

УДК 678.073.661.481

## ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЦЕРИЯ

Давыдова О.В., Дробышевская Н.Е., Подденежный Е.Н., Бойко А.А., Павленок А.В. (УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь), Шаповалов В.М. (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь)

*Изучены новые варианты термохимического синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия (желтого люминофора) для применения в оптических композитах. Установлено, что размеры первичных частиц YAG:Ce (средний размер области когерентного рассеяния) составляют  $D \approx 45,3$  нм – для порошка, полученного горением в муфельной печи, и  $D \approx 50,3$  нм – для порошка, полученного в СВЧ-печи. На основе синтезированных порошков получены стеклокерамические и полимерно-кристаллические композиты с улучшенными люминесцентными свойствами.*

Ключевые слова: оптические композиты, ультрадисперсные порошки, иттрий-алюминиевый гранат, активация, ионы церия.

### Введение

Оксидные люминофоры применяются в составе твердотельных источников освещения – светодиодных ламп и светильников для маркировки и контроля товаров и продуктов [1]. Среди многочисленных применений оксидных люминофоров к настоящему времени выделилась наиболее перспективная отрасль светотехники – твердотельное освещение, которая решает глобальную задачу повсеместной замены содержащих ртуть люминесцентных ламп и экономии энергетических ресурсов. Многолетние исследования в мировом масштабе (в том числе Нобелевская премия по физике 2014 года за изобретение синих светодиодов и ярких источников белого света) привели к разработке нового класса осветительных приборов на основе полупроводниковой нитридной структуры, 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  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  (YAG:Ce). Такие светодиоды характеризуются повышенной цветовой температурой (холодный белый свет), при этом промышленные способы синтеза люминесцирующего порошка граната базируются на энергозатратных реакциях прямого синтеза из соответствующих оксидов, требующих высоких температур спекания (1500-1600 °С) в условиях газовой восстановительной среды [2].

Новая идея удаления люминофора от поверхности чипа дает возможность более гибких подходов к конструированию фотолюминесцентных преобразователей, которые могут быть изготовлены на основе композиционных материалов [3]. Для этих конструкций предпочтительнее использовать люминофоры в виде ультрадисперсных порошков, однородно распределенных в прозрачных или светорассеивающих матрицах. Полимерно-кристаллические люминофорные материалы для светопреобразователей, которые разрабатываются рядом фирм в последнее время, имеют сложный состав, в который входит полимерная прозрачная матрица, порошок люминофора и различные функ-

циональные наполнители. Так, в работе [4] подробно рассмотрены составы полимерной люминесцентной композиции и влияние наполнителей на эффективность излучения. Для получения однородного белого излучения, без разложения его на синюю и желтую составляющие, третьим компонентом в состав люминофорно-полимерной композиции вводился оптический рассеиватель из неорганических материалов с высоким коэффициентом отражения ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ).

В РФ (ОАО «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова») запатентована полимерная люминесцентная композиция для получения белого цвета, возбуждаемая синим светодиодом [5]. Предлагаемая полимерно-кристаллическая структура включает следующие компоненты, в массовых частях: прозрачный полимер – 100; фотолюминофор на основе граната  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$  или  $\text{Gd}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , или на основе смеси указанных соединений – 1,5-5,0; воск полиэтиленовый в виде порошка с размером частиц 18-30 мкм – 0,1-0,7; стабилизатор – 0,2-1,0. В качестве прозрачного полимера может быть использован поликарбонат, полистирол или сополимер стирола с акрилонитрилом и бутадиеном. В качестве стабилизатора композиция может содержать соединение из группы стерически затрудненных фосфитов.

Фирма Radiant Flex (США) недавно выпустила опытные образцы удаленных фотолюминесцентных преобразователей на основе полимерно-кристаллической структуры [6], изготовленные на поликарбонатной пленке, пригодные для СД светильников большого размера и любой формы. Главной проблемой, по мнению изготовителей, является достижение равномерного распределения люминесцирующего порошка по объему пленки и повышение ее термостойкости.

