

ISSN 1561-8331(print.)

УДК 546:54.057

Поступила в редакцию 09.12.2016

Received 09.12.2016

О. В. Давыдова, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный, А. А. Бойко*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Беларусь***ТЕРМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ
ОКСИДА ИТТРИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЕВРОПИЯ**

Аннотация. Описан синтез наноструктурированных порошков оксида иттрия, легированного ионами европия методом горения с использованием в качестве горючего углеводов (фруктоза, сахароза) и уксусной кислоты, а в виде дополнительного горючего для поджига смеси – гексаметиленetetрамина. На основании изучения удельной поверхности, микроструктуры и морфологии полученных порошков, а также после прокаливания прекурсоров при температурах 700, 900 и 1100 °С установлено, что удельная поверхность падает с повышением температуры прокаливания. Это связано с удалением слабосвязанных примесных групп (ОН, NO, CO₂) с поверхности агрегатов, уплотнением кристаллической структуры частиц матрицы и формированием более крупных частиц. При температуре прокаливания 700 °С формируются наноструктурированные частицы размерами от 39 (горение в уксусной кислоте) до 53 нм (горение в сахарозе). При температуре 1100 °С формируются более крупные агрегаты с размерами частиц от 0,6 (при синтезе в сахарозе) до 0,23 мкм (при синтезе в уксусной кислоте). Полученные таким образом порошки проявляют эффективные люминесцентные свойства в красной области спектра при возбуждении в УФ-диапазоне (на длине волны 250 нм).

Ключевые слова: термохимический синтез, ультрадисперсные порошки, оксид иттрия, ионы европия

Для цитирования. Термохимический синтез ультрадисперсных порошков оксида иттрия, активированного ионами европия / О. В. Давыдова [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2017. – № 4. – С. 15–22.

O. V. Davydova, N. E. Drobyshevskaya, E. N. Poddenezhny, A. A. Boiko*Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Belarus***THERMO-CHEMICAL SYNTHESIS OF ULTRAFINE POWDERS
OF YTTRIUM OXIDE ACTIVATED BY EUROPIUM IONS**

Abstract. A new approach to the synthesis of nanostructured yttrium oxide powders doped with europium ions by the method of combustion is described. Carbohydrates (fructose, sucrose) and acetic acid were used as a fuel and hexamethylenetetramine – as additional fuel for ignition of the mixture. Based on the study of specific surface area, microstructure and morphology of the obtained powders, as well as after precursor calcination at 700, 900 and 1100 °C, it was found that specific surface area decreases with the increase of calcination temperature. This is due to the removal of weakly bound impurity groups (OH, NO, CO₂) from the surface of aggregates, compaction of the crystalline structure of the matrix particles and larger particle formation. In case of calcination at 700 °C, nanostructured particles with a size ranging from 39 nm (combustion in acetic acid) to 53 nm (burning in sucrose) are formed. Larger aggregates with particle sizes from 0.6 μm (in presence of sucrose) to 0.23 microns (in presence of acetic acid) are formed at 1100 °C. The powders obtained in such a way exhibit efficient luminescence properties in the red region of the spectrum upon excitation in the UV range (wavelength 250 nm).

Keywords: thermo-chemical synthesis, yttrium oxide, ultrafine powders, europium ions

For citation: Davydova O. V., Drobyshevskaya N. E., Poddenezhny E. N., Boiko A. A. Thermo-chemical synthesis of ultrafine powders of yttrium oxide activated by europium ions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*, 2017, no. 4, pp. 15–22 (In Russian).

Введение. Неорганические оксидные люминофоры являются основными стабильными фосфорами, используемыми в информационных табло, дисплеях, телевизионных экранах и других устройствах [1]. Развитие относительно дешевых современных жидкокристаллических и светодиодных экранных систем не исключило потребности в неорганических фосфорах, так как в ряде случаев требуется преобразование спектра подсветки, например синего и УФ-излучения светодиодов для улучшения цветовых характеристик воспроизводимых изображений. Люминесцентные материалы на основе наночастиц оксида иттрия Y₂O₃, легированного ионами лантанидов, открывают новые возможности применения в различных областях электроники, оптики и биомедицины.

Оксид иттрия является подходящей матрицей для введения легирующих ионов ввиду наличия большой ширины запрещенной зоны (5,8 эВ), высокого значения диэлектрической проницаемости, высокой термической и химической стабильности, а также прозрачности для видимого излучения [2]. Оксид иттрия Y_2O_3 обладает кубической кристаллической решеткой с пространственной группой Ia3 (Z16). Параметр решетки оксида иттрия составляет 10,6020(2) Å в соответствии с данными международной порошковой базы данных ICDD (PDF-2 № 86–1107).

