

УДК 621.762.244;628.9.03;628.955.9

СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ $Ba^{2+}Eu^{3+}$ И СТЕКЛОКЕРАМИКИ $BaO - B_2O_3/Ba^{2+}Eu^{3+}$

Т. А. СОЛОМАХА^a, Е. В. ТРЕТЬЯК^a, Е. Е. ТРУСОВА^b

^aУчреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»,
ул. Ленинградская, 14, 220006, г. Минск, Беларусь
^bБелорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, НА, 220006, г. Минск, Беларусь

Предложен оригинальный метод синтеза порошков $Ba^{2+}Eu^{3+}$, исследованы их морфологические, структурные и спектрально-люминесцентные свойства. Получены легкоплавкие стекла $BaO - B_2O_3$, и на их основе рассмотрен метод формирования стеклокерамики $BaO - B_2O_3/Ba^{2+}Eu^{3+}$, которая может стать перспективной для использования в качестве трансформаторов УФ-составляющей солнечного спектра в синюю и красную области спектра при пассивной досветке растений.

Ключевые слова: люминесценция европия; иодид бария; стеклокерамика.

STRUCTURAL AND LUMINESCENCE PROPERTIES $Ba^{2+}Eu^{3+}$ POWDERS AND $BaO - B_2O_3/Ba^{2+}Eu^{3+}$ GLASS-CERAMICS

Т. А. SALAMAKHA^a, Y. V. TRATSIAK^a, E. E. TRUSOVA^b

^aInstitute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University,
Lieninhradskaja Street, 14, 220006, Minsk, Belarus
^bBelarusian State Technological University, Sviardlova Street, 13A, 220006, Minsk, Belarus
Corresponding author: T.A. Salamakha (tanja_313@mail.ru)

An original method of $Ba^{2+}Eu^{3+}$ powders synthesis has been developed in this work. The structural, morphological and spectral-luminescence properties of these powders has been researched. Low-melted glasses $BaO - B_2O_3$ and method of $BaO - B_2O_3/Ba^{2+}Eu^{3+}$ glass-ceramics formation based on this glasses have been proposed. This glass-ceramics may be promising for use as a transformer of the solar spectrum UV component in the blue and red region of the spectrum in passive supplementary plants lighting.

Key words: europium luminescence; barium iodide; glass-ceramics.

Образец цитирования:

Соломаха Т. А., Третьяк Е. В., Трусова Е. Е. Структурные и люминесцентные свойства порошков $Ba^{2+}Eu^{3+}$ и стеклокерамики $BaO - B_2O_3/Ba^{2+}Eu^{3+}$ // Журн. Белорус, гос. ун-та. Химия. 2017. № 2. С. 43-49.

Авторы:

Татьяна Александровна Соломаха - младший научный сотрудник лаборатории нанохимии.
Евгений Владимирович Третьяк - кандидат химических наук; старший научный сотрудник лаборатории нанохимии.
Екатерина Евгеньевна Трусова - кандидат технических наук; доцент кафедры технологии стекла и керамики факультета химической технологии и техники.

For citation:

Salamakha T. A., Tratsiak Y. V., Trusova E. E. Structural and luminescence properties $Ba^{2+}Eu^{3+}$ powders and $BaO - B_2O_3/Ba^{2+}Eu^{3+}$ glass-ceramics. *J. Belarus. State Univ. Chem.* 2017. No. 2. P. 43-49 (in Russ.).

Authors:

Tatsiana Salamakha, junior researcher at the laboratory of nanochemistry.
tanja_313@mail.ru
Yauhen Tratsiak, PhD (chemistry); senior researcher at the laboratory of nanochemistry.
slon.zhenya@gmail.com
Ekaterina Trusova, PhD (engineering); associate professor at the department of glass and ceramics technology, faculty of chemical technology and technique.
trusovakaterina@mail.ru