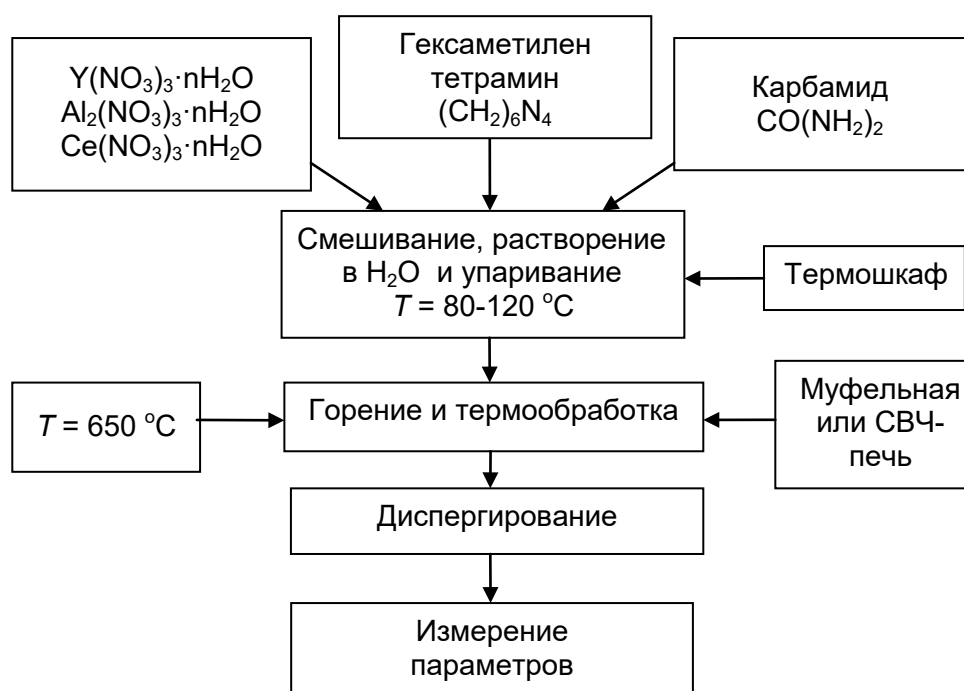
Цель работы – разработка новых вариантов синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия, предназначенного для изготовления удаленных светопреобразователей на основе стеклокерамических и полимерно-кристаллических композиционных материалов.

### Методы исследований

Для изучения физико-химических, структурных, оптических и люминесцентных свойств синтезированных материалов были использованы методы рентгенофазового анализа (РФА) (дифрактометр ДРОН-7), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп TESCAN, Чехия). Исследования параметров пористости и удельной поверхности образцов осуществляли методом Брюнауэра-Эммета-Телера (БЭТ) в ИХП НАН Украины. Спектры люминесценции и ее возбуждения регистрировались с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2, исправлялись с учетом спектральной чувствительности системы регистрации и распределения спектральной плотности возбуждающего излучения (ИФ НАНБ). Спектрально-люминесцентные исследования полученных порошков проводились при возбуждении люминесценции светом ртутной лампы с набором фильтров при комнатной температуре. Исследование люминесцентных характеристик стеклокерамических и полимерно-кристаллических композитов проводили на установке, созданной на основе монохроматора МДМ-4 с использованием светодиодов с излучением  $\lambda = 465$  нм.

### Экспериментальная часть

Методика синтеза для получения люминесцентного ультрадисперсного порошка химического состава  $\text{Y}_{2,95}\text{Ce}_{0,05}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , используемого в качестве активного наполнителя в композитах, приведена на рисунке 1.



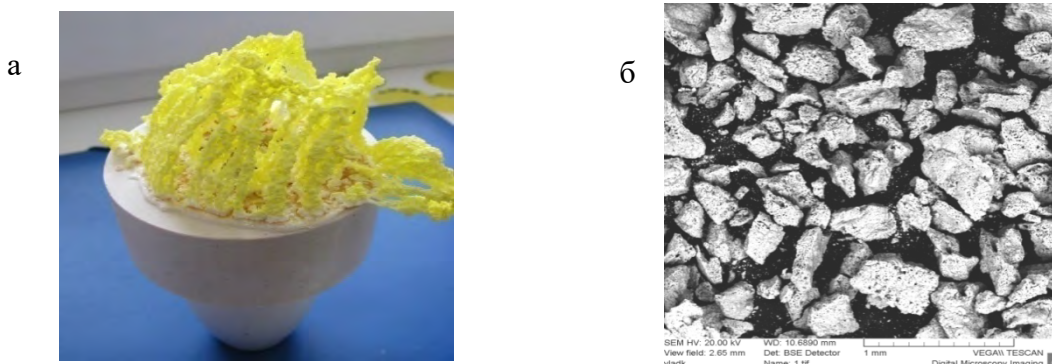
**Рисунок 1.** – Схема термохимического синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия

Взвешиваем ингредиенты в следующем соотношении: 23,0 г –  $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ; 38,0 г –  $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ ; 1,0 г –  $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ; 21,6 г – карбамида –  $CH_4N_2O$ , растворяем ингредиенты в 30,0 мл дистиллированной воды и добавляем в смесь 2,4 г гексаметилентетрамина  $(CH_2)_6N_4$ . (ЧДА, содержание аминов 99,9 %, код CAS # 100-97-0). Размешиваем раствор до полного растворения сухой массы. Полученный раствор ставим в термостойкой выпарительной чаше в термошкаф с температурой 100 °C и при помешивании концентрируем раствор до состояния вязкого геля (1,5-2 часа).

