

О.В. Давыдова¹, Н.Е. Дробышевская¹, Е.Н. Подденежный¹, А.А. Бойко¹,
Н.В. Борисенко²

СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЦЕРИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

¹ УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О.Сухого»
просп. Октября, 48, Гомель, 246746, Беларусь, E-mail: podd-evgen@yandex.ru

² Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины
ул. Генерала Наумова, 17, Киев, 03164, Украина, E-mail: borysenko@naverex.kiev.ua

Разработан способ термохимического синтеза порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия (желтого люминофора) для наполнения полимерных материалов с целью создания оптических композитов. Установлено, что диаметр первичных частиц YAG:Ce (средний размер области когерентного рассеяния) составляет 45 нм. Наполненные полимерные композиты (НПК) формовали экструзионным методом в виде ленты с использованием в качестве прозрачной матрицы полиэтилена высокого давления. Установлено, что НПК люминесцируют на длине волны с максимумом 560 нм (желтое излучение) при возбуждении на длине волны 465 нм (синий светодиод), а суммарное излучение от композита демонстрирует яркий белый свет.

Ключевые слова: наноструктурированные порошки, иттрий-алюминиевый гранат, церий, наполненные полимерные композиты

ВВЕДЕНИЕ

Оксидные люминофоры применяются для маркировки изделий и продуктов, а также в оптических композитах светодиодных источников освещения [1, 2]. Многолетние исследования, увенчавшиеся Нобелевской премией по физике 2014 года, 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]. Новая идея удаления люминофора от поверхности InGaN дает возможность более гибких подходов к конструированию фотолюминесцентных преобразователей, которые могут быть изготовлены на основе композиционных полимерных материалов. Удаление

преобразователя от нагретого кристалла уменьшает деградацию люминофора, увеличивает длительность работы светового прибора. Наполненные полимерные люминофорные материалы для светопреобразователей, которые разрабатываются рядом фирм в последнее время, имеют сложный состав, в который входит полимерная прозрачная матрица, порошок люминофора и различные функциональные наполнители [5]. Недавно начались разработки принципиально нового метода синтеза YAG:Ce, основанного на процессах взаимодействия азотнокислых солей металлов с различными органическими соединениями (горючими) [6, 7]. Необходимо отметить, что существующие способы синтеза YAG:Ce в процессе горения мало изучены и не систематизированы.

Целью данной работы является разработка новых методов синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия, путем термохимических

реакций с использованием двух видов горючего – сахарозы и карбамида с добавкой гексаметилентетрамина и их применение для изготовления удаленных светопреобразователей на основе наполненных полимерных композитов (НПК).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных ингредиентов для синтеза YAG:Ce были использованы $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, чда, ТУ 6-09-4676; $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, чда, ГОСТ 3757-75; $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, чда, ТУ 6-09-4081-84; сахароза кристаллическая, $C_{12}H_{22}O_{11}$, (ТУ 9197-114-54904577-04); карбамид, $CO(NH_2)_2$, (ГОСТ 2081-2010); гексаметилентетрамин, (ГМТА), $(CH_2)_6N_4$, (ГОСТ 1381-73). Образцы YAG:Ce, полученные горением в сахарозе и смеси карбамида и ГМТА, обозначены как YAG:Ce- $C_{12}H_{22}O_{11}$ и YAG:Ce- $CO(NH_2)_2$.

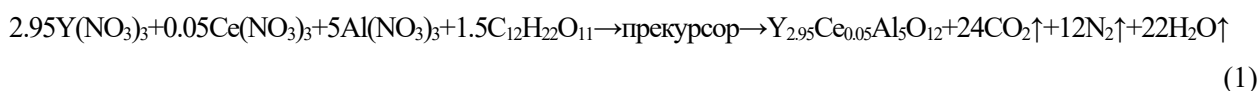
ИК-спектры диффузного отражения порошков в интервале $4000-400\text{ см}^{-1}$ регистрировали с помощью спектрометра с фурье-преобразованием Thermo Nicolet Nexus FT-IR (соотношение образец : KBr = 1 : 9). Фазовый состав изучали на автоматическом рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 (Буревестник, Россия) в излучении медного анода с никелевым фильтром. Термическую деструкцию образцов исследовали в условиях атмосферного воздуха с помощью дериватографа Q-1500D (Венгрия). Скорость нагрева составляла $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Величину удельной поверхности ($S_{уд}$) измеряли методом