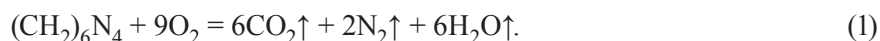
Эффективность излучения люминофора зависит от морфологии порошков [3], кристаллической структуры порошка [4] и однородности распределения активатора в матрице [5, 6]. В частности, наноразмерный $Y_2O_3:Eu^{3+}$ в качестве красного люминофора представляет значительный интерес для применения в полевых эмиссионных дисплеях [7], скрытой цветной печати [8, 9], а также для формирования прозрачной лазерной керамики [10, 11].

Необходимость разработки ультрадисперсных люминофоров вызвала большое количество вариантов их синтеза: золь-гель процесс, соосаждение гидроксидов, распылительный пиролиз. Все эти методы включают в себя смешивание исходных реагентов в жидкой фазе, формирование прекурсоров и последующую термическую обработку при температурах 1100–1200 °С. Недавно начались разработки принципиально нового метода синтеза, основанного на процессах горения азотнокислых солей в различных органических соединениях (горючих). Апробированы в качестве восстановителей (горючих) этиленгликоль, карбогидразид, карбамид, углеводы (фруктоза, сахароза) [12, 13].

С учетом вышеизложенного разработка и изучение термохимического синтеза оксидных люминофоров красного цвета излучения на основе матрицы оксида иттрия, имеет важное научное и практическое значение.

Материалы и методы исследования. В качестве исходных ингредиентов были использованы азотнокислые соли $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (ч.д.а.), ТУ 6–09–4676; $Eu(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ (х.ч.), CAS № 10031–53–5, ТУ 6–09–4676–83; фруктоза кристаллическая (ТУ РБ 100947064.014), сахароза кристаллическая (ТУ 9197–114–54904577–04), уксусная кислота – CH_3COOH (ч.д.а.), CAS № 64–19–7 (Eurochemicals).

Для получения прекурсора легированного оксида иттрия в двухстадийном процессе использовали навески органических горючих (фруктозы, сахарозы, уксусной кислоты), которые смешивали в дистиллированной воде с азотнокислыми солями иттрия и европия, затем смесь нагревали при температуре 60–80 °С до состояния гелеобразной массы. Далее гель в алундовом тигле помещали в термощкаф, предварительно нагретый до 180–200 °С. При нагревании смеси инициируется формирование комплекса между нитратом иттрия и органическим соединением, затем проходит окислительно-восстановительная реакция между нитратными группами и молекулами органической части комплексного соединения, что приводит к воспламенению смеси (1-я стадия – горение). При этом развивается температура, на 300–500 °С превосходящая температуру поджига. Внутри тигля проходит окислительно-восстановительная реакция и после завершения процесса горения и остывания тигля формируются вспененные образцы прекурсора белого цвета в виде пористых, легковесных агрегатов, легко разрушающихся при механическом воздействии (размол в ступке, планетарной мельнице). Для поджига смеси и ускорения химической реакции синтеза использовали гексаметилентетрамин $(CH_2)_6N_4$ (ГМТА), который при горении в воздушной среде генерирует большое количество тепла с выделением газообразных продуктов (1):



Навески порошков в виде серий образцов (получали прекурсоры по 3 образца каждого состава) прокаливали при температурах 700, 850–900 и 1100 °С, причем каждый образец выдерживали при заданной температуре в течение 1 ч (2-я стадия – прокаливание) и далее образцы охлаждали с печью, измеряли их удельную поверхность методом БЭТ путем адсорбции аргона при температуре жидкого азота, рассчитывали среднее арифметическое полученных значений и сводили данные в таблицу.

Удельная поверхность порошков и диаметр частиц в зависимости от температуры прокаливания образцов и вида органического горючего в двухстадийном процессе (горение и прокаливание)

Specific surface area and particle size, depending on the calcination temperature of the samples and the type of organic fuel in two-stage process (combustion and calcination)

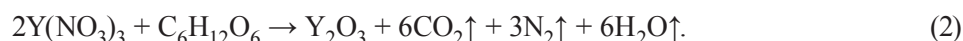
$T_{\text{прокал}}, ^\circ\text{C}$	Фруктоза		Сахароза		Уксусная кислота	
	$S, \text{м}^2/\text{г}$	$d, \text{нм}$	$S, \text{м}^2/\text{г}$	$d, \text{нм}$	$S, \text{м}^2/\text{г}$	$d, \text{нм}$
700	28	42	23	53	30	39
900	10	117	9	137	11	111
1100	3	351	2	596	5	239

Концентрация ионов Eu^{3+} во всех случаях составляла 5,0 ат.%, что является оптимальным для получения эффективной красной люминесценции [14]. Таким образом, химическую формулу легированного ионами европия оксида иттрия можно представить как $(\text{Y}_{0,95}\text{Eu}_{0,05})_2\text{O}_3$.