Далее закрываем чашу алюминиевой фольгой, прodelьываем отверстия для выхода газов и помещаем эту чашу в другую, большего диаметра, и ставим в муфельную печь, нагретую до температуры 350 °C. В печи под воздействием быстрого нагрева проходит бурная химическая реакция окисления-восстановления, инициируемая с помощью ГМТА, температура повышается до 1200-1300 °C (оценочные данные), и далее продукт выдерживается в печи при температуре поджига – 650 °C в течение 1 часа. За время выдержки удаляются остаточные молекулы воды, выгорают органические остатки и после остывания печи извлекается выпарительная чаша, в которой формируется пенообразный губчатый продукт ярко желтого цвета.

Сформированный на первом этапе технологической схемы раствор в фарфоровом тигле, закрытом керамической крышкой с отверстиями, можно также ставить в бытовую СВЧ-печь, без вращения, по методу, впервые описанному в статье [7]. При включении мощности 700-800 Вт через 3-5 мин происходит процесс испарения воды и бурный процесс горения с выделением большого количества газов и водяного пара. В тигле и на крышке образуется твердый волокнистый продукт ярко желтого цвета (рисунок 2а). Весь процесс занимает от 10 до 15 мин в зависимости от объема исходного раствора.

Губчатая структура пенообразного продукта легко разрушается до отдельных агрегатов (рисунок 2б), и далее полученные крупные частицы порошка подвергаются дроблению в ступке или размолу в планетарной мельнице в течение 15 мин.



а – рост волокон граната при нагреве смеси в СВЧ-печи; б – порошок после дробления  
Рисунок 2. – Образцы синтезированного порошка YAG:Ce

### Результаты и их обсуждение

Установлено, что структура, морфология частиц порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия в термохимическом процессе, в значительной степени зависит от состава горючего и последующей термической обработки. Размеры частиц-агрегатов, рассчитанные из данных по удельной поверхности порошкообразных образцов после их размола и прокаливания в интервале 700-1200 °С, находятся в области от 0,98 мкм до 3,8 мкм в зависимости от температуры прокаливания (рисунок 3).

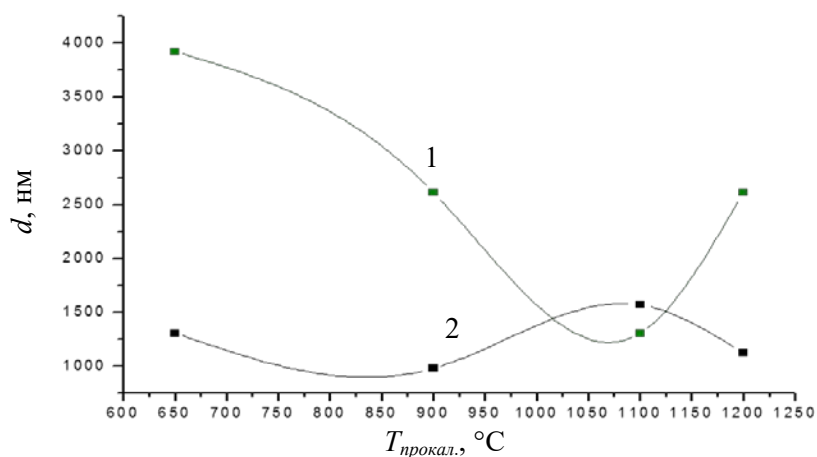


Рисунок 3. – Условный размер агрегатов иттрий-алюминиевого граната, легированного церием, полученного при горении в карбамиде (1) и смеси карбамида и ГМТА (2) в зависимости от температуры прокаливания

При термообработке с поверхности агрегатов удаляются адсорбированные газы и гидроксильные группы, и минимум размеров частиц находится в области температуры 1100 °С (для карбамида, используемого в качестве горючего) и при температуре 900 °С – для сложного горючего «карбамид – ГМТА». Отличия в размерах частиц связаны, скорее всего, с более высокой температурой, развиваемой при горении сложного

горючего, и более интенсивным удалением адсорбированных газов и гидроксидов с поверхности агрегатов.

Размеры агрегатов определяли по формуле [8]:

$$S = \frac{\pi d^2 \cdot 1000}{\rho \pi / 6d^3}$$

где  $d$  – диаметр частиц;

$S$  – удельная поверхность сферических частиц диаметром  $d$ , состоящих из материала плотностью  $\rho$ .