низкотемпературной десорбции аргона. Размер частиц оценивали по формуле $d=6/(\rho S_{уд})$ [8], где ρ – плотность YAG:Ce ($4.56\text{ г}/\text{см}^3$). Для изучения морфологии и распределения частиц по размерам использовали растровый электронный микроскоп TESCAN (Чехия). Спектры люминесценции полученных порошков регистрировали с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2 при возбуждении люминесценции светом ртутной лампы с фильтрами. Исследование люминесцентных характеристик НПК проводили на установке, созданной на основе монохроматора МДР-4 с использованием светодиода с излучением $\lambda = 465\text{ нм}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Последовательность процесса синтеза иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия путем термохимических реакций, заключается в смешивании расчетных количеств $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, органического соединения – горючего сахарозы, добавлении дистиллированной воды, перемешивании ингредиентов до состояния однородного геля. Далее следует термическая обработка геля в сушильном шкафу при $80-120\text{ }^\circ\text{C}$.

Под воздействием тепловой энергии быстро испаряется вода, влажный гель превращается в ксерогель и между компонентами смеси происходит бурная химическая реакция (1):



Образовавшийся прекурсор содержит остатки органического горючего, свободную и связанную воду, азотсодержащие соединения, и имеет коричневато-серый цвет. Далее его диспергировали механическим путем и подвергали термообработке в муфельной печи при $700-1200\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. При этом происходит формирование кристаллической структуры, удаление свободной и связанной воды, выгорают органические примеси. Активирующие ионы Ce^{3+} входят в решетку граната, замещая в узлах часть ионов иттрия

и формируя люминесцирующий ультрадисперсный порошок $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ в виде рыхлых агломератов ярко-жёлтого цвета.

В развитие процесса синтеза оксидных порошков методом горения и с целью снижения температуры прокаливания был предложен новый вариант синтеза с использованием в качестве комплексного горючего смеси азотсодержащих органических соединений – карбамида и гексаметилентетрамина (рис. 1).

Для поджига смеси и ускорения химической реакции использовали ГМТА,

который при горении в воздушной среде генерирует большое количество тепла (4212 кДж/моль) и газообразных продуктов (CO_2 , N_2 , H_2O).

С использованием горючей смеси двойного состава удалось объединить в одном процессе,

без образования промежуточных продуктов этапы инициирования реакции горения, удаление органических примесей, свободной и связанной воды, и формирование кристаллической структуры $\text{YAG}:\text{Ce}$.

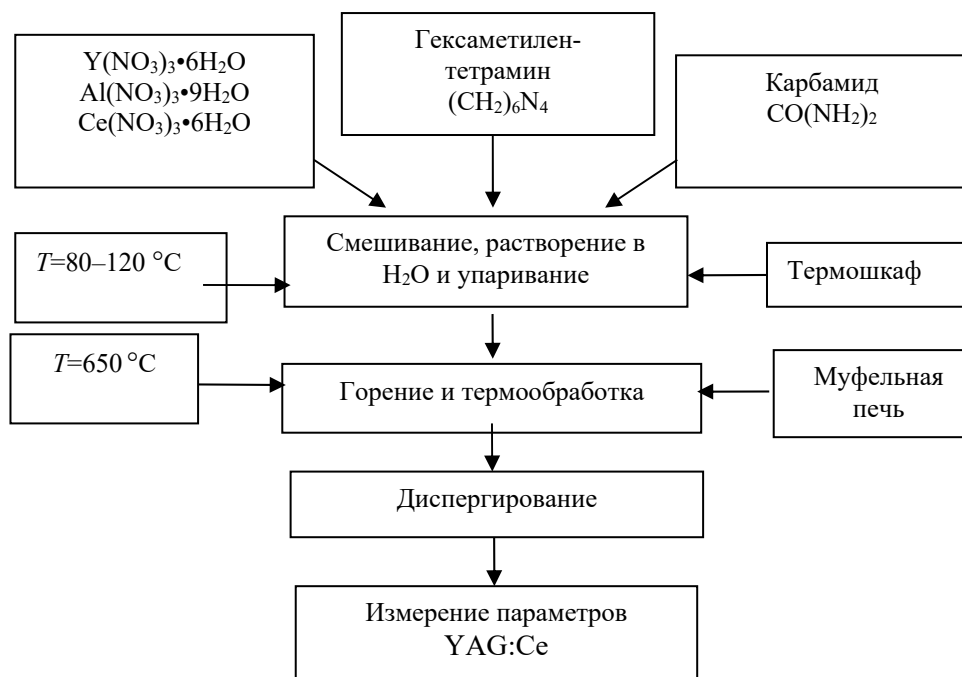


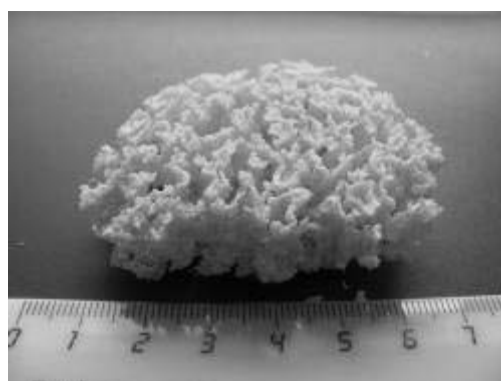
Рис. 1. Схема одностадийного термохимического синтеза ультрадисперсных порошков $\text{YAG}:\text{Ce}$

