

УДК 666.227.8, 666.11.01

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК НА ОСНОВЕ ИОДИДА БАРИЯ, АКТИВИРОВАННОГО $\text{Eu}^{2+}$

Т. А. СОЛОМАХА<sup>1)</sup>, Е. Е. ТРУСОВА<sup>2)</sup>, Е. В. ТРЕТЬЯК<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ,  
ул. Ленинградская, 14, 220006, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13А, 220006, г. Минск, Беларусь

Предложен оригинальный метод получения стеклокерамик на основе порошка иодида бария, активированного  $\text{Eu}^{2+}$ , исследованы их структурные и спектрально-люминесцентные свойства. По данным рентгенофазового анализа установлено, что стеклокерамики, содержащие  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{BaI}_2$ , формируются при использовании в процессе синтеза 50 мас. % исходного порошка иодида. Подтверждена принципиальная возможность применения стеклокерамик для предупреждения контакта порошка иодида с парами воды.

**Ключевые слова:** люминесценция;  $\text{Eu}^{2+}$ ; стеклокерамика; иодид бария.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность финансовой поддержке Белорусской государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (договор № 1.2.03).

## PREPARATION AND STUDY OF THE LUMINESCENT GLASS-CERAMICS BASED ON BARIUM IODIDE ACTIVATED WITH $\text{Eu}^{2+}$

T. A. SALAMAKHA<sup>a</sup>, E. E. TRUSOVA<sup>b</sup>, Y. U. TRATSIAK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University,  
14 Lieninhradskaia Street, Minsk 220006, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian State Technological University, 13A Sviardlova Street, Minsk 220006, Belarus  
Corresponding author: T. A. Salamakha (solomakha.tanja@gmail.com)

In this paper an original method for obtaining glass-ceramics based on barium iodide powder activated with  $\text{Eu}^{2+}$  is proposed, their structural and spectral-luminescent properties are investigated. X-ray diffraction analysis has evidenced

---

### Образец цитирования:

Соломаха ТА, Трусова ЕЕ, Третьяк ЕВ. Получение и исследование люминесцентных стеклокерамик на основе иодида бария, активированного  $\text{Eu}^{2+}$ . Журнал Белорусского государственного университета. Химия. 2019;1:38–44.  
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2019-1-38-44>

### For citation:

Salamakha TA, Trusova EE, Tratsiak YU. Preparation and study of the luminescent glass-ceramics based on barium iodide activated with  $\text{Eu}^{2+}$ . Journal of the Belarusian State University. Chemistry. 2019;1:38–44. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2019-1-38-44>

---

### Авторы:

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

### Authors:

**Tatsiana A. Salamakha**, junior researcher at the laboratory of nanochemistry.  
[solomakha.tanja@gmail.com](mailto:solomakha.tanja@gmail.com)  
**Ekaterina E. Trusova**, PhD (engineering); researcher at the department of glass and ceramic technology, faculty of chemical technology and engineering.  
[trusovakaterina@mail.ru](mailto:trusovakaterina@mail.ru)  
**Yauhen U. Tratsiak**, PhD (chemistry); senior researcher at the laboratory of nanochemistry.  
[slon.zhenya@gmail.com](mailto:slon.zhenya@gmail.com)

that glass-ceramics containing  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{BaI}_2$  are formed when 50 mas. % of the starting iodide powder is used in the synthesis process. The possibility of using glass-ceramics for preventing the contact of iodide powder with water vapor has been confirmed.

**Key words:** luminescence;  $\text{Eu}^{2+}$ ; glass-ceramics; barium iodide.

**Acknowledgements.** Authors gratefully acknowledge the financial support of the Belarusian State Program of Scientific Research «Photonics, opto- and microelectronics» (contract No. 1.2.03).