Поскольку  $S$  измеряется в  $\text{м}^2/\text{г}$ ,  $d$  – в нм ( $10^{-9}$  м),  $\rho$  – в  $\text{г}/\text{см}^3$  ( $4,85 \text{ г}/\text{см}^3$ ), то в формуле для  $S$  появляется множитель 1000. Зная удельную поверхность материала и его пикнометрическую плотность, представляется возможным определить условный диаметр частиц. Поэтому данный метод определения размера кристаллитов является оценочным.

Средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) ультрадисперсных частиц (условный диаметр  $d$ ) определяли по величине уширения рентгенографических максимумов (расчет по формуле Шеррера [9]):

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(2\theta / 2)},$$

где  $d$  – диаметр наночастицы, нм;

$\beta$  – ширина рентгеновского максимума на полувысоте (рад),

$\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$  для медного излучения),

$k$  – коэффициент формы частиц (обычно, можно считать  $k \approx 1$ ).

Следует отметить, что уравнение предполагает отсутствие микроискажений в кристаллической решетке анализируемого вещества. Расчет дал значение  $D \approx 50,3$  нм для порошка YAG:Ce, полученного в СВЧ-печи. В то же время средний диаметр первичных частиц порошка YAG:Ce, полученного горением в муфельной печи, составляет  $D \approx 45,3$  нм.

Дифрактограмма образца порошка YAG:Ce, полученного горением в смеси нитраты – карбамид – ГМТА в СВЧ-печи, приведена на рисунке 4.

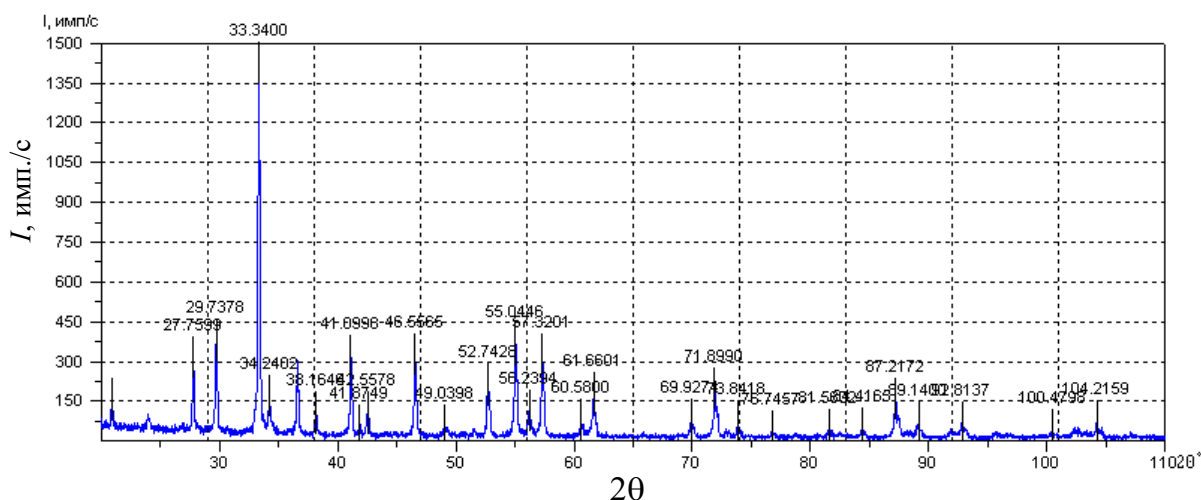


Рисунок 4. – Дифрактограмма YAG:Ce, СВЧ обработка прекурсора

Данные анализа РФА-спектров говорят о том, что в процессе горения в обоих случаях формируется основная кристаллическая фаза – иттрий-алюминиевый гранат  $Y_3Al_5O_{12}$  пространственной группы  $Ia\bar{3}d$  кубической сингонии (карточка PDF № 33-40 по каталогу JCPDS-1996), а пик на  $34,2482^\circ$  принадлежит примесной фазе иттрий-алюминиевого перовскита –  $YAlO_3$  (карточка PDF № 16-219 по каталогу JCPDS-1996), которая формируется при недостатке ионов кислорода.

Для формирования люминесцентной стеклокерамики на основе YAG:Ce в качестве прозрачной матрицы используются легкоплавкие бессвинцовые стекла: висмут-содержащее с  $T_{разм.} = 650^\circ C$   $Bi_2O_3$ - $B_2O_3$ - $ZnO$ - $SiO_2$ - $K_2O$  (ЛС-6) и цинк-кальциевое стекло с  $T_{разм.} = 750^\circ C$   $ZnO$ - $CaO_2$ - $B_2O_3$  (ЛС-2). В качестве диффузно-рассеивающего наполнителя применяли порошки кварцевого стекла с размерами частиц 10-12 и 250-400 мкм.