В печи под воздействием быстрого нагрева проходит бурная химическая реакция окисления – восстановления, иницируемая ГМТА, температура самопроизвольно повышается до 1200–1300 °С. Далее образец выдерживали в печи при 650 °С в течение 1 ч.

За это время удаляется прочносвязанная вода и выгорают органические остатки. После остывания печи из фарфоровой чашки извлекали губчатый продукт ярко желтого цвета (рис. 2).



а

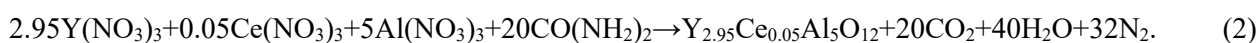


б

Рис. 2. Фотографии $\text{YAG}:\text{Ce}$: а – в фарфоровой чашке после прокаливания при 650 °С, б – обратная сторона спекшегося продукта

Суммарная реакция синтеза граната с использованием карбамида в качестве

горючего для безводных солей представлена в следующем виде:

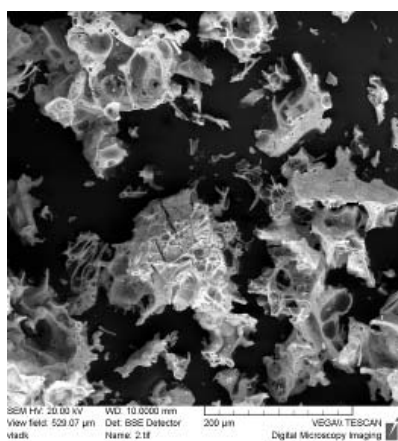


Удельная поверхность ($S_{\text{уд}}$) порошков YAG:Ce в значительной степени зависит от способа получения, вида горючего и температуры прокаливания (таблица). $S_{\text{уд}}$ порошков YAG:Ce-C₁₂H₂₂O₁₁ увеличивается с ростом температуры прокаливания, что связано с удалением с поверхности прочносвязанной воды, гидроксидов и органических остатков, и достигает максимума при T = 1000 °C (31.0 м²/г), далее

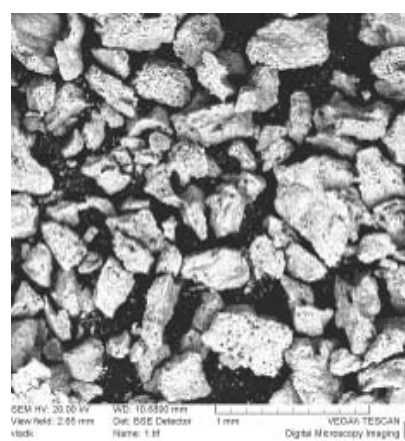
начинает снижаться, при этом происходит формирование кристаллической решетки граната, рост нанокристаллов и упорядочивание их структуры. В то же время $S_{\text{уд}}$ порошков YAG:Ce-CO(NH₂)₂ намного ниже, чем при горении в сахарозе, причем при нагреве от 650 до 1200 °C она колеблется незначительно – от 0.6 до 0.7 м²/г, а размер агрегированных частиц находится в микронном диапазоне – от 0.98 до 1.56 мкм.

Таблица. Удельная поверхность и размеры частиц порошков YAG:Ce при разных температурах прокаливания

Температура, °C	YAG:Ce, полученный горением			
	сахароза		карбамид и ГМТА	
	$S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$d, \text{ нм}$	$S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$d, \text{ мкм}$
700	1.1	1200	0.6	1.30
900	17.0	77	0.8	0.98
1000	31.0	42	0.5	1.56
1100	8.7	152	0.7	1.12
1200	10.0	132	0.6	1.30



a



б

Рис. 3. СЭМ-изображения частиц YAG:Ce, полученных с использованием в качестве горючего сахарозы (*a*) и смеси карбамида и ГМТА (*б*)

С использованием метода сканирующей электронной микроскопии была изучена морфология порошков и определены средние размеры агрегатов (рис. 3). После

прокаливания прекурсоров на воздухе формируются порошки YAG:Ce различной морфологии в зависимости от вида горючего. Размеры агрегатов составляют от 20 до

200 мкм, но в случае горения в сахарозе агломераты представляют собой тонкие, слабосвязанные агрегаты (кружева), в отличие от малопористых более плотных агломератов, формируемых при горении в карбамиде и ГМТА.