## Введение

Светоизлучающие диоды белого цвета свечения (белые светодиоды) являются перспективными источниками света благодаря своей экологичности и меньшему потреблению энергии по сравнению с лампами накаливания и люминесцентными лампами. Также неоспоримые преимущества белых светодиодов – длительный срок службы, высокие светоотдача и яркость, термическая устойчивость, небольшой размер [1; 2]. Для получения белого светодиода могут быть применены два подхода: первый включает в себя комбинацию синего светодиода с люминофором желтого цвета свечения, например  $\text{YAG} : \text{Ce}$ ; второй – использование УФ-чипа с тремя люминофорами красного, зеленого и синего цветов свечения, объединенных в одном корпусе [3; 4]. В качестве люминофора синего цвета свечения могут быть использованы соединения, активированные ионами европия [5]. Длина волны излучения  $\text{Eu}^{2+}$  лежит в диапазоне от фиолетовой до красной области. Люминесценция  $\text{Eu}^{2+}$  обусловлена  $5d - 4f$ -переходом, являющимся чувствительным к кристаллическому окружению [6]. Таким образом, варьируя состав матрицы, можно управлять положением полосы люминесценции  $\text{Eu}^{2+}$ , сдвигая ее в синюю область, что позволяет сделать соединения, активированные ионами европия, перспективными для применения в качестве люминофоров синего цвета свечения в белых светодиодах. Выбор в роли матрицы для  $\text{Eu}^{2+}$  иодида бария ( $\text{BaI}_2$ ) имеет следующие преимущества: низкую стоимость (30 долл./кг), умеренную плотность ( $\sim 5,1 \text{ г/см}^3$ ), термическую устойчивость ( $T_{\text{пл}} = 711^\circ\text{C}$ ), возможность стабилизировать ионы европия в состоянии  $2+$ . К недостаткам можно отнести высокую гигроскопичность, что не позволяет использовать его в форме порошка в качестве конечного продукта. Получение на основе иодида бария, активированного  $\text{Eu}^{2+}$ , стеклокерамических материалов дает возможность нивелировать данный недостаток [7].

В соответствии с вышесказанным целью настоящего исследования являлась разработка метода синтеза стеклокерамики на основе иодида бария, активированного  $\text{Eu}^{2+}$ , изучение ее структурных и спектрально-люминесцентных свойств. Для получения стеклокерамик использован двухстадийный подход, в котором полученные на первой стадии частицы иодида бария вводили в стеклянную матрицу. Реализация такого подхода обусловлена трудностью выращивания частиц иодида бария непосредственно в стеклянной матрице.

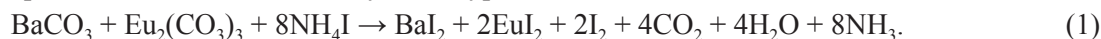
## Материалы и методы

В качестве исходных реагентов использовали  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{I}$ ,  $\text{BaCO}_3$  и  $\text{H}_3\text{BO}_3$ . Чистота всех реактивов была не ниже «ч. д. а.». Порошки  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$  получали с помощью двухстадийного метода, описанного ранее [8]: первая стадия включала в себя синтез  $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$ , из которого получали  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$  на второй стадии.

**Синтез прекурсора.** Порошок  $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$  получали методом обратного осаждения. Необходимое количество 0,1 моль/л раствора  $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$  добавляли к 0,2 моль/л раствору  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ .  $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3$  добавляли из расчета замещения 5 ат. %  $\text{Ba}^{2+}$  на  $\text{Eu}^{3+}$ . Полученную смесь нитратов приливали по каплям к 1,2 моль/л раствору  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  при постоянном перемешивании. Полученный осадок  $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$  отделяли центрифугированием, промывали два раза дистиллированной водой и сушили на воздухе в течение 12 ч при  $80^\circ\text{C}$ .

**Синтез иодида бария.** Смесь порошков  $\text{BaCO}_3 : \text{Eu}^{3+}$  и  $\text{NH}_4\text{I}$ , взятых в стехиометрическом соотношении, измельчали в агатовой ступке и переносили в кварцевую лодочку, которую помещали в кварцевую трубку, и пропускали аргон в течение 10 мин. Затем трубку выдерживали 30 мин в трубчатой печи, предварительно нагретой до  $400^\circ\text{C}$ . После этого образец охлаждали до комнатной температуры. Прогрев и охлаждение проводили в непрерывном токе аргона. Полученный светло-серый порошок помещали в герметичный светонепроницаемый контейнер. Образец обозначали как  $\text{BaI}_2$ .