Образцы для спекания диаметром 30 мм и толщиной от 2 до 5 мм изготавливали путем смешивания компонентов с последующим уплотнением в стальной пресс-форме при давлении 150 МПа на гидравлическом прессе методом одностороннего прессования. Относительную плотность получаемых спеченных образцов стеклокерамики определяли в зависимости от соотношения компонентов, начальной плотности прессовок, температуры и длительности выдержки. Параметры процессов уплотнения, спекания и итоговая плотность образцов приведены в таблице. Спеченные заготовки изучали методами СЭМ, исследовали их плотность, пористость и спектрально-люминесцентные характеристики.

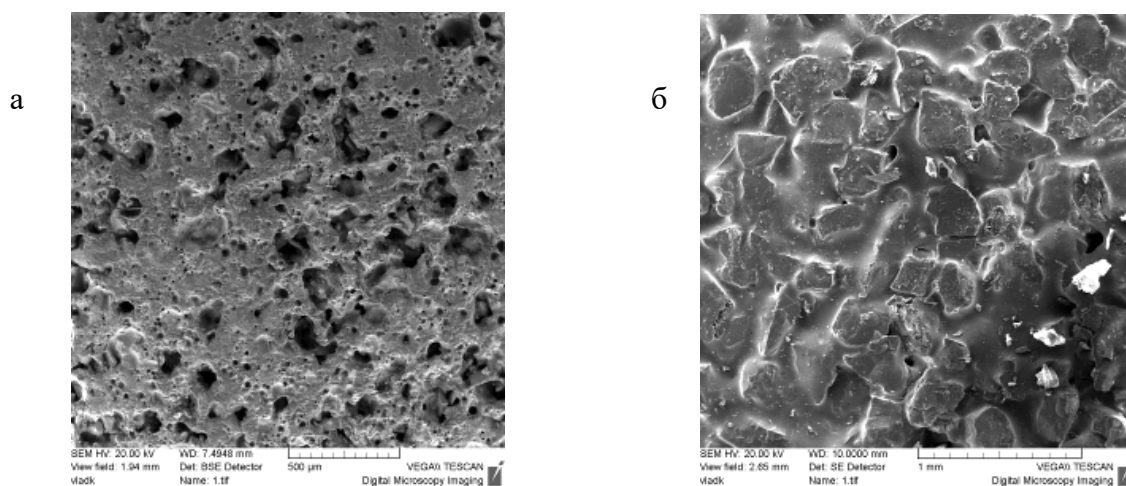
Таблица. – Параметры процессов уплотнения и спекания композитов с наноструктурированными порошками граната, легированного ионами церия

№ обр.	Исходные данные		Условия спекания		Результаты	
	Состав по гранату, мас. %, тип легк. плавк. стекла	Усилие пресса, МПа	Температура, $^\circ C$	Плотность до спекания, $г/см^3$	Плотность после спекания, $г/см^3$	Цвет после спекания
1	30 % YAG:Ce горение в карб. и ГМТА, ЛС-6	150,0	650	0,75 (37 %)	1,92 (82,5 %)	лимонно-желтый
2	15 % YAG:Ce горение в карб. и ГМТА, ЛС-6	То же	650	0,72 (35 %)	1,77 (76,5 %)	лимонно-желтый
3	30 % YAG:Ce горение в сахарозе, ЛС-2 (для сравнения)	То же	750	0,64 (47 %)	1,64 (68 %)	бледно-желтый

Плотность сырых заготовок в форме диска составляла 37-44 % и зависела от состава прессовок. Плотность получаемых образцов спеченных композитов составляла от 75 до 82,5 % от теоретической плотности кварцевого стекла, а пористость достигала 25 %. Таким образом, формируемые композиционные диски представляют собой пористую стеклокерамику, в объеме которой распределены агломераты люминесцентного порошка.

СЭМ-изображение сколов стеклокерамики, полученной с разными светорассеивающими наполнителями, демонстрирует довольно равномерное распределение частиц

кварцевого стекла в объеме образцов (рисунок 5). Причем заметно, что при использовании более тонкого порошка кварца люминофор YAG:Ce, полученный горением в карбамиде и ГМТА (концентрация 30 %), распределен в объеме легкоплавкого стекла (белые области на рисунке 5а), а при введении в состав наполнителя со средним размером зерна 250 мкм люминофор располагается по границам зерен светорассеивающего наполнителя (рисунок 5б).