Введение

В настоящее время люминофоры находят применение в научно-технической деятельности: в системах освещения, приборостроении, физике высоких энергий, медицине, в сфере обеспечения национальной безопасности, геологоразведке, сельском хозяйстве и др. [1-3]. Одна из перспективных областей применения люминофоров - их использование в качестве люминесцентных трансформаторов, что прежде всего обусловлено возможностью модификации спектра в зависимости от поставленной цели. Важной задачей, где потенциал люминесцентных трансформаторов может быть раскрыт в полной мере, является досветка растений [4-7]. Известно, что в растениях присутствуют несколько типов пигментов (хлорофиллы, каротиноиды, фитохромы и т. д.), характеризующихся поглощением в двух различных областях спектра с максимумами 450 и 650 нм [4; 8]. В связи с этим для обеспечения роста растений и увеличения скорости вызревания плодов, как правило, используется активная досветка растений, основанная на использовании светодиодов, излучающих в синей и красной областях спектра. Однако помимо активной может применяться и пассивная досветка, которая заключается в преобразовании солнечного спектра за счет люминофоров, модифицирующих солнечный спектр в сторону увеличения интенсивностей в синей или красной области спектра. В качестве активатора для таких люминофоров могут быть использованы ионы Eu^{2+} и Eu^{3+} , полосы люминесценции которых приходятся на синюю и красную области спектра соответственно и относительные интенсивности которых могут быть скорректированы различным соотношением $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ в люминофоре. Ранее нами была показана возможность получения порошков иодида бария с различным соотношением ионов $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ при использовании $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ в качестве прекурсора и NH_4I - в качестве иодирующего агента [9]. Однако высокая гигроскопичность порошков иодидов накладывает определенные ограничения на их применение, особенно при высокой влажности. Указанный недостаток может быть нивелирован путем использования стеклокерамики на основе иодида бария с различным соотношением $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ для пассивной досветки растений.

Цель настоящей работы - исследование влияния концентрации иона-активатора на спектрально-люминесцентные свойства $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, разработка метода получения стеклокерамики на его основе, исследование структурных и люминесцентных свойств полученной стеклокерамики.

Методика эксперимента

В качестве исходных реагентов использовали $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NH_4HCO_3 , NH_4I , H_3BO_3 , BaCO_3 квалификации «ч. д. а.».

Синтез прекурсора. $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ получали методом обратного осаждения. К подкисленному раствору $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ добавляли раствор $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$ из расчета замещения 1; 3; 5 и 7 ат. % ионов Ba^{2+} на ионы Eu^{3+} . Полученную смесь нитратов при постоянном перемешивании прикапывали к осадителю - раствору NH_4HCO_3 (10 г/100 г H_2O). Полученный осадок $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ выделяли центрифугированием, промывали два раза дистиллированной водой, переносили в чашку Петри и сушили на воздухе при 80 °С.

Синтез $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$. В качестве базового способа получения $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ использовали двухстадийный метод, описанный в [9]. $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ получали термообработкой смеси порошков $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ и NH_4I в трубчатой печи в течение 30 мин при температуре 380 °С с предварительной продувкой этих порошков аргоном. Основное отличие от метода, приведенного в [9], заключалось в том, что смесь порошков $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ и NH_4I спекали при температуре 400 °С. а продувку аргоном осуществляли в течение всего синтеза.

Синтез легкоплавких стекол. Для получения стеклянной матрицы, в состав которой входит $31\text{BaO} - 69\text{B}_2\text{O}_3$ (мас. %), в качестве исходных реагентов использовали BaCO_3 - и H_3BO_3 . Чтобы компенсировать улетучивание борной кислоты, ее брали с 15 % избытком. Синтез стекол проводили в фарфоровых тиглях в электрической печи при 1000 °С, с выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Выработку стекол осуществляли путем отливки расплава на металлическую плиту. Полученные стекла были прозрачными и бесцветными, температура их размягчения составляла -530 °С.

Получение стеклокерамики $\text{BaO} - \text{B}_2\text{O}_3/\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$. Смесь $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ с тонко измельченным стеклом $\text{BaO} - \text{B}_2\text{O}_3$ в соотношении 10 мас. % $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ (образец I) и 13 мас. % $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ (образец II) помещали в кварцевую трубку, через которую в течение 15 мин протували аргон. После этого трубку укладывали в трубчатую печь, нагретую до 200 °С. • :- .. - - з течение 15 мин для удаления кристаллизационной воды, затем прогревали еще 30 мин *щж мши uin*/ре 900 °С. Оба образца стеклокерамики извлекали из трубки и быстро охлаждали на воздухе

Методы исследования

Рентгенограммы исследуемых порошков и стеклокерамики з а ш ю ш *ши* ретгеновском дифрактометре Eprugean (Нидерланды) с использованием $\text{Cu}^{K\alpha}$ -излуч. л вфсаопрашения контакта

образцов $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ с парами воды из воздуха их помещали в держатель между двумя полиэтиленовыми пленками, которые на рентгенограмме проявляются рефлексами с максимумами при $26, 21,5^\circ$ и $23,6^\circ$.