Суммарный процесс можно описать следующим уравнением:



**Синтез легкоплавкого стекла.** Для получения стеклянной матрицы состава 60 мас. % BaO и 40 мас. %  $B_2O_3$  в качестве исходных реагентов использовали  $BaCO_3$  и  $H_3BO_3$ .  $H_3BO_3$  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 пластину. Полученные стекла были прозрачными и бесцветными.

**Синтез стеклокерамики.** Смесь порошка  $BaI_2$  и тонкоизмельченного стекла  $BaO-B_2O_3$ , взятых в массовом соотношении 0; 5; 10; 25 и 50 мас. %  $BaI_2$ , в кварцевой лодочке помещали в кварцевую трубку, через которую пропускали аргон в течение 10 мин. После этого трубку помещали в трубчатую печь, предварительно нагретую до 200 °С, и выдерживали в течение 15 мин для удаления влаги, затем прогревали еще 15 мин при 900 °С. После синтеза образцы стеклокерамик извлекали из трубки и быстро охлаждали на воздухе. Обозначения образцов в зависимости от содержания порошка  $BaI_2$  (мас. %):

№ образца	$BaI_2$ , мас. %
Образец 1	0
Образец 2	5
Образец 3	10
Образец 4	25
Образец 5	50

Рентгенограммы исследуемых порошков и стеклокерамики записывали на рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean (Нидерланды) с использованием  $CuK_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) в диапазоне 10–70 для  $2\theta$ . Чтобы предотвратить контакт образца иодида бария с парами воды из воздуха, его помещали в держатель между двумя полиэтиленовыми пленками, которые на рентгенограмме проявляются рефлексами с максимумами при  $2\theta$  21,5° и 23,8°. Обработку полученных рентгенограмм с последующим расчетом параметров элементарной ячейки проводили в программах *WinPLOTR-2006* и *DICVOL06* пакета *FullPROF*.

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

### Результаты и их обсуждение

На рентгенограмме образца  $BaI_2$  (рис. 1) наблюдаются как рефлексы, характерные для  $BaI_2$  (PDF № 73–1849), так и слабоинтенсивные – для  $BaI_2 \cdot H_2O$  (PDF № 39–1300). Наличие на рентгенограммах рефлексов для кристаллогидрата может быть обусловлено взаимодействием образца с парами воды, выделяемыми в процессе синтеза (см. (1)), при перемещении его в контейнер. Слабоинтенсивные рефлексы для фазы  $BaI_2 \cdot H_2O$ , по сравнению с фазой  $BaI_2$ , свидетельствуют о незначительном содержании ее в образце.

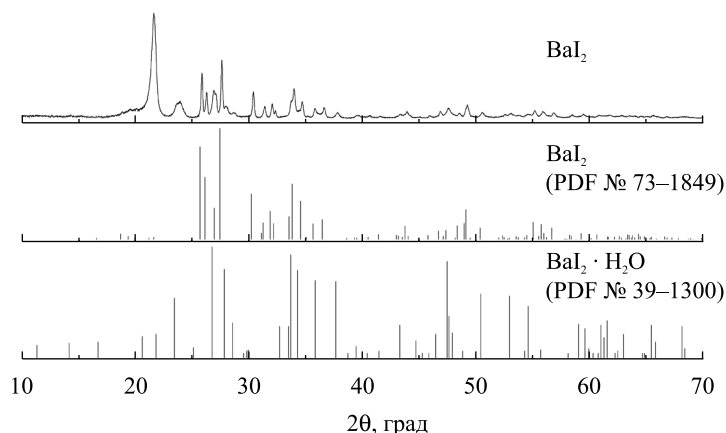


Рис. 1. Рентгенограмма порошка  $BaI_2$ . Уширенные рефлексы с максимумами при 21,5° и 23,8° относятся к полиэтиленовой пленке

Fig. 1. XRD pattern of  $BaI_2$  sample. Broadened reflections with maxima at 21.5° and 23.8° refers to polyethylene film

Расчетные значения параметров элементарной ячейки для  $\text{BaI}_2$  (табл. 1) хорошо согласуются с табличными данными для  $\text{BaI}_2$  (PDF № 73–1849). Ввиду незначительного содержания фазы  $\text{BaI}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  в образце расчет параметров элементарной ячейки для нее не производился.