На кривых потери массы (ТГ) при взаимодействии азотнокислых солей и смеси карбамиде и ГМТА (рис. 4) можно выделить четыре процесса, максимальная скорость которых согласно кривым ДТГ соответствует 130, 170, 260 и 280 °С.

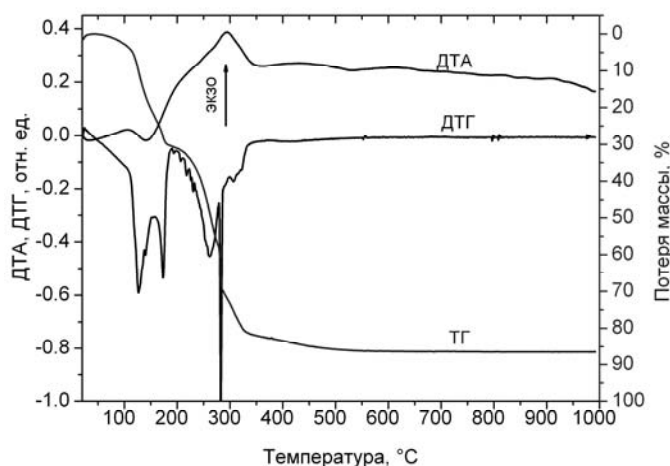


Рис. 4. ДТА, ДТГ, ТГ кривые термического разложения прекурсора YAG:Ce – смеси нитратов (алюминия, иттрия, церия) и горючего (карбамиде и ГМТА). Образец предварительно прогреет при 120 °С

На первом участке в температурном интервале 20–150 °С происходит удаление свободной и адсорбированной воды (эндотермический процесс), на втором и третьем участках (150–250 °С) – распад карбамид-оксидных комплексов иттрия и алюминия, и затем начинается экзотермическая реакция горения ($T_{\text{макс}} = 280$ °С), далее – удаление

азотнокислых остатков и выгорание органических примесей (320–450 °С). Масса в интервале 100–350 °С резко уменьшается, а после 450 °С остается практически неизменной. Отсутствие термических эффектов на кривой ДТА в интервале температур 400–1000 °С подтверждает формирование фазы граната в процессе поджига смеси.

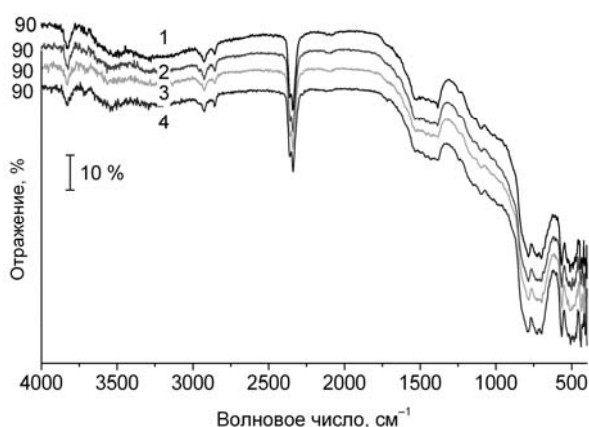


Рис. 5. ИК-спектры порошка $Y_3Al_5O_{12}:Ce$, полученного методом горения в смеси карбамиде и ГМТА и прокаленного при различных температурах: 1 – 650, 2 – 900, 3 – 1100, 4 – 1200 °С

При анализе ИК-спектров порошков, полученных путем горения в карбамиде и ГМТА (рис. 5), установлено, что в области $3200\text{--}3600\text{ см}^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям групп (O–H), как при температуре обжига, так и при всех температурах прокаливания пики гидроксидов практически отсутствуют, имеются только малоинтенсивные полосы при 3830 см^{-1} , соответствующие остаточным группам OH. В диапазоне $400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ наблюдаются хорошо разрешенные полосы поглощения, которые могут быть отнесены к характеристичным колебаниям кристаллического YAG [9]. Полосы при 729, 730, 697, 564, 507, 483 и 441 см^{-1} отвечают валентным колебаниям металл-кислород (Y–O, Al–O и Ce–O) [9].

