. Н. Нанокompозиты на основе прозрачных полимеров // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 221–227.
4. Полупроводниковая лампа – источник освещения, альтернативный лампам накаливания и электролюминесцентным лампам / В. Н. Гридин [и др.] // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32, № 4. С. 375–383.
5. Particle Size Effect on the Packaging Performance of  $\text{YAG:Ce}$  Phosphors in White LEDs / Huang S. C. [et al.] // International Journal of Applied Ceramic Technology. 2009. Vol. 6, no. 4. P. 465–469.
6. Synthesis and Characterization of  $\text{YAG:Ce}^{3+}$  LED Nanophosphors / D. Jia [et al.] // Journal of the Electrochemical Society. 2007. Vol. 154, no. 1. P. J1–J4.

7. Kang Y. C. Preparation of nonaggregation YAG:Ce phosphor particles by spray pyrolysis // Journal of Aerosol Science. 1998. Vol. 29, no. 2. P. S911–S912.
8. Pan Y., Wu M., Su Q. Comparative investigation on synthesis and photoluminescence of YAG:Ce phosphor // Materials Science and Engineering. 2004. Vol. 106, no. 3. P. 251–256.
9. Potdevin A. Sol-gel based YAG:Ce<sup>3+</sup> powders for applications in LED devices // Physica Status Solidi C: Current Topics in Solid State Physics. 2007. Vol. 4, no. 1. P. 65–69.
10. Mukasyan A. S., Epstein P., Dinka P. Solution combustion synthesis of nanomaterials // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. Vol. 31, no. 2. P. 1789–1795.
11. Наноструктурированные люминофоры на основе иттрий-алюминиевого граната для дискретных фотолуминесцентных преобразователей светодиодных осветительных приборов / А. О. Добродей [и др.] // Перспективные материалы. 2013. № 1. С. 19–22.
12. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О. В. Альмяшева [и др.] // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. Т. 1, № 1. С. 26–36.

### References

1. Kitai A. Luminescent Materials and Applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 374 p.
2. Shionoya S., Yen W. M., Yamamoto H. Phosphor Handbook. CRC Press Laser and Optical Science and Technology. 2006. 1018 p.
3. Serova V. N. Nanocomposites based on transparent polymers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan technological University], 2010, no. 9, pp. 221–227 (In Russian).
4. Gridin V. N., Ryzhikov I. V., Vinogradov V. S., Shcherbakov V. N. Semiconductor lamp-lighting source, alternative to incandescent lamps and electroluminescent lamps. *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2008, vol. 32, no. 4, pp. 375–383 (In Russian).
5. Huang S. C., Wu J. K., Hsu W. J. Particle Size Effect on the Packaging Performance of YAG:Ce Phosphors in White LEDs. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2009, vol. 6, no. 4, pp. 465–469.
6. Jia D., Wang Y., Guo X., Li K., Zou Y. K., Jia W. Y. Synthesis and Characterization of YAG:Ce<sup>3+</sup> LED Nanophosphors. *Journal of the Electrochemical Society*, 2007, vol. 154, no. 1, pp. J1–J4.
7. Kang Y. C. Preparation of nonaggregation YAG:Ce phosphor particles by spray pyrolysis. *Journal of Aerosol Science*, 1998, vol. 29, no. 2, pp. S911–S912.
8. Pan Y., Wu M., Su Q. Comparative investigation on synthesis and photoluminescence of YAG:Ce phosphor. *Materials Science and Engineering*, 2004, vol. 106, no. 3, pp. 251–256.
9. Potdevin A. Sol-gel based YAG:Ce<sup>3+</sup> powders for applications in LED devices. *Physica Status Solidi C: Current Topics in Solid State Physics*, 2007, vol. 4, no. 1, pp. 65–69.
10. Mukasyan A. S., Epstein P., Dinka P. Solution combustion synthesis of nanomaterials. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 1789–1795.
11. Dobrodey A. O., Sobolev Ye. V., Poddenezhnyy Ye. N., Boyko A. A. Nanostructured luminophores based on yttrium-aluminum garnet for discrete photoluminescent converters of led lighting devices. *Perspektivnyye materialy* [Perspective materials], 2013, no. 1, pp. 19–22 (In Russian).
12. Al'myasheva O. V., Fedorov B. A., Smirnov A. V., Gusarov V. V. Size, morphology and structure of particles of zirconium dioxide nanopowder obtained in hydrothermal conditions. *Nanosistemy: fizika, khimiya, matematika* [Nanosystems: physics, chemistry, mathematics], 2010, vol. 1, no. 1, pp. 26–36 (In Russian).

### Информация об авторах

**Давыдова Ольга Владиславовна** – старший преподаватель кафедры материаловедения в машиностроении. Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (246746, г. Гомель, пр-т Октября, 48, Республика Беларусь). E-mail: olga\_davidova-uretskaya@mail.ru

**Дробышевская Наталья Евгеньевна** – старший научный сотрудник НИЛ технической керамики и наноматериалов. Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (246746, г. Гомель, пр-т Октября, 48, Республика Беларусь). E-mail: podd-evgen@yandex.ru

**Подденежный Евгений Николаевич** – доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник НИЛ технической керамики и наноматериалов. Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (246746, г. Гомель, пр-т Октября, 48, Республика Беларусь). E-mail: podd-evgen@yandex.ru

**Information about the authors**

**Davydova Olga Vladislavovna** – Senior Lecturer, the Department of Materials Science in Mechanical Engineering. Sukhoi State Technical University of Gomel (48 Octiabria Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: olga\_davidova-uretskaya@mail.ru

**Drobyshevskaya Natal'ya Yevgen'evna** – Senior Researcher, the Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterials. Sukhoi State Technical University of Gomel (48 Octiabria Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: podd-evgen@yandex.ru

**Poddenezhnyy Yevgeniy Nikolaevich** – DSc (Chemistry), Associate Professor, Chief Researcher, the Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterials. Sukhoi State Technical University of Gomel (48 Octiabria Ave., 246746, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: podd-evgen@yandex.ru

*Поступила 27.04.2018*