В соответствии с терминологией Международного Союза чистой и прикладной химии (IUPAC) [15] наноструктурированные порошки имеют три уровня организации: первичная частица $\rightarrow$ рыхлый агрегат $\rightarrow$ агломерат. Первичные частицы объединены в агрегаты, которые при термообработке уплотняются, формируя более плотные агломераты произвольной формы, зависящей от способа синтеза и вида горючего. Между первичными частицами в агрегатах имеются поровые каналы. Средний размер первичных частиц оксидных порошков рассчитывали, исходя из данных по удельной поверхности:

$$S = \frac{\pi d^2 1000}{\rho \pi \div 6 d^3},$$

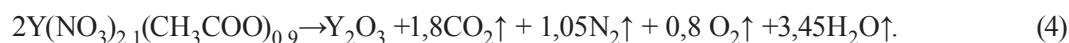
условно считая форму частиц сферической [16], откуда $d(\text{нм}) = \frac{6000}{\rho \cdot S}$, где S – удельная поверхность частиц диаметром d (нм), состоящих из материала плотностью ρ (5,05 г/см³). Суммарная химическая реакция формирования оксида иттрия, инициированная тепловой энергией, представлена следующим уравнением на примере процесса горения с добавлением фруктозы:



При использовании в качестве горючего уксусной кислоты при получении порошка оксида иттрия процессы синтеза проходят намного сложнее – продуктами взаимодействия азотнокислого иттрия с уксусной кислотой являются хелатные ацетатонитратные комплексы иттрия [17], которые образуются при нагреве смеси до 220°C в термошкафу или муфельной печи (3):



При нагревании прекурсора происходит инициирование окислительно-восстановительных реакций между нитратными и ацетатными группами, что приводит к воспламенению ацетатонитрата иттрия (4). После окончания горения образуются вспененные образцы оксида иттрия, легко разрушающиеся при механическом воздействии. Затем прекурсор прокаливали в воздушной среде при температурах 700–1200 °C и получали кристаллический порошок Y_2O_3 :



Преимуществами двухстадийного процесса синтеза люминесцентного порошка являются: «гибкость» (можно использовать разнообразные виды топлива), хорошая управляемость и воспроизводимость характеристик получаемого продукта, а также возможность извлечения полупродуктов (т. е. порошков с требуемой плотностью, удельной поверхностью и заданной морфологией) на разных стадиях процесса синтеза.

Для изучения физико-химических, структурных, оптических и люминесцентных свойств синтезированных материалов были использованы методы рентгенофазового анализа (РФА) (диф-

рактометр ДРОН-7), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (микроскоп TESCAN, Чехия). Исследования параметров пористости и удельной поверхности образцов осуществляли методом БЭТ (ИХП НАН Украины). Спектры люминесценции и ее возбуждения регистрировали с помощью спектрофлуориметра СДЛ-2, с учетом спектральной чувствительности системы регистрации и распределения спектральной плотности возбуждающего излучения (ИФ НАН Беларуси). Спектрально-люминесцентные исследования порошков проводили при возбуждении люминесценции светом ртутной лампы с набором фильтров при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что структура, морфология частиц и интенсивность люминесценции порошков оксида иттрия, активированных ионами европия, синтезированных в двухстадийном процессе, в значительной степени зависят от вида используемого горючего и последующей термической обработки. Данные по удельной поверхности порошкообразных образцов после их размола и прокаливания в интервале 700–1100 °С, а также диаметр частиц, рассчитанный из данных по удельной поверхности, приведены в таблице.

Удельная поверхность порошков оксида иттрия, получаемых в двухстадийном процессе при использовании в качестве горючего фруктозы, демонстрирует высокое значение при температуре прокаливания 700 °С, а затем уменьшается при повышении температуры, что предполагает удаление при нагреве адсорбированных слоев газовых и гидроксильных примесей, формирование отдельных наночастиц (42 нм) уже при температуре около 700 °С, а затем падает более чем