Данные рентгенофазового анализа подтверждают, что в процессе горения в карбамиде и ГМТА формируется

кристаллическая фаза иттрий-алюминиевого граната $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ пространственной группы Ia3d кубической сингонии (JCPDS # 33–40). Малоинтенсивный пик при 34.20° принадлежит примесной фазе иттрий-алюминиевого перовскита YAlO_3 (JCPDS # 16-219), которая, по-видимому, формируется при недостатке кислорода в процессе горения (рис. 6).

Средний размер области когерентного рассеяния (ОКР), рассчитанный по формуле Шеррера от плоскости {420} для рефлекса $2\Theta=33.35^\circ$ дает значение 45 нм для порошка YAG:Ce, полученного при обработке на воздухе при $T=650^\circ\text{C}$ в течение 1 ч, причем для порошка, прокаленного на воздухе при $T=1100^\circ\text{C}$, размер ОКР практически не изменяется.

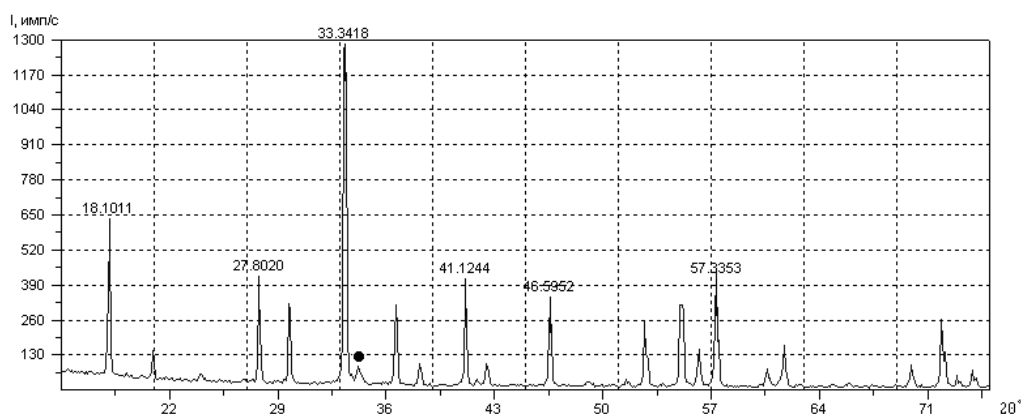


Рис. 6. Дифрактограмма YAG:Ce, прокаленного при $T=650^\circ\text{C}$ 1 час; • – YAlO_3

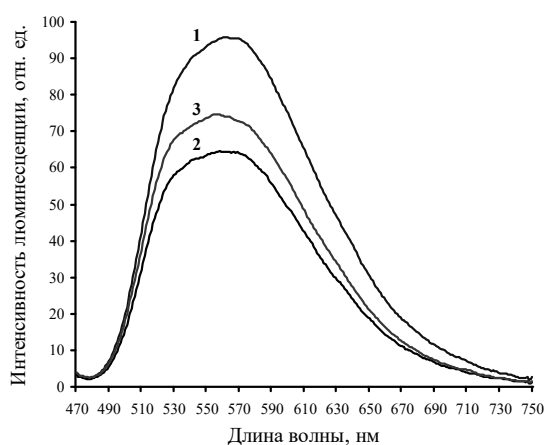


Рис. 7. Спектры люминесценции порошка YAG:Ce, синтезированного с использованием смеси карбамиде и ГМТА и прокаленного при разных температурах: 1 – 650°C , 2 – 900°C и 3 – 1100°C

Порошок YAG:Ce, синтезированный с использованием смеси азотнокислых солей иттрия, алюминия и церия и двойного горючего (карбамид и ГМТА), при возбуждении синим светом люминесцирует в широкой полосе в диапазоне 470–750 нм с максимумом при 560 нм (желто-зеленое излучение) (рис. 7).

Литературные данные о форме и энергетическом положении полос фотолюминесценции Ce-содержащих материалов позволяют отнести эти полосы к $5d-4f$ переходам ионов Ce^{3+} [10]. Имеются также данные о том, что форма и энергетическое положение полос Ce^{3+} могут различаться в зависимости от характера матрицы, в которую встроены ионы, методики приготовления и содержания церия. Так, в спектрах излучения Ce-легированных образцов высокодисперсных кремнеземов и кварцевого стекла наблюдаются широкие полосы в интервале 300–600 нм с максимумами при 413–438 нм (фиолетовое излучение) [11–13].