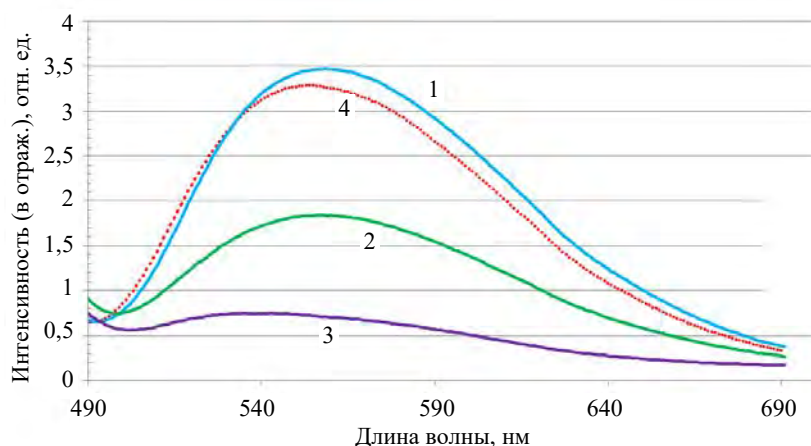


**а** – прессованная стеклокерамика на основе субмикронного порошка YAG:Ce, горение в карбамиде и ГМТА, концентрация 30 %, кварцевый наполнитель 10-12 мкм;  
**б** – тот же состав, но кварцевый наполнитель со средним размером зерна 250 мкм  
**Рисунок 5.** – СЭМ-изображение сколов стеклокерамики, полученной с разными светорассеивающими наполнителями

Полученные композиционные материалы состава «YAG:Ce – SiO<sub>2</sub> – легкоплавкое стекло» люминесцируют с максимумом на длине волны 550 нм (желтое излучение) при возбуждении на длине волны  $\lambda = 455$  нм (синий светодиод), причем наибольшей интенсивностью обладают композиты, сформированные на основе субмикронного порошка YAG:Ce, полученного горением в карбамиде и ГМТА, с концентрацией 30 мас. %. Эффективность люминесценции дисков, полученных с применением 30 % субмикронного порошка YAG:Ce примерно в 5 раз выше, чем с порошком люминофора, синтезированным методом горения в сахарозе и прокаленным при 1100 °С (рисунок 6). Такие композиционные материалы могут быть использованы для светопреобразователей мощных источников излучения белого света с рабочей температурой до 500 °С.

Полимерно-кристаллические оптические композиты формовались горячим прессованием в виде дисков и экструзионным методом в форме ленты.

В качестве прозрачной матрицы для формирования полимерно-кристаллических оптических композитов были использованы: полиэтилен высокого давления ПЭВД, полипропилен порошковый. В качестве люминесцентного материала применялись наноструктурированные порошки иттрий-алюминиевого граната, активированные ионами церия, полученные методом горения в муфельной печи и прокаленные в воздушной среде до 1100 °С. Порошок кристаллического люминофора в композите дисковых образцов составляет 10, 20, 30 % от общей массы (рисунок 7). После термообработки при температуре 140-145 °С и остывания были измерены спектры возбуждения и люминесценции модельных дисковых образцов по стандартной методике.



1 – субмикронный порошок YAG:Ce, горение в карбамиде и ГМТА, концентрация 30 %;  
 2 – то же, что 1, но концентрация YAG:Ce 15 %; 3 – наноструктурированный порошок YAG:Ce, горение в сахарозе

Рисунок 6. – Спектры люминесценции люминофорных дисков относительно эталона (пленка порошка YAG:Ce в прозрачном акриловом лаке – кривая 4)

Спектры возбуждения и люминесценции полученных композитов (1, 2, 3) при длине волны возбуждения 465 нм приведены на рисунке 8.

Полимерно-кристаллические оптические композиты на основе матрицы полиэтилена высокого давления ПЭВД и порошка YAG:Ce<sup>3+</sup>, синтезированного с использованием смеси нитратов иттрия, алюминия и церия и сложного горючего (карбамид и ГМТА), при возбуждении синим светом люминесцируют в широкой полосе в диапазоне 470-750 нм с центром на 550 нм (желто-зеленое излучение). На рисунке 8 приведены спектры возбуждения и люминесценции в зависимости от содержания люминофора.