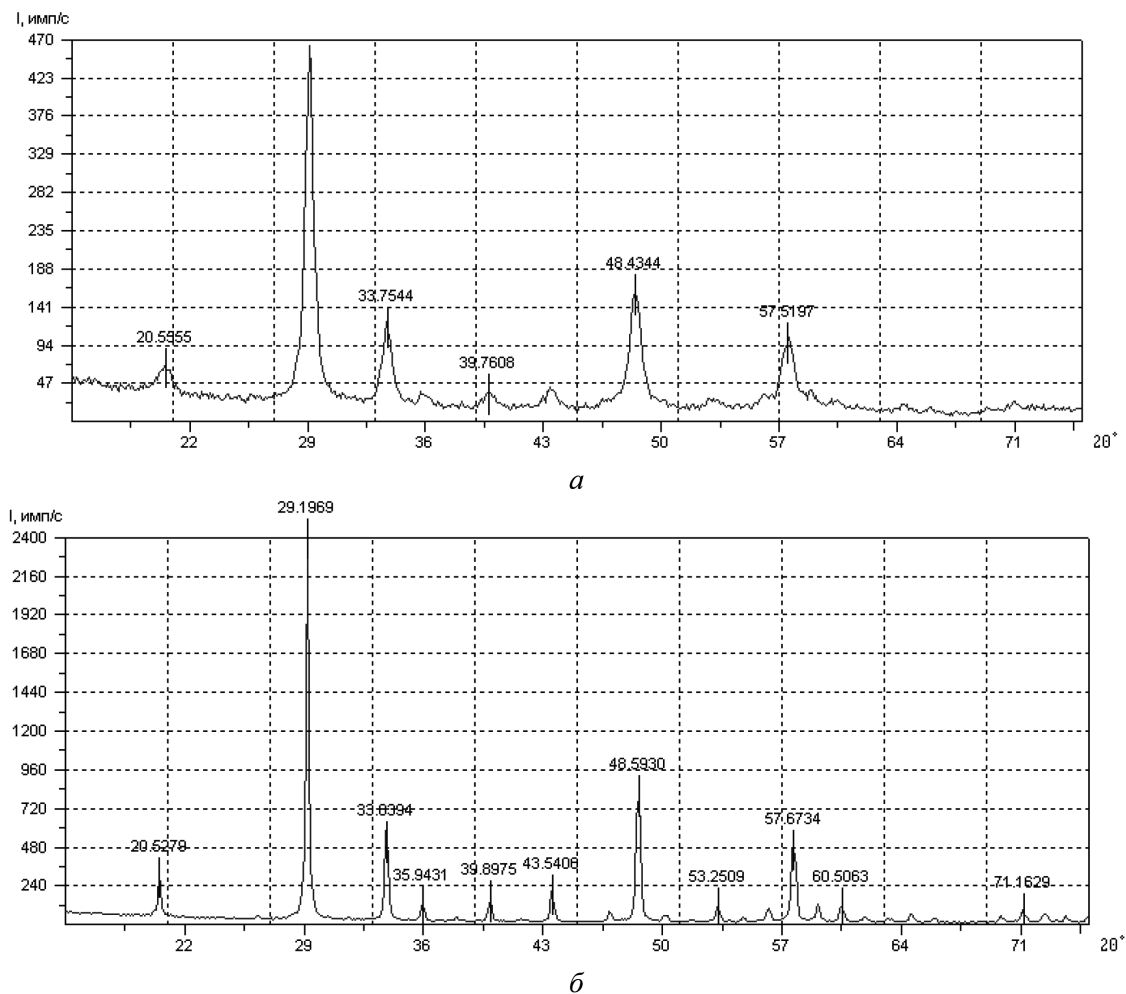


Рис. 1. Дифрактограмма образца $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ после прокаливания прекурсора, полученного горением во фруктозе при температуре 700 (а) и 1100 °С (б)

Fig. 1. XRD pattern of the $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ sample after calcination of precursor obtained by combustion in fructose at 700 (a) and 1100 °С (b)

в два раза при нагреве порошков до 900 °С. Это объясняется эффектом укрупнения агрегатов при нагреве, уменьшением пористости, повышением их кристалличности и упорядочиванием структуры. При 1100 °С размеры частиц достигают уже 0,35 мкм, что подтверждается данными рентгенофазового анализа (рис. 1).

Дифрактограммы, снятые от поверхности порошковых образцов, полученных при горении во фруктозе, демонстрируют эффект уширения основных дифракционных пиков, откуда следует, что при 700 °С еще не формируется кристаллическая фаза кубического оксида иттрия, частицы прекурсора являются аморфно-кристаллическими, а при температуре прокаливания 1100 °С формируются хорошо окристаллизованные порошки оксида иттрия (рис. 1, б) с четко выраженными рефлексами, соответствующими рефлексам кубической кристаллической структуры химического состава Y_2O_3 , пространственной группы $Ia3(206)$, образование которой подтверждается данными карточки № 41–1105 каталога JCPDS.

Анализ снимков сканирующей электронной микроскопии образцов $Y_2O_3:Eu^{3+}$, синтезированных с использованием в качестве горючего фруктозы, сахарозы и уксусной кислоты (рис. 2), показывает, что порошки состоят из высокопористых агрегатов с размерами в десятки микрометров, имеются также частицы плоской лепестковой формы, а с ростом температуры размеры агрегатов остаются практически неизменными (10–100 мкм).