Таблица 1

Параметры элементарной ячейки  
синтезированного  $\text{BaI}_2$

Table 1

Parameters of the cell unit  
of the synthesized  $\text{BaI}_2$  sample

Пространственная группа	$a$ , Å	$b$ , Å	$c$ , Å
Pmmm	10,685 1 (3)	8,912 8 (2)	5,300 7 (2)

Рентгенограммы образцов стеклокерамики с различным содержанием порошка  $\text{BaI}_2$  представлены на рис. 2, *a*. Образцы 1–4 являются рентгеноаморфными, что, очевидно, связано с растворением частиц иодида бария стеклянной матрицей в процессе синтеза. Для образца 5 (рис. 2, *б*) на рентгенограмме наблюдаются рефлексы, характерные для  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF № 31–0145) и для  $\text{BaI}_2$  (PDF № 73–1849).

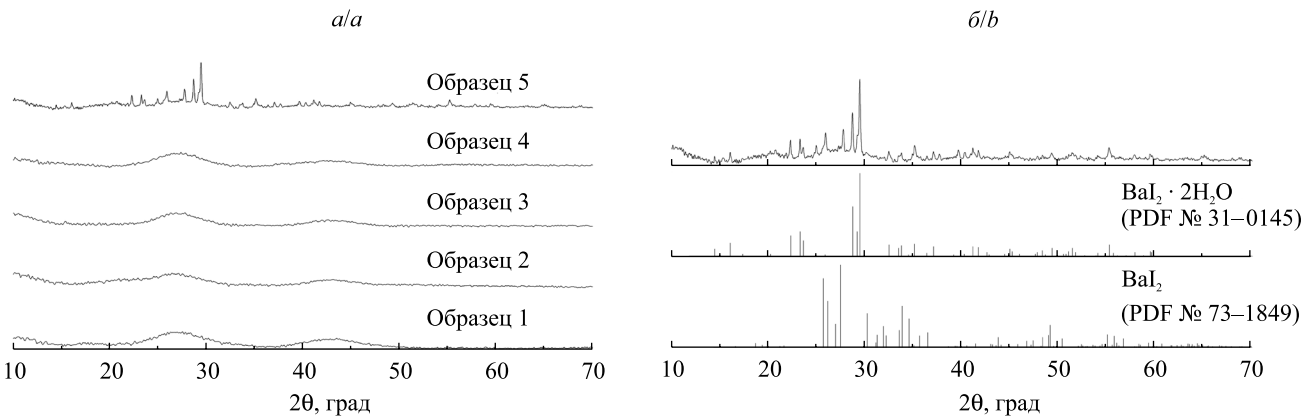


Рис. 2. Рентгенограммы образцов стеклокерамики с различным содержанием порошка  $\text{BaI}_2$  (*a*) и образца стеклокерамики с содержанием порошка  $\text{BaI}_2$  50 мас. % (*б*)

Fig. 2. XRD patterns of glass-ceramic samples with varying content of  $\text{BaI}_2$  powder (*a*). XRD pattern of glass-ceramic sample with content of  $\text{BaI}_2$  powder 50 wt. % (*b*)

Большая интенсивность рефлексов для  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  указывает на доминирование этой фазы в образце. Данный эффект может быть обусловлен увеличением площади поверхности стеклокерамики при ее измельчении для подготовки к рентгенофазовому анализу, что приводит к гидратации частиц иодида бария парами воды из атмосферы. Тем не менее присутствие на рентгенограмме рефлексов, характерных для  $\text{BaI}_2$ , указывает на возможность использования стеклокерамик для предупреждения контакта  $\text{BaI}_2$  с парами воды.

Рассчитанные параметры элементарной ячейки согласуются с табличными данными для  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (PDF № 31–0145) и  $\text{BaI}_2$  (PDF № 73–1849) (табл. 2).