На рис. 7 приведен спектр люминесценции образца YAG:Ce, прокаленного при разных температурах. Увеличение температуры обработки порошка YAG:Ce в интервале 650–1100 °C в воздушной среде приводит к уменьшению интенсивности люминесценции. При 900 °C (кривая 2) интенсивность уменьшается в 1.5 раза. Связано это, по-видимому, с ростом доли ионов четырехвалентного церия в

подрешетке оксида иттрия и соответственно с уменьшением доли ионов Ce^{3+} , который является ответственным за желто-зеленую люминесценцию в интервале длин волн 530–590 нм. При повышении температуры прокаливания до 1100 °C (кривая 3) происходит упорядочение кристаллической структуры, что и приводит к увеличению интенсивности люминесценции, однако этого недостаточно для получения максимального значения интенсивности, характерного для YAG:Ce-650 °C (кривая 1).

Таким образом, при получении порошка YAG:Ce-CO(NH₂)₂ развивается температура, достаточная для синтеза Y₃Al₅O₁₂ и вхождения ионов церия в структуру граната, а слабовосстановительная среда, возникающая при горении органической смеси в азотнокислых солях, способствует формированию ионов Ce^{3+} .

Люминесцирующие НПК материалы были получены в виде ленты методом экструзии при 145 °C (рис. 8) при введении в состав полимера порошков YAG:Ce, синтезированных методом горения. В качестве прозрачной матрицы был использован 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 масс. %.

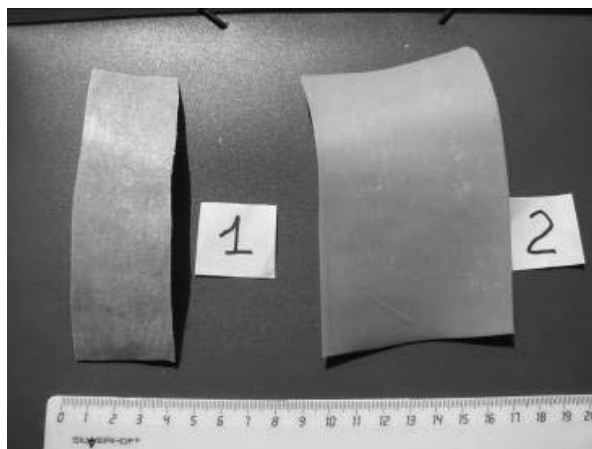


Рис. 8. Ленточные композиты ПЭВД–YAG:Ce, полученные методом экструзии: 1 – с добавкой игольчатого волластонита, 2 – без добавки

В качестве сравнительного люминесцентного материала-наполнителя применяли наноструктурированные порошки YAG:Ce, полученные методом горения в сахарозе и прокаленные на воздухе при 1100 °С. ПЭВД, наполненный порошком иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия, люминесцирует на длине волны с максимумом 560 нм (желто-зеленое

излучение) при возбуждении на длине волны 465 нм, а интенсивность люминесценции композитов с порошками YAG:Ce, полученными при горении в карбамиде, в 5–7 раз больше, чем для YAG:Ce, полученными горением в сахарозе, что связано с увеличением размеров частиц люминофоров и более плотной структурой их агрегатов (рис. 9).

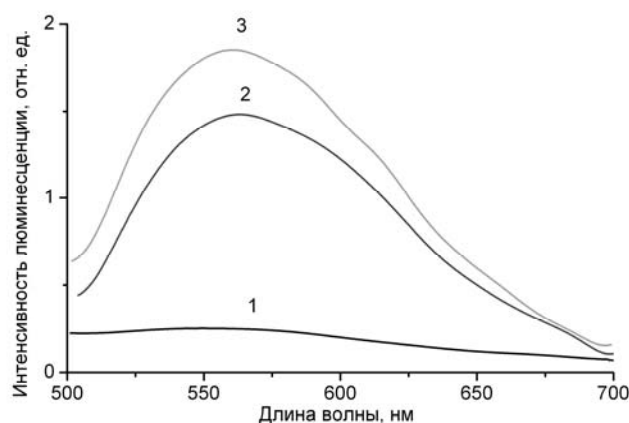


Рис. 9. Спектры люминесценции ленточных композитов: 1 – наполнитель YAG:Ce – горение в сахарозе, 2 – наполнитель YAG:Ce – горение в карбамиде и ГМТА, 3 – образец 2 с добавкой волластонита

ВЫВОДЫ

Разработан термохимический синтез ультрадисперсных порошков граната, легированного ионами церия (желтого люминофора), с использованием в качестве горючего сахарозы и с дополнительным прокаливанием прекурсоров в воздушной атмосфере при повышенных температурах (1100–1200 °С).