РФА образцов Y_2O_3 , синтезированных в процессе горения в уксусной кислоте, подтверждает, что после прокаливания прекурсора при температуре 700 °С уже формируются наноструктурированные порошки с рефлексами, соответствующими рефлексам кубической кристаллической структуры химического состава Y_2O_3 (карточка № 41–1105 каталога JCPDS). Однако на дифрактограмме имеются некоторые дополнительные рефлексы (25,75°, 46,6°, 50,0°), принадлежащие, по-видимому, промежуточным фазам при разложении ацетатно-нитратного комплекса [18]. Параметр решетки, согласно табличным данным, равен 1,641 нм, а область когерентного рассеяния, рассчитанная по уравнению Шеррера [19], составляет около 28–30 нм, что соответствует в пределах погрешности значениям, полученным расчетным путем по данным удельной поверхности (39 нм). Рефлексы, соответствующие формированию кристаллической фазы Eu_2O_3 , на дифрактограммах не фиксируются вследствие малой концентрации примесной фазы.

Спектры люминесценции образцов $(Y_{0.95}Eu_{0.05})_2O_3$, синтезированных с использованием различных видов топлива – фруктозы, сахарозы и уксусной кислоты, при возбуждении УФ-излучением с длиной волны 250 нм представлены на рис. 3.

Для сравнения интенсивности люминесценции и положения линий в спектрах порошки, синтезированные с различными видами топлива, были прокалены при одинаковой температуре –

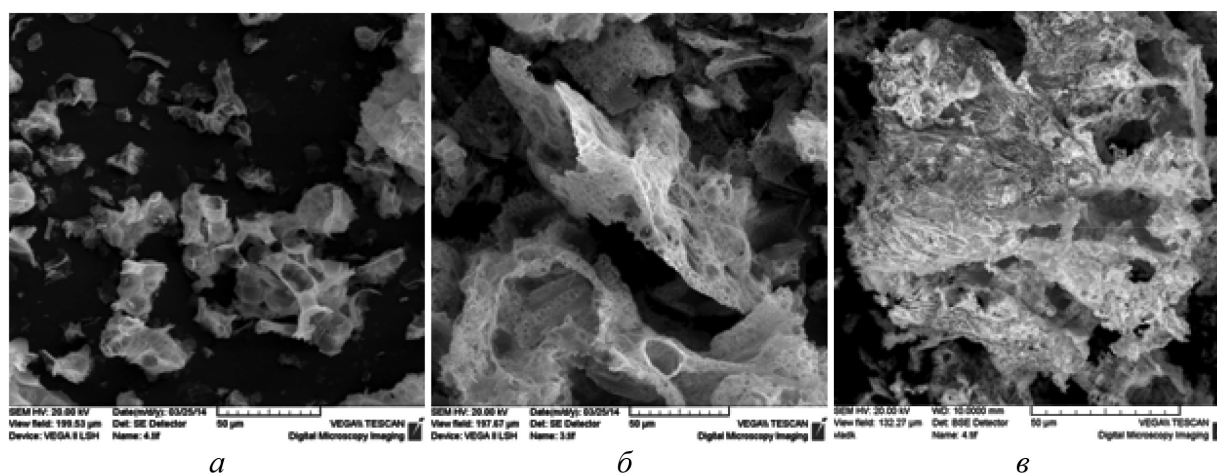


Рис. 2. СЭМ-изображение прекурсора $Y_2O_3:Eu^{3+}$, полученного горением во фруктозе (а), сахарозе (б) и уксусной кислоте (в)

Fig. 2. SEM image of the $Y_2O_3:Eu^{3+}$ precursor obtained by combustion in fructose (a), sucrose (b) and acetic acid (c)

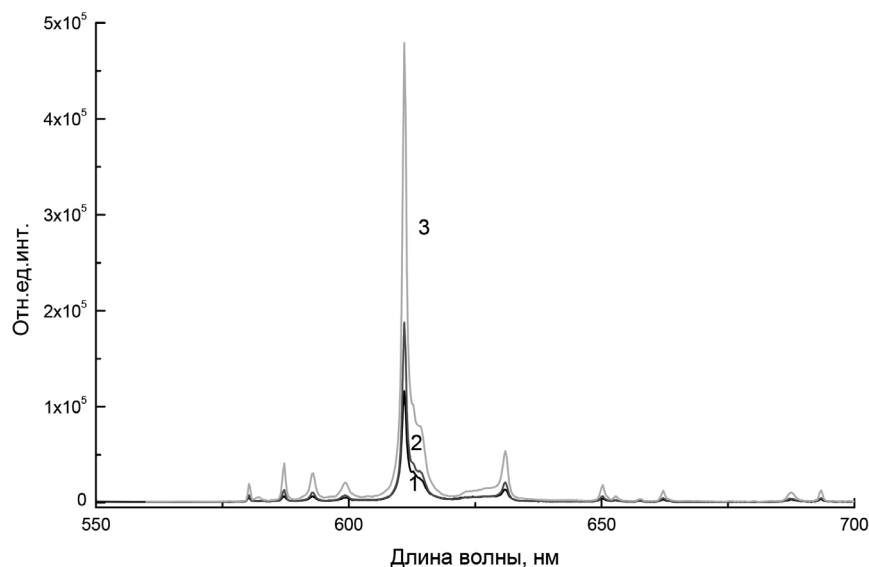


Рис. 3. Спектры люминесценции порошков $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$, полученных путем горения в различных горючих-восстановителях при температуре прокаливании 1100°C : 1 – фруктоза, 2 – сахароза, 3 – уксусная кислота, $\lambda_{\text{возб}} = 250 \text{ nm}$