Таблица 2

Параметры элементарных ячеек синтезированного образца стеклокерамики  
с содержанием порошка  $\text{BaI}_2$  50 мас. %

Table 2

Parameters of the cell units of the synthesized glass-ceramic sample  
with content of  $\text{BaI}_2$  powder 50 wt. %

Соединение	Пространственная группа	$a$ , Å	$b$ , Å	$c$ , Å	$\alpha$ , град	$\beta$ , град	$\gamma$ , град
$\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	P2/m	11,129 6 (176)	7,615 1 (4)	8,643 4 (4)	90,000 0	112,412 0 (97)	90,000 0
$\text{BaI}_2$	Pmmm	10,711 0 (5)	8,906 6 (6)	5,303 0 (3)	90,000 0	90,000 0	90,000 0

Как видно из табл. 2, значение параметров ячейки для  $\text{BaI}_2$  отличается от таковых в порошке, что, вероятнее всего, связано со взаимодействием  $\text{BaI}_2$  со стеклянной матрицей. Это может проявляться как диффузией  $\text{Ba}^{2+}$  в (из) структуры  $\text{BaI}_2$ , так и диффузией  $\Gamma$  в стеклянную матрицу.

СЛ и СВЛ полученного образца  $\text{BaI}_2$  представлены на рис. 3. Уширенная полоса СВЛ от 255 до 400 нм обусловлена переходом  $\text{Eu}^{2+} 4f \rightarrow 5d$  [6].

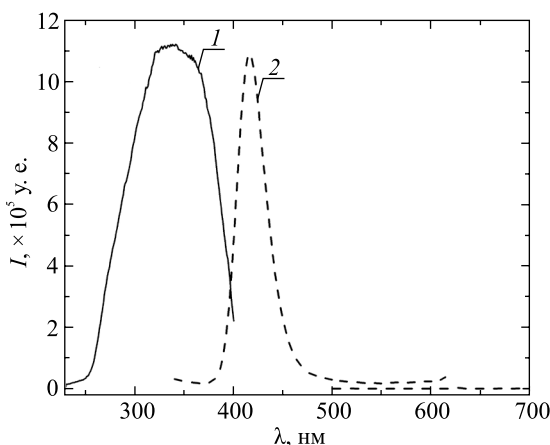


Рис. 3. СВЛ ( $\lambda_{\text{изл}} = 415$  нм) (1)  
и СЛ ( $\lambda_{\text{возб}} = 320$  нм (2) и  $\lambda_{\text{возб}} = 393$  нм (3)) порошка  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$   
Fig. 3. PLE ( $\lambda_{\text{em}} = 415$  nm) (1)  
and PL spectra ( $\lambda_{\text{ex}} = 320$  nm (2) and  $\lambda_{\text{ex}} = 393$  nm (3)) for the  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$  powder

Как видно из рис. 3, СЛ порошка  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$  представляет собой симметричную узкую полосу с максимумом при 415 нм. Данная полоса соответствует люминесценции  $\text{Eu}^{2+}$  в  $\text{BaI}_2$ , который представляет собой доминирующую фазу в образце. Также на СК присутствует слабоинтенсивная полоса, характерная для  $\text{Eu}^{3+}$ , с максимумом при 625 нм, что свидетельствует о наличии незначительного количества  $\text{Eu}^{3+}$  в образце иодида бария [9; 10].

СВЛ образцов стеклокерамик (рис. 4, а) состоят из нескольких полос с максимумами при 320; 350; 370 и 393 нм, что указывает на распределение  $\text{Eu}^{2+}$  по нескольким излучающим центрам [6].

СЛ образцов стеклокерамик (рис. 4, б) носят сложный характер и состоят из неразрешенных при комнатной температуре полос с максимумами при 415; 460; 485 и 515 нм.

Известно, что положение полосы люминесценции  $\text{Eu}^{2+}$  зависит от его кристаллического окружения [11]. Так, полоса с максимумом при 415 нм является характерной для  $\text{Eu}^{2+}$  в структуре  $\text{BaI}_2$ , что под-