Морфологию порошков и размер частиц в них изучали на сканирующем электронном микроскопе LEO-1420 (Германия).

Спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции порошков и стеклокерамики регистрировали на спектрофлуориметрах СДЛ-2 (Россия) и FluoroMax-2 (Япония), исправляли с учетом спектральной чувствительности системы регистрации и распределения спектральной плотности возбуждающего излучения соответственно. Все спектры люминесценции и спектры возбуждения люминесценции записывали при температуре 298 К.

Результаты исследования и их обсуждение

По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис. 1, *a*), порошки $\text{BaCO}_3: \text{Eu}^{3+}$, независимо от концентрации иона-активатора, состоят преимущественно из сферических, близких по размеру агрегатов плотноупакованных тонких палочкообразных частиц длиной $\sim 0,5$ мкм. Средний размер агрегатов составляет 1,8 мкм. Строение агрегатов позволяет предположить, что их формирование протекает по механизму коллоидной агрегации [10-12].

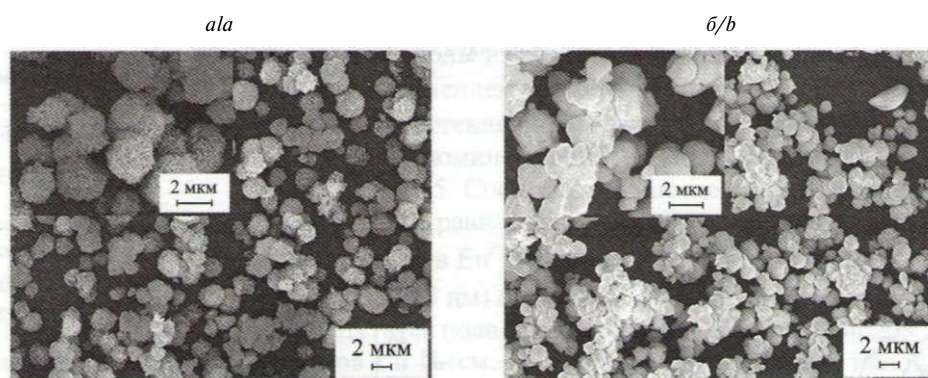


Рис. 1. СЭМ-снимки образцов $\text{BaCO}_3: \text{Eu}^{3+}$ (*a*) и $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ (*б*)
Fig. 1. SEM images of $\text{BaCO}_3: \text{Eu}^{3+}$ (*a*) and $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ (*b*) samples

На основании данных СЭМ, из рис. 1, *б*, видно, что в процессе синтеза формируемые порошки $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ наследуют морфологию порошков прекурсоров. Так, порошки $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ состоят преимущественно из сферических частиц со средним размером 1,4 мкм. Наблюдаемое различие в размерах агрегатов $\text{BaCO}_3: \text{Eu}^{3+}$ и $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ и морфологии их поверхности обусловлено формированием последних.

Рентгенограмма образца $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, выполненная через 24 ч после его получения, приведена на рис. 2. Установлено, что данный образец представляет собой смесь кристаллогидратов иодида бария с преобладанием $\text{BaI}2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [PDF 31-0145]. Рефлексы для $\text{BaI}2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [PDF 39-1300] и BaCO_3 [PDF 45-1471] характеризуются слабой интенсивностью, что указывает на их незначительное содержание. Добавка ионов Eu^{3+} не оказывает существенного влияния на фазовый состав образца.

Получение образца $\text{BaI}2$ в виде кристаллогидрата, вероятно, обусловлено взаимодействием формирующегося иодида с парами H_2O , выделяющимися в процессе синтеза $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$.

Присутствие на рентгенограмме рефлексов для BaCO_3 определяется как неполным взаимодействием прекурсора в процессе синтеза, так и возможной карбонизацией уже образовавшегося иодида выделяющимся в процессе синтеза углекислым газом.

Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции полученных образцов $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$ с различной концентрацией ионов активатора представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, *a*, спектры возбуждения люминесценции образцов $\text{BaI}2: \text{Eu}^{2+}, \text{Eu}^{3+}$, независимо от концентрации иона-активатора, носят сложный характер и обусловлены переходами, характерными как для ионов Eu^{2+} (${}^8S_{7/2} \rightarrow 4f^6 5d$, 320 нм (длина волны перехода λ)), так и для Eu^{3+} (${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_4$, 305 нм; ${}^7F_0 \rightarrow {}^5G_3$, 355 нм; ${}^7F_0 \rightarrow {}^5L_6$, 380 нм; ${}^7F_0 \rightarrow {}^5D_3$, 395 нм). Смещение результирующего максимума полосы возбуждения люминесценции, по-видимому, обусловлено изменением относительных интенсивностей (I) полос возбуждения для ионов Eu^{2+} и Eu^{3+} вследствие изменения их относительных концентраций с увеличением концентрации иона-активатора.

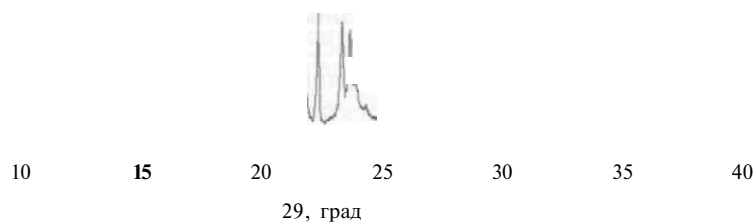


Рис. 2. Рентгенограмма порошка Ba12: Eu²⁺, Eu³⁺.
Не относящиеся к Ba12: Eu²⁺, Eu³⁺ [PDF 31-0145] рефлексы обозначены:
+ - Ba12 · H₂O [PDF 39-1300]; • - BaCO₃ [PDF 45-1471].
Рефлексы при 29, равном 21,5° и 23,6°, относятся к полиэтилену
Fig. 2. X-ray pattern of Ba12: Eu²⁺, Eu³⁺ powders.
Non - Ba12: Eu²⁺, Eu³⁺ [PDF 31-0145] reflexes are designated as:
+ - Ba12 · H₂O [PDF 39-1300], • - BaCO₃ [PDF 45-1471].
Reflexes at 29 equal 21.5° and 23.6°, refer to polyethylene