Установлено, что при получении порошка YAG:Ce методом горения в смеси карбамида и ГМТА развивается температура, достаточная для синтеза соединения $Y_3Al_5O_{12}$ и вхождения ионов церия в структуру граната, а слабовосстановительная среда, возникающая при горении, способствует формированию ионов Ce в трехвалентном состоянии. Размеры формируемых агрегатов, рассчитанные из данных по удельной поверхности порошков, находятся в

интервале от 0.98 до 1.56 мкм в зависимости от температуры прокаливания (700–1200 °С), а диаметр первичных частиц YAG:Ce составляет около 45 нм.

Установлено, что композиты на основе полиэтилена высокого давления, наполненные порошком YAG:Ce, люминесцируют с максимумом на длине волны 560 нм (желто-зеленое излучение) при возбуждении на длине волны 465 нм, а интенсивность люминесценции композитов с порошком YAG:Ce, полученных при горении в карбамиде, в 5–7 раз больше, чем для образцов, полученных горением в сахарозе, что связано с большими размерами частиц люминофоров и более плотной структурой их агрегатов. Такие композиционные материалы могут быть использованы для создания плоских источников белого света большой площади.

Синтез наноструктурированных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия и ихне застосування для формування наповнених полімерних оптичних композитів

О.В. Давидова, Н.Є. Дробішевська, Є.М. Подденєжний, А.А. Бойко, М.В. Борисенко

УО «Гомельський державний технічний університет ім. П.О. Сухого»
просп. Октябрия, 48, Гомель, 246746, Беларусь, podd-evgen@yandex.ru
Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, borysenko@naverex.kiev.ua

Розроблено спосіб термохімічного синтезу порошків іттрий-алюминиевого граната, легованого іонами церію (жовтого люмінофора), для наповнення полімерних матеріалів з метою створення оптичних композитів. Встановлено, що діаметр первинних частинок YAG:Ce (середній розмір області когерентного розсіювання) становить 45 нм. Наповнені полімерні композити (НПК) формували екструзійним методом у вигляді стрічки з використанням як прозорі матриці поліетилену високого тиску. Встановлено, що НПК випромінюють світло на довжині хвилі з максимумом 560 нм (жовте випромінювання) при збудженні на довжині хвилі 465 нм (синій світлодіод), а сумарне випромінювання від композиту демонструє яскраве біле світло.

Ключові слова: наноструктуровані порошки, іттрий-алюминиевий гранат, церій, наповнені полімерні композити

Synthesis of nano-structured powders of yttrium aluminum garnet doped with cerium and their application to form filled polymer optical composites

O.V. Davydova, N.E. Drobyshevskaya, E.N. Poddenezhny, A.A. Boiko, M.V. Borysenko

Sukhoy Gomel State Technical University
48 Prospekt Oktyabrya, Gomel, 246746, Belarus, podd-evgen@yandex.ru
Chuiiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, borysenko@naverex.kiev.ua

A method of thermochemical synthesis of powders of yttrium-aluminum garnet doped with cerium (yellow phosphor) for polymer material filling with the purpose of optical composites creation has been developed. As initial ingredients for the synthesis of $Y_{2.95}Ce_{0.05}Al_3O_{12}$; $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ and two kinds of organic fuel, sucrose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) and carbamide ($CO(NH_2)_2$) with the addition of hexamethylenetetramine ($(CH_2)_6N_4$) were used. The obtained samples were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), thermogravimetric analysis (TGA) and photoluminescence spectroscopy. It is found that primary particle diameter of YAG:Ce (average size of the coherent scattering) is 45 nm. Filled Polymer Composites (FPC) was formed by extrusion in the form of tape using as matrix a transparent high-density polyethylene. It has been established that the FPC luminesces with a maximum at the wavelength of 560 nm (yellow light) when excited at the wavelength of 465 nm (blue LED), and the total emission from the composite shows a bright white light.

Keywords: nano-structured powders, yttrium-aluminum garnet, cerium, filled polymer composites