Fig. 3. Luminescence spectra of the $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ powders obtained by combustion in various reducing agents at a calcination temperature of 1100°C : 1 – fructose, 2 – sucrose, 3 – acetic acid, $\lambda_{\text{exc}} = 250 \text{ nm}$

1100°C в течение часа на воздухе. Стоит отметить, что вид горючего (восстановителя) при синтезе не влияет на положение люминесцентных линий. Однако тип восстановителя влияет на интенсивность линий излучения. Наибольшая интенсивность излучения наблюдалась для порошков $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$, сформированных двухстадийным способом с использованием в качестве горючего уксусной кислоты. Данный факт объясняется сниженным относительно других вариантов горючего количеством гидроксильных групп, повышенной плотностью агрегатов, уменьшенными размерами кристаллитов и морфологией частиц $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ (средний размер $0,23 \text{ мкм}$ при температуре прокаливании 1100°C , см. табл. 1).

Как видно из рис. 3, отношение интенсивности перехода $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_2$ к интенсивности перехода $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_1$ увеличивается с уменьшением размера частиц. Известно, что $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_2$ – вынужденный электрический дипольный переход, а $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_1$ – магнитный дипольный переход. Отношение интенсивностей этих переходов зависит от симметрии окружения редкоземельного иона Eu. Чем меньше симметрия окружения ионов европия, тем больше вероятность электрического дипольного перехода по сравнению с магнитным. При уменьшении размеров наночастиц происходит увеличение соотношения поверхность/объем и, как следствие, все больше атомов располагается на поверхности. При таком расположении атомов увеличивается количество поверхностных дефектов, которые ухудшают пространственную симметрию окружения Eu^{3+} . В результате изменяется соотношение интенсивностей переходов $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_2$ и $^5\text{D}_0\text{--}^7\text{F}_1$ в сторону увеличения [14].

Выводы. 1. Разработан синтез наноструктурированных образцов порошкообразного оксида иттрия, легированного ионами европия методом горения с использованием в качестве горючего углеводов (фруктоза, сахароза) и уксусной кислоты, а в виде дополнительного горючего для поджига смеси – гексаметилентетрамина.

2. На основании изучения удельной поверхности, микроструктуры и морфологии порошкообразных образцов, синтезированных горением во фруктозе, сахарозе и уксусной кислоте и последующим прокаливанием прекурсоров при 700 , 900 и 1100°C , установлено, что удельная поверхность порошков падает с повышением температуры прокаливании. Это связано с удалением слабосвязанных примесных групп (OH , NO , CO_2) с поверхности агрегатов, с последовательным уплотнением кристаллической структуры и формированием более крупных частиц. Показано, что при температуре прокаливании 700°C формируются наноструктурированные частицы размерами от 39 (горение в уксусной кислоте) до 53 nm (горение в сахарозе), а при 1100°C – более

крупные агрегаты, с размерами частиц от 0,6 (при синтезе в сахарозе) до 0,23 мкм (при синтезе в уксусной кислоте), которые проявляют эффективные люминесцентные свойства в красной области спектра при возбуждении в УФ-диапазоне (на длине волны 250 нм).

3. Полученные наноструктурированные порошки могут быть использованы в качестве эффективных катодолюминофоров при возбуждении пучком электронов, либо в составе фотолуминофоров в плоских дисплеях и индикаторах, возбуждаемых УФ-излучением ($\lambda = 250$ нм).