a/a

b/b

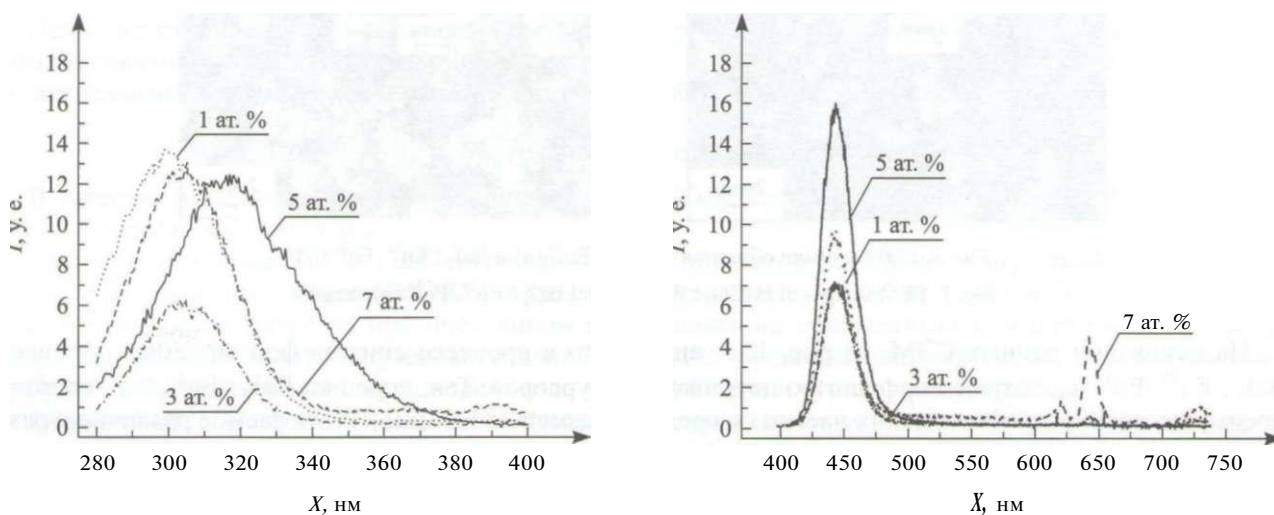


Рис. 3. Спектры возбуждения люминесценции ($\lambda_{\text{вб}} \sim 425$ нм) (а) и спектры люминесценции ($\lambda_{\text{выб}} \sim 316$ нм) (б) образцов Ba12: Eu²⁺, Eu³⁺, полученных при $t = 400$ °C, соотношении компонентов 1:1 и различной концентрации ионов активатора Eu³⁺ (ат. %) по замещенному иону Ba²⁺
Fig. 3. Luminescence excitation spectra ($\lambda_{\text{вб}} \sim 425$ nm) (a) and luminescence ($\lambda_{\text{выб}} \sim 316$ nm) (b) of Ba12: Eu²⁺, Eu³⁺ samples obtained at $t = 400$ °C, component ratio 1:1 and different concentration of the activator ion Eu³⁺ on the substituted Ba²⁺ ion

На спектрах люминесценции порошков Ba12 : Eu²⁺, Eu³⁺ с различной концентрацией ионов Eu³⁺ наблюдается набор полос, характерных для ионов как Eu²⁺, так и Eu³⁺. Интенсивность указанных полос определяется концентрацией иона активатора: с возрастанием концентрации ионов Eu³⁺ от 1 до 5 ат. % сначала наблюдается относительное увеличение интенсивности полосы, характерной для ионов Eu²⁺ ($\lambda_{\text{макс}} = 425$ нм, соответствует переходу 4f- 5d для иона Eu²⁺), которая достигает максимума для образца Ba12 с 5 ат. % ионов Eu³⁺. Дальнейшее увеличение концентрации ионов Eu³⁺ до 7 ат. % приводит к росту интенсивности полос люминесценции при 600; 625; 665 и 710 нм, соответствующих $^5D^0 - ^7F^2$ -, $^5D^0 - ^7F^3$ -, $^5D^0 - ^7F^4$ - излучательным переходам ионов Eu³⁺.

Наличие на спектрах люминесценции полос, характерных для ионов Eu³⁺, по-видимому, обусловлено образованием Eu²⁺ в процессе синтеза Ba12 : Eu³⁺. Причинами образования Eu²⁺ могут быть как разложение Eu³⁺, образующегося в процессе термообработки на Eu²⁺ и I-, так и вхождение ионов Eu³⁺

в кристаллическую структуру $Ba1^2$ на позиции ионов Ba^{2+} [13; 14]. Вероятный механизм такого вхождения, сопровождаемого изменением степени окисления ионов Eu^{3+} , может быть представлен следующим образом:



$$V''_{Ba} = V_{Ba}^X + 2e^{\prime L},$$

$$2Eu^* + 2e^{\prime} \rightarrow 2Eu_{Ba}.$$

В целом эффект перехода Eu^{3+} в Eu^{2+} требует дальнейшего изучения и может представлять интерес для практического использования таких материалов при генерации свечения псевдобелого цвета.

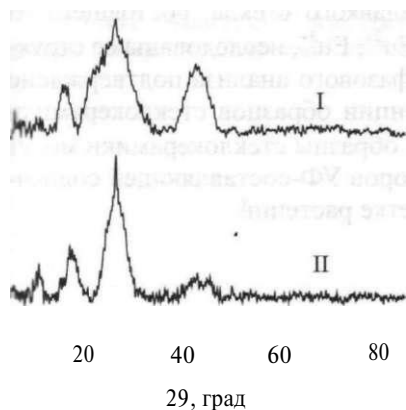


Рис. 4. Рентгенограммы образцов стеклокерамики I и II

Fig. 4. X-ray patterns of glass ceramic samples I and II

Для защиты получаемых порошков $Ba1^2: Eu^{2+}, Eu^{3+}$ от контакта с парами воды из окружающей среды была предпринята попытка получения стеклокерамики $BaO - B2O3/Ba1^2: Eu^{2+}, Eu^{3+}$ на их основе. На рентгенограммах образцов стеклокерамики I и II (рис. 4) наблюдаются уширенные рефлексы, характерные только для кристаллогидратов иодида бария - $Ba1^2 \cdot H2O$ [PDF 39-1300].

Присутствие на рентгенограмме рефлексов, характерных для кристаллогидрата $Ba1^2$, обусловлено процессом гидратации образцов парами воды из воздуха, а большая ширина дифракционных пиков - уменьшением размера частиц $Ba1^2: Eu^{2+}, Eu^{3+}$ вследствие их растворения стеклянной матрицей.