ЛИТЕРАТУРА

1. Kitai A. *Luminescent Materials and Applications*. – John Wiley & Sons, Ltd. – 2008. – 292 p.
2. Подденежный Е.Н., Бойко А.А. Классификация способов получения ультрадисперсных оксидных порошков // Вестник ГГТУ имени П.О.Сухого. – 2003. – № 1. – С. 21–28.
3. Серова В.Н. Нанокompозиты на основе прозрачных полимеров // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 9. – С. 221–227.
4. Гридин В.Н., Рыжиков И.В., Виноградов В.С. и др. Полупроводниковая лампа – источник освещения, альтернативный лампам накаливания и электролюминесцентным лампам // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 375–383.
5. Пат. 2405804 РФ: МПК С09К11/80, С09К11/78, С09К11/02, С08К3/18. Полимерная люминесцентная композиция для получения белого света, возбуждаемая синим светодиодом / Лазарева Т. К., Андреева Т.И., Осипчик В.С. – Оpubл. 2010.
6. Fu Y.-P. Preparation of $Y_3Al_5O_{12}$: Ce powders by microwave-induced combustion process and their luminescent properties // *J. Alloys Compd.* – 2006. – V. 414, N 1–2. – P. 181–185.
7. Chen Z., Yan Y., Liu J. et al. Microwave induced solution combustion synthesis of nano-sized phosphors // *J. Alloys Compd.* – 2009. – V. 473, N 1–2. – P. L13–L16.
8. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. – Москва: Мир, 1984. – 306 с.
9. Lukowiak A., Wiglusz R.J., Maczka M. et al. IR and Raman spectroscopy study of YAG nanoceramics // *Chem. Phys. Lett.* – 2010. – V. 494, N 4–6. – P. 279–283.
10. Blasse G., Grabmaier B.C. *Luminescent materials*. – Berlin: Springer, 1994. – 270 p.
11. Borysenko M.V., Kulyk K.S., Ignatovych M.V. et al. Sol-gel synthesis of silica glasses, doped with nanoparticles of cerium oxide // *Nanomaterials and supramolecular structures. Physics, chemistry, and applications*. – London, NY: Springer, 2009. – P. 227–233.
12. Кулик К.С., Борисенко Н.В. Синтез и свойства нанокompозитов CeO_2/SiO_2 // Сб. Химия, физика и технология поверхности. – 2009. – Т. 15. – С. 303–310.
13. Ignatovych M., Borysenko M., Davydenko L. et al. Cerium and europium nanospecies in quartz glass: synthesis and spectral study // *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* – 2016. – V. 47, N 2–3. – P. 193–197.

REFERENCES

1. Kitai A. *Luminescent Materials and Applications* (John Wiley & Sons, Ltd, 2008).
2. Poddenezhny E.N., Boyko A.A. Classification of methods for the preparation of ultrafine oxide powders. *Vestnik Sukhoy GGTU*. 2003. 1: 21. [in Russian].
3. Serova V.N. Nanocomposites based on transparent polymers. *Vestnik Kazan. Technol. Univer.* 2010. 9: 221. [in Russian].
4. Gridin V.N., Ryzhikov I.V., Vinogradov V.S., Shcherbakov V.N. Semiconductor lamp – a light source alternative to incandescent bulbs and electroluminescent lamps. *Computer optics*. 2008. 32(4): 375. [in Russian].
5. Patent RF 2405804 Lazareva T. K., Andreeva T. I., Osipchik V. S. Polymer luminescent composition for obtaining white light excited by a blue led. 2010.
6. Fu Y.-P. Preparation of $Y_3Al_5O_{12}$: Ce powders by microwave-induced combustion process and their luminescent properties. *J. Alloys Compd.* 2006. 414(1–2): 181.
7. Chen Z., Yan Y., Liu J., Yin Y., Wen H., Zao J., Liu D., Tian H., Zhang C., Li S. Microwave induced solution combustion synthesis of nano-sized phosphors. *J. Alloys Compd.* 2009. 473(1–2): L13.
8. Gregg S.J., Sing K.S.W. *Adsorption, surface area and porosity*. (London-Toronto: Academic Press, Inc. 1982)
9. Lukowiak A., Wiglusz R.J., Maczka M., Gluchowski P., Strek W. IR and Raman spectroscopy study of YAG nanoceramics. *Chem. Phys. Lett.* 2010. 494(4–6): 279.
10. Blasse G., Grabmaier B.C. *Luminescent materials*. (Berlin: Springer, 1994).
11. Borysenko M.V., Kulyk K.S., Ignatovych M.V., Poddenezhny E.N., Boiko A.A., Dobrodey A.O., Sol-gel synthesis of silica glasses, doped with nanoparticles of cerium oxide. In: *Nanomaterials and supramolecular structures. Physics, chemistry, and applications*. (London, NY: Springer, 2009).
12. Kulyk K.S., Borysenko M.V. Synthesis and properties of the nanocomposites CeO_2/SiO_2 . *Coll. Chemistry, physics and surface technology*. 2009. 15: 303. [in Russian].
13. Ignatovych M., Borysenko M., Davydenko L., Borysenko L., Veres M., Himics L., Koos M. Cerium and europium nanospecies in quartz glass: synthesis and spectral study. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2016. 47(2–3): 193.

Поступила 22.03.2017, принята 20.06.2017