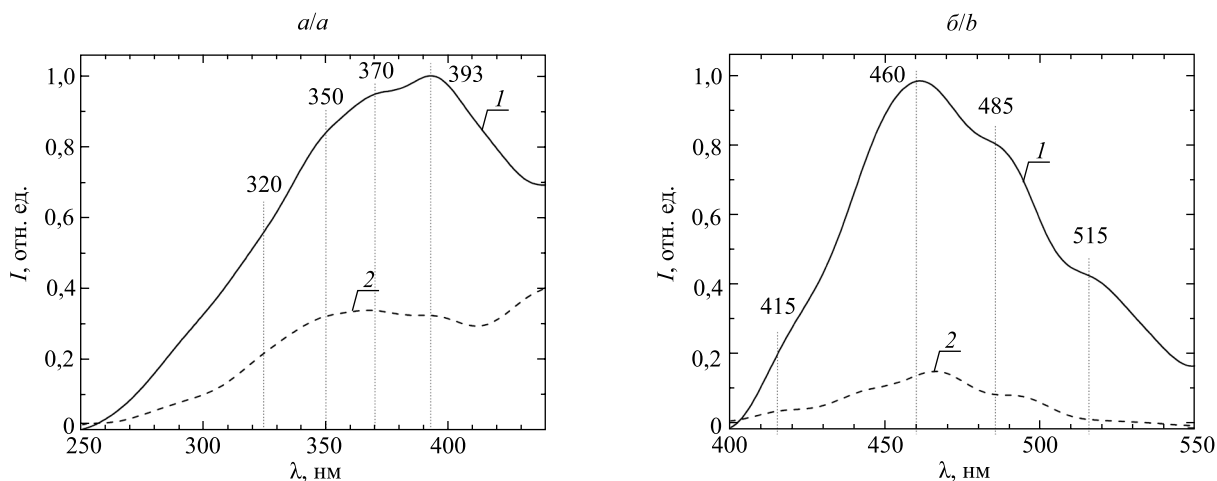


Рис. 4. СВЛ ( $\lambda_{\text{изл}} = 465$  нм) (а) и СЛ ( $\lambda_{\text{возб}} = 360$  нм) (б) образцов стеклокерамики  
с содержанием порошка  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$  50 мас. % (1) и 25 мас. % (2)  
Fig. 4. PLE ( $\lambda_{\text{em}} = 465$  nm) (a) and PL spectra ( $\lambda_{\text{ex}} = 360$  nm) (b) for the samples of glass-ceramic  
with content of  $\text{BaI}_2 : \text{Eu}^{2+}$  powder 50 wt. % (1) and 25 wt. % (2)



тверждается СЛ образца  $\text{BaI}_2$  (см. рис. 3). Полосы люминесценции с максимумами при 485 и 515 нм, вероятнее всего, связаны с люминесценцией  $\text{Eu}^{2+}$  в структуре  $\text{EuI}_2$ , формирующегося в процессе синтеза [12]. Отсутствие на рентгенограммах рефлексов, характерных для  $\text{EuI}_2$  (см. рис. 1 и 2), может быть следствием его малого содержания в образце. Возможная причина увеличения интенсивности полосы с максимумом при 485 нм – кислородные центры, образующиеся в результате гидролиза образцов как собственной кристаллизационной водой, так и водой, выделяющейся в процессе синтеза (1) [8; 13; 14]. Таким образом, полосу люминесценции с максимумом при 460 нм как наиболее интенсивную можно отнести к люминесценции  $\text{Eu}^{2+}$  в структуре  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

### Заключение

В работе предложен метод формирования стеклокерамик на основе порошка  $\text{BaI}_2$ . Исследованы их структурные и СЛ-свойства. Рентгенофазовый анализ подтвердил присутствие в образце стеклокерамики соединений  $\text{BaI}_2$  и  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Большая интенсивность рефлексов для  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  указывает на доминирование этой фазы в образце. В то же время сохранение рефлексов для  $\text{BaI}_2$  свидетельствует о возможности использования стеклокерамик для предупреждения контакта порошка иодида бария, активированного  $\text{Eu}^{2+}$ , с парами воды. СЛ образцов стеклокерамики носят сложный характер и представлены набором полос с максимумами при 415; 460; 485 и 515 нм, которые связаны с переходами, соответствующими люминесценции  $\text{Eu}^{2+}$  в структуре  $\text{BaI}_2$ , структуре  $\text{BaI}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и структуре  $\text{EuI}_2$ , и наличием кислородных центров.