Спектры люминесценции образцов стеклокерамики I и II представлены на рис. 5. Спектры люминесценции регистрировали при длине волны ($\lambda_{возб}$), равной 320; 350 и 390 нм, соответствующим характерным для ионов Eu^{2+} ($8S7/2 \rightarrow 4f^6 5d$, 320 нм) и Eu^{3+} ($7F0 \rightarrow 5G3$, 355 нм; $7F0 \rightarrow 5D4$, 395 нм) переходам. Полоса возбуждения при 390 нм также соответствует полосе высвечивания УФ-светодиодов.

На спектрах люминесценции образцов I и II (см. рис. 5) наблюдается набор полос, соответствующих переходам $5D3 \rightarrow 7F0$ (420 нм) ионов Eu^{2+} и $5D0 \rightarrow 7F$, (580-585 нм), $5D0 \rightarrow 7F2$ (615 нм), $5D0 \rightarrow 7F3$ (650 нм), $5D0 \rightarrow 7F4$ (700 нм) ионов Eu^{3+} . Синий сдвиг полосы люминесценции, характерной для ионов Eu^{2+} , с уменьшением количества $Ba1^2: Eu^{2+}, Eu^{3+}$ в стеклокерамике, по-видимому, обусловлен изменением силы кристаллического поля ионов Eu^{2+} , происходящим в результате перехода ионов Eu^{2+} и Eu^{3+} из $Ba1^2$ в стеклянную матрицу в процессе формирования стеклокерамики.

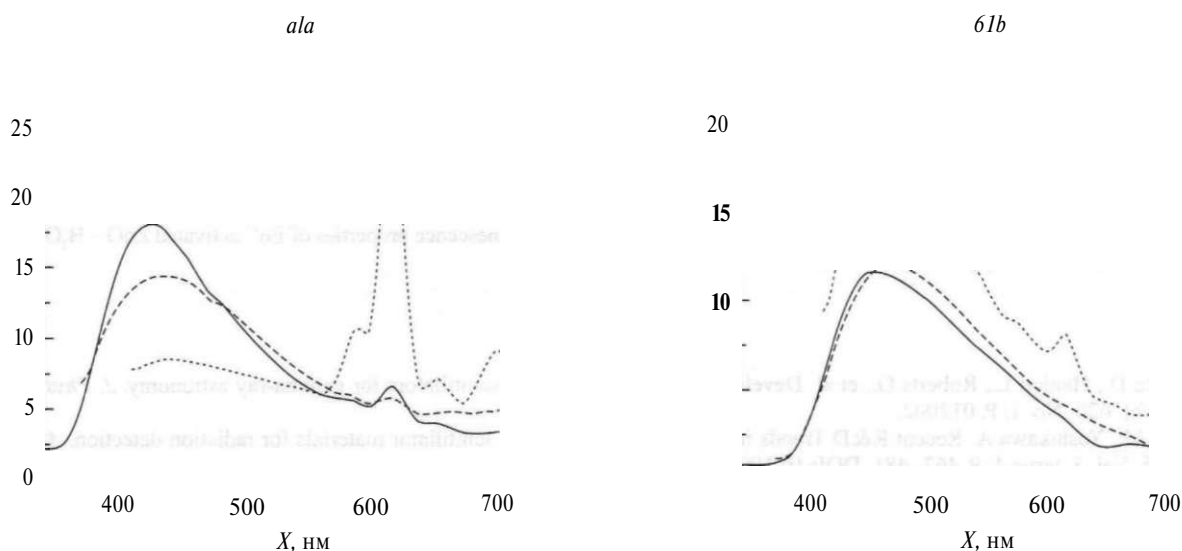


Рис. 5. Спектры люминесценции образцов стеклокерамики I (а) и II (б):
1 - $\lambda_{мзб} = 320$ нм; 2 - $\lambda_{мзб} = 350$ нм; 3 - $\lambda_{мзб} = 390$ нм

Fig. 5. Luminescence spectra of glass ceramic samples I (a) and II (b):
= 320 nm; 2 - $\lambda_{ex} = 350$ nm; 3 - $\lambda_{ex} = 390$ nm