Рисунок 7. – Полимерно-кристаллические оптические композиты на основе матрицы полиэтилена высокого давления ПЭВД и порошка YAG:Ce

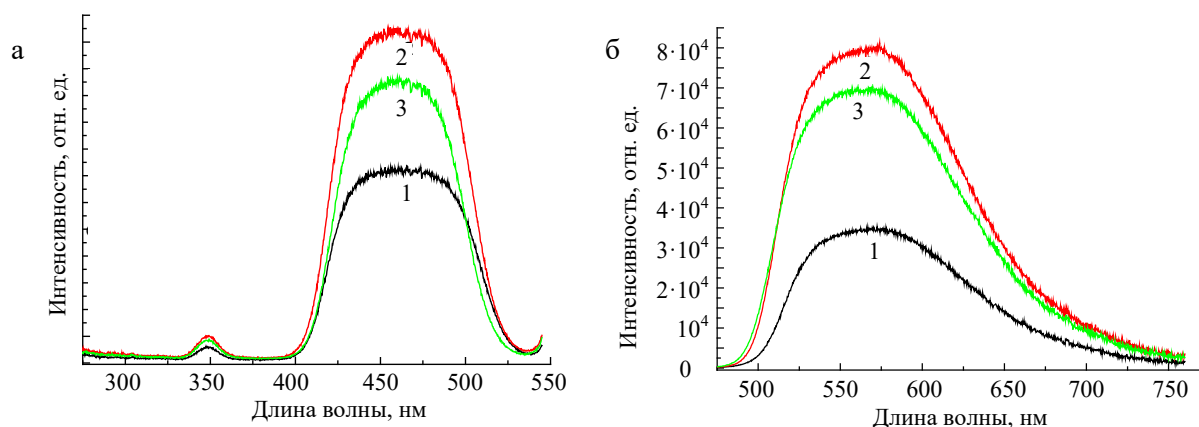


Рисунок 8. – Спектры возбуждения (а) и люминесценции (б) образцов 1-3



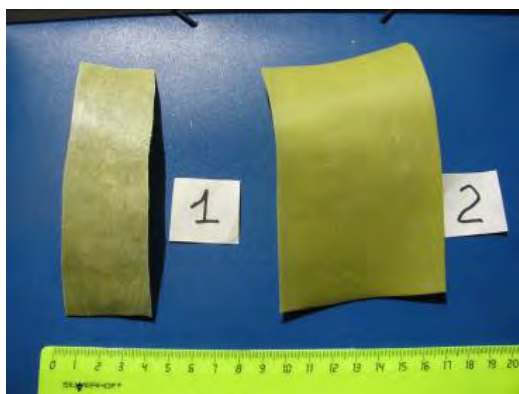
Увеличение концентрации порошка YAG:Ce от 10 до 20 мас. % приводит к росту интенсивности примерно в 2,5 раза. Дальнейшее увеличение степени наполнения полимера люминофором нецелесообразно, т.к. приводит к уменьшению интенсивности излучения (кривая 3), по-видимому, за счет повышения агломерации порошков и концентрационного тушения.

Отличительной особенностью полимерно-кристаллического материала является возможность формования люминофорного изделия также в виде ленты, получаемой экструзионным методом (экструдер одношнековый HAAKE RHEOCORD 90 (Германия) (рисунок 9). В качестве прозрачной матрицы для процесса экструзии были использованы: полипропилен порошковый, низкоплотный полиэтилен высокого давления ПЭВД, в качестве прозрачного светорассеивающего наполнителя применяли волластонит микрокристаллический, игольчатый МИВОЛЛ (Россия). Концентрация порошка YAG:Ce в обоих случаях составляла 20 мас. %.

Во втором случае (композит ПП-ПЭВД-YAG:Ce с добавками алюминатного совмещающего агента и лубриканта – воска полиэтиленового) формировались более однородные люминесцирующие ленты с равномерным распределением порошка YAG:Ce в объеме матрицы, а сами частицы порошка менее агломерированы.

С использованием модельных дисковых образцов были изготовлены макеты осветительных приборов с полимерно-кристаллическими преобразователями света.

Макет прибора с круглым фотолюминесцентным преобразователем состоит из блока питания и трех светодиодов синего цвета излучения с длиной волны излучения 470 нм. При включении светильника синее излучение светодиодов возбуждает в полимерно-кристаллическом преобразователе желто-зеленую люминесценцию, а суммарное излучение светильника воспринимается глазом как яркий белый свет (рисунок 10).



**1 – с добавкой игольчатого волластонита МИВОЛЛ; 2 – с добавками алюминатного агента и лубриканта (воск полиэтиленовый)**  
**Рисунок 9. – Ленточные композиты ПП-ПЭВД-YAG:Ce, полученные методом экструзии**



**Рисунок 10. – Макет светодиодного светильника с круглым полимерно-кристаллическим светопреобразователем**

Таким образом, можно констатировать, что оптические полимерно-кристаллические композиционные материалы, наполненные порошком иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия, люминесцируют с максимумом на длине волны 550 нм (желто-зеленое излучение) при возбуждении на длине волны  $\lambda = 460-470$  нм, и могут

быть использованы для создания светопреобразователей плоских источников белого света большой площади, возбуждаемых матрицами светодиодов синего цвета излучения.