Список использованных источников

1. Minh, L. Q. Luminescent nanomaterials [Electronic resource] / L. Q. Minh, W. Strek, T. K. Anh, K. Yu // *Journal of Nanomaterials*. – 2007. – Article ID 48312. – Mode of access: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2007/048312/abs/>. – Date of access: 07.08.12.
2. Mouzon, J. Synthesis of Yb:Y₂O₃ nanoparticles and fabrication of transparent polycrystalline yttria ceramics / J. Mouzon. – Luleå : Luleå tekniska universitet, 2005. – 126 p.
3. Packiyaraj, P. Structural and photoluminescence studies of Eu³⁺-doped cubic Y₂O₃ nanophosphors / P. Packiyaraj, P. Thangadurai // *Journal of Luminescence*. – 2014. – Vol. 145. – P. 997–1003.
4. Liu, F.-W. Microwave assisted solvothermal preparation and photoluminescence properties of Y₂O₃:Eu³⁺ phosphors / F.-W. Liu, C.-H. Hsu, F.-S. Chen, C.-H. Lu // *Ceramics International*. – 2012. – Vol. 38, № 2. – P. 1577–1584.
5. Huang, H. Synthesis and characterization of Eu:Y₂O₃ nanoparticles / H. Huang, G. Q. Xu, W. S. Chin, L. M. Gan, C. H. Chew // *Nanotechnology*. – 2002. – Vol. 13, № 3. – P. 318–323.
6. Psuja, P. Rare-earth doped nanocrystalline phosphors for field emission displays / P. Psuja, D. Hreniak, W. Strek // *Journal of Nanomaterials*. – 2007. – Article ID 81350. – Mode of access: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2007/081350/ref/>. – Date of access: 07.08.12.
7. Jayaramaiah, J. R. Luminescence studies of europium doped yttrium oxide nanophosphor / J. R. Jayaramaiah, B. N. Lakshminarasappa, B. M. Nagabhushana // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2012. – Vol. 173. – P. 234–238.
8. Anh, T. K. Luminescent nanomaterials containing rare earth ions for security printing / T. K. Anh, D. X. Loc, T. T. Huong, N. Vu, L. Q. Minh // *International Journal of Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 8, № 3–5. – P. 335–346.
9. Gupta, A. Electroluminescence and photoluminescence of rare earth (Eu, Tb) doped Y₂O₃ nanophosphor / A. Gupta, N. Brahme, D. Prasad Bisen // *Journal of Luminescence*. – 2014. – Vol. 155. – P. 112–118.
10. Hitz, Breck. Yb:Y₂O₃ Ceramic Laser Generates 4.2 W. Breck Hitz // *Optics Letters*. – 2004. – № 6. – P. 1212–1214.
11. Оптически прозрачная керамика на основе оксида иттрия с использованием карбонатных и алкоксидных прекурсоров / А. В. Беляков [и др.] // *Стекло и керамика*. – 2006. – № 8. – С. 17–19.
12. Mukasyan, A. S. Solution combustion synthesis of nanomaterials / A. S. Mukasyan, P. Epstein, P. Dinka // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Vol. 31, № 2. – P. 1789–1795.
13. 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.
14. Об аномальной эффективности люминесценции субмикронного фосфора Y₂O₃:Eu³⁺ / Т. А. Помелова [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2014. – Т. 56, № 12. – С. 2410–2419.
15. Rouquerol, J. Characterization of porous solids III : proceedings of the IUPAC Symposium (COPS III), Marseille, France, May 9–12, 1993 / J. Rouquerol et al. // *Studies in surface science and catalysis*. – 1993. – Vol. 87. – P. 802.
16. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость / С. Грег, К. Синг. – М.: Мир, 1970. – 407 с.
17. Получение наноразмерных порошков оксида иттрия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Д. А. Пермин [и др.] // *Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского*. – 2011. – № 2. – С. 91–97.
18. Пермин, Д. А. Получение особо чистых нанопорошков оксида иттрия методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.01 / Д. А. Пермин; Ин-т химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девятовых РАН. – Нижний Новгород, 2011. – 27 с.
19. Альмяшева, О. В. 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. Minh L. Q., Strek W., Anh T. K., Yu K., “Luminescent nanomaterials”, Available at: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2007/048312/abs/>, (accessed 07.08.12).
2. Mouzon J., “Synthesis of Yb:Y₂O₃ nanoparticles and fabrication of transparent polycrystalline yttria ceramics”, PhD Thesis, Division of Engineering Materials, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, 2006.
3. Packiyaraj P., Thangadurai P., “Structural and photoluminescence studies of Eu³⁺-doped cubic Y₂O₃ nanophosphors”, *Journal of Luminescence*, 2014, vol. 145, pp. 997–1003.
4. Liu F.-W., Hsu C.-H., Chen F.-S., Lu C.-H., “Microwave assisted solvothermal preparation and photoluminescence properties of Y₂O₃:Eu³⁺ phosphors”, *Ceramics International*, 2012, vol. 38, no. 2, pp. 1577–1584.