Заключение

Таким образом, при использовании двухстадийного синтеза получены порошки $Ba^{12} : Eu^{2+}, Ei^{3+}$ с различной концентрацией иона-активатора и исследованы их морфологические, структурные и спектрально-люминесцентные свойства. Было установлено, что получаемые порошки представляют собой сферические агрегаты, в состав которых входит $Ba^{12} \cdot 2H_2O$, с незначительным содержанием $Ba^{12} \cdot H_2O$ и $BaCO_3$. На спектрах люминесценции получаемых образцов $Ba^{12} : Eu^{2+}, Ei^{3+}$ наблюдаются полосы, характерные для ионов как Ei^{2+} , так и Ei^{3+} , соотношение между которыми определяется концентрацией иона-активатора, - доля ионов Ei^{3+} возрастает с увеличением концентрации иона-активатора. Максимальная интегральная интенсивность полосы люминесценции, свойственная для ионов Ei^{2+} , достигается при использовании 5 ат. % ионов Ei^{3+} по замещенному иону Ba^{2+} .

На основе синтезированных порошков $Ba^{12} : Eu^{2+}, Ei^{3+}$ и легкоплавкого стекла, состоящего из $31BaO - 69B_2O_3$ (мас. %), получена стеклокерамика $BaO - B_2O_3/Ba^{12} : Eu^{2+}, Ei^{3+}$, исследованы ее структурные и спектрально-люминесцентные свойства. Данными рентгенофазового анализа подтверждено сохранение иодида бария в стеклокерамике. На спектрах люминесценции образцов стеклокерамики присутствуют полосы, характерные для ионов Ei^{2+} и Ei^{3+} . Полученные образцы стеклокерамики могут оказаться перспективными для использования в качестве трансформаторов УФ-составляющей солнечного спектра в синюю и красную области спектра при пассивной досветке растений.

Библиографические ссылки

1. Faoite D., Hanlon L., Roberts O., et al. Development of glass-ceramic scintillators for gamma-ray astronomy // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. Vol. 620, № 1. P. 012002.
2. Nikl M., Yoshikawa A. Recent R&D Trends in inorganic single-crystal scintillator materials for radiation detection // *Adv. Opt. Mater.* 2015. Vol. 3, issue 4. P. 463-481.
3. Moses W. W. Current trends in scintillator detectors and materials // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrom., Detect. Associated Equip.* 2002. Vol. 487, issues 1-2. P. 123-128.
4. Протасова Н. Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // *Физиология растений.* 1987. Т. 34, № 4. С. 812-822.
5. Apparatus for pronoting plant growth with artificial light: пат. 4078169 США, US 05/716,763 / J. D. Armstrong ; заявитель J. D. Armstrong ; заявл. 23.08.1976 ; опубл. 07.03.1978 / Бюро по патентам и товарным знакам США. 1978.
6. Бахарев И., Прокофьев А., Туркин А. и др. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц: реальность и перспективы // *Совр. технологии автоматизации.* 2010. № 2. С. 76-82.
7. Корепанов И. В., Оморова Н. И., Омархан А. Ш. Светодиодный облучатель для теплиц // *Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении : сб. тр. междунар. конф. (Томск, 9-11 июня 2016 г.).* Томск, 2016. С. 372-377.
8. Naichia Y, Chung J.-P. High-brightness LEDs - Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation // *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2009. Vol. 13, issue 8. P. 2175-2180.
9. Третьяк Е. В., Шевченко Г. П., Содомаха Т. А. и др. Влияние морфологии прекурсора на структурные и спектрально-люминесцентные свойства $Ba^{12} : Eu^{2+}, Ei^{3+}$ // *Неорган. материалы.* 2017. Т. 53, № 3. С. 296-301.
10. Antipov A. A., Shchukin D. G., Fedutik Y, et al. Carbonate microparticles for hollow polyelectrolyte capsules fabrication // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2003. Vol. 224, issues 1-3. P. 175-183.
11. Geng X., Liu L., Jiang J., et al. Crystallization of $CaCO_3$ Mesocrystals and complex aggregates in a mixed solvent media using polystyrene sulfonate as a crystal growth modifier // *Cryst. Growth & Des.* 2010. Vol. 10, issue 8. P. 3448-3453.
12. Yu S.-K, Colfen K, Hu A.-W., et al. Complex spherical $BaCO_3$ superstructures self-assembled by a facile mineralization process under control of simple polyelectrolytes // *Cryst. Growth & Des.* 2004. Vol. 4, issue 1. P. 33-37.
13. Luo Q., Qiao X, Fan X., et al. Reduction and luminescence of europium ions in glass ceramics containing SrF_2 nanocrystals // *J. Non-Crystalline Solids.* 2008. Vol. 354, issues 40-41. P. 4691-4694.
14. Lian Z, Wang J., Lv Y, et al. The reduction of Ei^{3+} to Ei^{2+} in air and luminescence properties of Ei^{3+} activated $ZnO - B_2O_3 - P_2O_5$ glasses // *J. Alloys and Compounds.* 2007. Vol. 430, issues 1-2. P. 257-261.