### Выводы

1. Разработаны новые варианты термохимического синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия (желтого люминофора) в муфельной или СВЧ-печи для наполнения полимерных или стекломатериалов. Установлено, что размеры первичных частиц (средний размер области когерентного рассеяния) составляют  $D_1 \approx 45,3$  нм – для порошка YAG:Ce, полученного горением в муфельной печи, и  $D \approx 50,3$  нм для порошка, полученного в СВЧ-печи.

2. Показано, что эффективность люминесценции стеклокерамических дисков, сформированных с наполнением 30 мас. % субмикронного порошка YAG:Ce, синтезированного горением азотнокислых солей в смеси карбамида и ГМТА, примерно в 5 раз выше, чем с порошком люминофора, синтезированным методом горения в сахарозе. Такие композиционные материалы могут быть использованы для светопреобразователей мощных источников излучения белого света, с рабочей температурой до 500 °С.

3. Полимерно-кристаллические оптические композиты также формовали горячим прессованием в виде дисков и экструзионным методом в форме ленты. В качестве прозрачной матрицы для процесса экструзии были использованы: полипропилен порошковый ПП (Бельгия), низкоплотный полиэтилен высокого давления ПЭВД (Россия), в качестве прозрачного светорассеивающего наполнителя применяли игольчатый волластонит МИВОЛЛ (Россия).

4. С использованием добавки алюминатного агента и лубриканта (полиэтиленового воска) формировались оптические композиты ПП-ПЭВД-YAG:Ce в виде ленты с равномерным распределением люминесцентного порошка в объеме матрицы, а частицы порошка менее агломерированы.

5. Полученные оптические полимерно-кристаллические композиционные материалы люминесцируют с максимумом на длине волны 550 нм (желто-зеленое излучение) при возбуждении на длине волны  $\lambda = 460-470$  нм (синий светодиод), а суммарное излучение от композита демонстрирует яркий белый свет. Такие композиционные материалы могут быть использованы для создания плоских источников белого света большой площади.

### Список использованных источников

1. Kitai, A. Luminescent Materials and Applications / A. Kitai. – John Wiley & Sons, Ltd, 2008. – 374 p.

2. Подденежный, Е.Н. Классификация способов получения ультрадисперсных оксидных порошков (обзор) / Е.Н. Подденежный, А.А. Бойко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 21-28.

3. Серова, В.Н. Нанокompозиты на основе прозрачных полимеров / В.Н. Серова // 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. Полимерная люминесцентная композиция для получения белого света, возбуждаемая синим светодиодом: пат. 2405804 РФ, МПК С09К11/80, С09К11/78,

C09K11/02, C08K3/18 / Т.К. Лазарева, Т.И. Андреева, В.С. Осипчик; заявитель ОАО «Институт пластмасс им. Г.С. Петрова»; заявл. 22.07.09; опубл. 10.12.10.

6. High Performance Flexible Phosphor Sheet [Electronic resource] // Phosphor Tech Corporation. – Mode of access: <http://www.phosphortech.com/RadiantFlex.php>. – Date of access: 07.08.12.

7. Fu, Y.-P. Preparation of  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  powders by microwave-induced combustion process and their luminescent properties / Y.-P. Fu // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. – Vol. 414, № 1-2. – P. 181-185.

8. Microwave induced solution combustion synthesis of nano-sized phosphors / Z. Chen [etc.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2009. – Vol. 473. – P. L13-L16.

9. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М.: Мир, 1970. – 407 с.

---

**Davydova O.V., Drobyshevskaya N.E., Poddenezhny E.N, Boiko A.A., Pavlenok A.V., Shapovalov V.M.**

#### **Optical composites based on ultrafine powders of yttrium-aluminum garnet activated by cerium ions**

*The new variants of thermo-chemical synthesis of yttrium-aluminum garnet ultra dispersed powders doped with cerium ions (yellow phosphor) for utilization in optical composites are developed. It is established that the size of the primary particles of YAG:Ce (medium size region of coherent scattering) are  $D_1 \approx 45,3$  nm for the powder obtained by combustion in a muffle furnace and  $D_2 \approx 50,3$  nm for the powder obtained in the microwave. The glass-ceramics and polymer-crystal optical composites are prepared on the basis of these powders with improved luminescent properties.*

*Keywords: optical composites, ultrafine powders, yttrium aluminum garnet, activation, cerium ions.*

Поступила в редакцию 29.11.2017 г.