### Библиографические ссылки

1. Oh JH, Eo YJ, Yoon HC, Huh YD, Do YR. Evaluation of new color metrics: Guidelines for developing narrow-band red phosphors for WLEDs. *Journal of Materials Chemistry C*. 2016;4(36):8326–8348. DOI: 10.1039/c6tc02387h.
2. Sun CC, Chang YY, Yang TH, Chung T-Y, Chen C-C, Lee T-X. Packaging efficiency in phosphor-converted white LEDs and its impact to the limit of luminous efficacy. *Journal of Solid State Lighting*. 2014;1(1):19. DOI: 10.1186/s40539-014-0019-0.
3. Li G, Tian Y, Zhao Y, Lin J. Recent progress in luminescence tuning of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{2+}$ -activated phosphors for pc-WLEDs. *Chemical Society Reviews*. 2015;44(23):8688–8713. DOI: 10.1039/c4cs00446a.
4. Peng Y, Guo X, Li R, et al. Thermally stable WLEDs with excellent luminous properties by screen-printing a patterned phosphor glass layer on a microstructured glass plate. *Applied Optics*. 2017;56(12):3270–3276. DOI: 10.1364/AO.56.003270.
5. Wu ZC, Liu J, Hou WG, Xu J. A new single-host white-light-emitting  $\text{BaSrMg}(\text{PO}_4)_2$ :  $\text{Eu}^{2+}$  phosphor for white-light-emitting diodes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;498(2):139–142. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.03.136.
6. Biswas K, Sontakke AD, Sen R, Annapurna K. Luminescence properties of dual valence Eu doped nano-crystalline  $\text{BaF}_2$  embedded glass-ceramics and observation of  $\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Eu}^{3+}$  energy transfer. *Journal of Fluorescence*. 2012;22(2):745–752. DOI: 10.1007/s10895-011-1010-4.
7. Greskovich C, Duclos S. Ceramic Scintillators. *Annual Review of Materials Science*. 1997;27(1):69–88. DOI: 10.1146/annurev.matsci.27.1.69.
8. Salamakha T, Buryi M, Tratsiak Y. Effect of Eu-doping on optical, structural and morphological properties of  $\text{BaI}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  powders. *Optical Materials*. 2018;78:352–359. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.02.044.
9. Tret'yak EV, Shevchenko GP, Solomakha TA, Korzhik MV. Effect of precursor morphology on the structural properties, optical absorption, and luminescence of  $\text{BaI}_2$ :  $\text{Eu}^{2+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ . *Inorganic Materials*. 2017;53(3):307–312. DOI: 10.1134/S0020168517030116.
10. Luo Q, Qiao X, Fan X, Liu S. Reduction and luminescence of europium ions in glass ceramics containing  $\text{SrF}_2$  nanocrystals. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008;354(40–41):4691–4694. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.07.019.
11. Danilkin MI, Belousov AP, Klimonskii SO, Kuznetsov VD, Lust AL, Nikiforov VN, et al. Formation of  $\text{Eu}^{2+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$  centers in synthesis of  $\text{CaF}_2$ : Eu luminophores. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2007;74(6):858–865. DOI: 10.1007/s10812-007-0133-5.
12. Wang L, Wang S, Zhao X, Sun J. Stability, structure and fluorescence spectra of high-pressure-treated  $\text{Eu}^{2+}$  iodides. *Journal of Alloys and Compounds*. 1995;225(1–2):174–177. DOI: 10.1016/0925-8388(94)07029-6.
13. Pankratov V, Popov AI, Shirman L, Kotlov A, Bizarri GA, Burger A, et al. Luminescence and ultraviolet excitation spectroscopy of  $\text{SrI}_2$  and  $\text{SrI}_2$ :  $\text{Eu}^{2+}$ . *Radiation Measurements*. 2013;56:13–17. DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.02.022.
14. Vistovskyy VV, Zhyshkovych AV, Chornodolskyy YM, Myagkota OS, Gloskovskii A, Gektin AV, et al. Self-trapped exciton and core-valence luminescence in  $\text{BaF}_2$  nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(19):1943061–1943067. DOI: 10.1063/1.4831953.