References

1. Faoite D., Hanlon L., Roberts O., et al. Development of glass-ceramic scintillators for gamma-ray astronomy. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. Vol. 620, No. 1. P. 012002.
2. Nikl M., Yoshikawa A. Recent R&D Trends in inorganic single-crystal scintillator materials for radiation detection. *Adv. Opt. Mater.* 2015. Vol. 3, issue 4. P. 463-481. DOI: 10.1002/adom.201400571.
3. Moses W. W. Current trends in scintillator detectors and materials. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A: Accelerators, Spectrom., Detect. Associated Equip.* 2002. Vol. 487, issues 1-2. P. 123-128. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)00955-5.
4. Protasova N. N. [Light culture as a way to identify the potential productivity of plants]. *Fbiol gая.* 1987. Vol. 34, No. 4. P. 812-822 (in Russ.).
5. Apparatus for pronoting plant growth with artificial light : pat. 4078169 US "63. J. D. Armstrong ; declarer J. D. Armstrong ; decl. 23.08.1976 ; publ. 07.03.1978. U. S. Patent and Trademark Office. 197*.
6. Bakharev I., Prokofev A., Tyrkin A., et al. [Application of LED lighting for greenho-si br*rw -si-r. ir.d prospects]. *Sovrem. tekhnol. avtom.* 2010. No. 2. P. 76-82 (in Russ.).

7. Korepanov I. V., Omirova N. I., Omarkhan A. Sh. [LED irradiator for greenhouses]. *Materialy i tekhnologii novykh pokolenii v sovremennom materialovedenii*: sb. tr. mezhdunar. konf. (Tomsk, 9-11 June, 2016). Tomsk, 2016. P. 372-377 (in Russ.).
8. Naichia Y., Chung J.-P. High-brightness LEDs - Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew. Sustainable Energy Rev.* 2009. Vol. 13, issue 8. P. 2175-2180.
9. Tret'yak E. V., Shevchenko G. P., Solomakha T. A., et al. [Effect of precursor morphology on the structural properties, optical absorption and luminescence of $Ba^{12}: Eu^{2+}, Eu^{3+}$]. *Neorg. Materialy [Inorg. Mater.]*. 2017. Vol. 53, No. 3. P. 296-301 (in Russ.).
10. Antipov A. A., Shchukin D. G., Fedutik Y., et al. Carbonate microparticles for hollow polyelectrolyte capsules fabrication. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2003. Vol. 224, issues 1-3. P. 175-183. DOI: 10.1016/S0927-7757(03)00195-X.
11. Geng X., Liu L., Jiang J., et al. Crystallization of $CaCO_3$ Mesocrystals and complex aggregates in a mixed solvent media using polystyrene sulfonate as a crystal growth modifier. *Cryst. Growth & Des.* 2010. Vol. 10, issue 8. P. 3448-3453. DOI: 10.1021/cg100206y.
12. Yu S.-H., Colfen H., Hu A.-W., et al. Complex spherical $BaCO_3$ superstructures self-assembled by a facile mineralization process under control of simple polyelectrolytes. *Cryst. Growth & Des.* 2004. Vol. 4, issue 1. P. 33-37. DOI: 10.1021/cg0340906.
13. Luo Q., Qiao X., Fan X., et al. Reduction and luminescence of europium ions in glass ceramics containing SrF_2 nanocrystals. *J. Non-Crystalline Solids*. 2008. Vol. 354, issues 40-41. P. 4691-4694. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.07.019.
14. Lian Z., Wang J., Lv Y, et al. The reduction of Eu^{3+} to Eu^{2+} in air and luminescence properties of Eu^{2+} activated $ZnO - B_2O_3 - P_2O_5$ glasses. *J. Alloys and Compounds*. 2007. Vol. 430, issues 1-2. P. 257-261. DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.05.002.

Статья поступила в редколлегию 27.03.2017.
Received by editorial board 27.03.2017.