5. Huang H., Xu G. Q., Chin W. S., Gan L. M., Chew C. H., “Synthesis and characterization of Eu:Y₂O₃ nanoparticles”, *Nanotechnology*, 2002, vol. 13, no. 3, pp. 318–323.
6. Psuja P., Hreniak D., Strek W., “Rare-earth doped nanocrystalline phosphors for field emission displays”, Available at: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2007/081350/ref/>, (accessed 07.08.12).
7. Jayaramaiah J. R., Lakshminarasappa B. N., Nagabhushana B. M., “Luminescence studies of europium doped yttrium oxide nano phosphor”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, vol. 173, pp. 234–238.
8. Anh T. K., Loc D. X., Huong T. T., Vu N., Minh L. Q., “Luminescent nanomaterials containing rare earth ions for security printing”, *International Journal of Nanotechnology*, 2011, vol. 8, no. 3–5, pp. 335–346.
9. Gupta A., Brahme N., Prasad Bisen D., “Electroluminescence and photoluminescence of rare earth (Eu,Tb) doped Y₂O₃ nanophosphor”, *Journal of Luminescence*, 2014, vol. 155, pp. 112–118.
10. Hitz B., “Yb:Y₂O₃ Ceramic Laser Generates 4.2 W”, *Optics Letters*, 2004, no. 6, pp. 1212–1214.
11. Beliaikov A. V., Lemeshev D. O., Lukin E. S., Val’nin G. P., Grinberg E. E., “Optically transparent ceramics on the basis of yttrium oxide with the use of carbonate and alkoxide precursors”, *Steklo i keramika* [Glass and ceramics], 2006, no. 8, pp. 17–19.
12. 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.
13. Dobrodei A. O., Sobolev E. V., Poddenezhnyi E. N., Boiko A. A., “The nanostructured phosphors on the basis of yttrium-aluminum garnet for the discrete photoluminescent transformers of LED lighting instruments”, *Perspektivnye materialy* [Perspective materials], 2013, no. 1, pp. 19–22.
14. Pomelova T. A., Bakovets V. V., Korol’kov I. V., Antonova O. V., Dolgovesova I. P., “About abnormal efficiency of a luminescence of submicronic phosphorus Y₂O₃: Eu³⁺”, *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], 2014, vol. 56, no. 12, pp. 2410–2419.
15. Rouquerol J., Rodriguez-Reinoso F., Sing K. S. W., “Characterization of porous solids III : proceedings of the IUPAC Symposium (COPS III), Marseille, France, May 9–12, 1993”, *Studies in surface science and catalysis*, 1993, vol. 87, p. 802.
16. Gregg S., Sing K., *Adsorbtsiia, udel’naia poverkhnost’, poristost’* [Adsorption, surface area and porosity], Mir, Moscow, RU, 1970.
17. Permin D. A., Balabanov S. S., Gavrishchuk E. M., Drobotenko V. V., “Producing nanodimensional powders of oxide of yttrium by self-propagating high-temperature synthesis”, *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Nizhny Novgorod university of N. I. Lobachevsky], 2011, no. 2, pp. 91–97.
18. Permin D. A., “Producing especially pure nanopowders of oxide of yttrium by self-propagating high-temperature synthesis”, Abstract of Ph. D. dissertation, inorganic chemistry, Institute of Chemistry of High-Purity Substances. G. G. Deviatykh RAS, Nizhny Novgorod, RU, 2011.
19. Al’miasheva O. V., Fedorov B. A., Smirnov A. V., Gusarov V. V., “The size, morphology and structure of particles of nanopowder of dioxide of the zirconium obtained in hydrothermal conditions”, *Nanosistemy: fizika, khimiia, matematika* [Nanosystems: physics, chemistry, mathematics], 2010, vol. 1, no. 1, pp. 26–36.

Информация об авторах

Давыдова Ольга Владиславовна – ст. преподаватель, кафедра «Материаловедение в машиностроении», Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (пр-т Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: olga_davidova-uretskaya@mail.ru.

Дробышевская Наталья Евгеньевна – ст. науч. сотрудник, НИЛ техн. керамики и наноматериалов, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (пр-т Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь).

Подденежный Евгений Николаевич – гл. науч. сотрудник, НИЛ техн. керамики и наноматериалов, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (пр-т Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: podd-evgen@yandex.ru.

Бойко Андрей Андреевич – проректор по науч. работе, Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (пр-т Октября, 48, 246746, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: boiko_gstu@mail.ru.

Information about the authors

Olga V. Davydova – Assistant Professor, Materials Science in Mechanical Engineering Department, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., Gomel, 246746, Republic of Belarus). E-mail: olga_davidova-uretskaya@mail.ru.

Natalia E. Drobyshevskaya – Senior Researcher, Scientific Research Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterials, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., Gomel, 246746, Republic of Belarus).

Evgeny N. Poddenezhnyi – Leading Researcher, Scientific Research Laboratory of Technical Ceramics and Nanomaterials, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., Gomel, 246746, Republic of Belarus). E-mail: podd-evgen@yandex.ru.

Andrei A. Boiko – Vice-Rector for Research, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, Oktyabrya Ave., Gomel, 246746, Republic of Belarus). E-mail: boiko_gstu@mail.ru.