### References

1. Oh JH, Eo YJ, Yoon HC, Huh YD, Do YR. Evaluation of new color metrics: Guidelines for developing narrow-band red phosphors for WLEDs. *Journal of Materials Chemistry C*. 2016;4(36):8326–8348. DOI: 10.1039/c6tc02387h.
2. Sun CC, Chang YY, Yang TH, Chung T-Y, Chen C-C, Lee T-X. Packaging efficiency in phosphor-converted white LEDs and its impact to the limit of luminous efficacy. *Journal of Solid State Lighting*. 2014;1(1):19. DOI: 10.1186/s40539-014-0019-0.
3. Li G, Tian Y, Zhao Y, Lin J. Recent progress in luminescence tuning of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{Eu}^{2+}$ -activated phosphors for pc-WLEDs. *Chemical Society Reviews*. 2015;44(23):8688–8713. DOI: 10.1039/c4cs00446a.

4. Peng Y, Guo X, Li R, et al. Thermally stable WLEDs with excellent luminous properties by screen-printing a patterned phosphor glass layer on a microstructured glass plate. *Applied Optics*. 2017;56(12):3270–3276. DOI: 10.1364/AO.56.003270.
5. Wu ZC, Liu J, Hou WG, Xu J. A new single-host white-light-emitting BaSrMg(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> : Eu<sup>2+</sup> phosphor for white-light-emitting diodes. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010;498(2):139–142. DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.03.136.
6. Biswas K, Sontakke AD, Sen R, Annapurna K. Luminescence properties of dual valence Eu doped nano-crystalline BaF<sub>2</sub> embedded glass-ceramics and observation of Eu<sup>2+</sup> → Eu<sup>3+</sup> energy transfer. *Journal of Fluorescence*. 2012;22(2):745–752. DOI: 10.1007/s10895-011-1010-4.
7. Greskovich C, Duclos S. Ceramic Scintillators. *Annual Review of Materials Science*. 1997;27(1):69–88. DOI: 10.1146/annurev.matsci.27.1.69.
8. Salamakha T, Buryi M, Tratsiak Y. Effect of Eu-doping on optical, structural and morphological properties of BaI<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O powders. *Optical Materials*. 2018;78:352–359. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.02.044.
9. Tret'yak EV, Shevchenko GP, Solomakha TA, Korzhik MV. Effect of precursor morphology on the structural properties, optical absorption, and luminescence of BaI<sub>2</sub> : Eu<sup>2+</sup>, Eu<sup>3+</sup>. *Inorganic Materials*. 2017;53(3):307–312. DOI: 10.1134/S0020168517030116.
10. Luo Q, Qiao X, Fan X, Liu S. Reduction and luminescence of europium ions in glass ceramics containing SrF<sub>2</sub> nanocrystals. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008;354(40–41):4691–4694. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.07.019.
11. Danilkin MI, Belousov AP, Klimonskii SO, Kuznetsov VD, Lust AL, Nikiforov VN, et al. Formation of Eu<sup>2+</sup> and Eu<sup>3+</sup> centers in synthesis of CaF<sub>2</sub> : Eu luminophores. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2007;74(6):858–865. DOI: 10.1007/s10812-007-0133-5.
12. Wang L, Wang S, Zhao X, Sun J. Stability, structure and fluorescence spectra of high-pressure-treated Eu<sup>2+</sup> iodides. *Journal of Alloys and Compounds*. 1995;225(1–2):174–177. DOI: 10.1016/0925-8388(94)07029-6.
13. Pankratov V, Popov AI, Shirmane L, Kotlov A, Bizarri GA, Burger A, et al. Luminescence and ultraviolet excitation spectroscopy of SrI<sub>2</sub> and SrI<sub>2</sub> : Eu<sup>2+</sup>. *Radiation Measurements*. 2013;56:13–17. DOI: 10.1016/j.radmeas.2013.02.022.
14. Vistovskyy VV, Zhyshkovych AV, Chornodolskyy YM, Myagkota OS, Gloskovskii A, Gektin AV, et al. Self-trapped excitation and core-valence luminescence in BaF<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(19):1943061–1943067. DOI: 10.1063/1.4831953.

Статья поступила в редколлегию 11.01.2019.  
Received by editorial board 11.01.2019.