

УДК 621.762.244:678.046.82

## СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОКРИСТАЛЛОВ $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СООСАЖДЕНИЯ

Г. П. ШЕВЧЕНКО<sup>1)</sup>, Ю. В. БОКШИЦ<sup>1)</sup>, И. Ю. ИВЛИЕВА<sup>1)</sup>,  
Г. Е. МАЛАШКЕВИЧ<sup>2)</sup>, С. Е. КИЧАНОВ<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,  
пр. Независимости, 68-2, 220072, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup> Объединенный институт ядерных исследований,  
ул. Жолио-Кюри, 6, 141980, г. Дубна, Московская обл., Россия

Синтезированы микрокристаллы  $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$  с использованием коллоидно-химического подхода к их синтезу. Установлен эффект сенсibilизации люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  ионами  $Ce^{3+}$ , обусловленный переносом энергии электронного возбуждения  $5d$ -уровней ионов  $Ce^{3+}$  на  $^7F_j$ -уровни  $Tb^{3+}$ . Эффективность такой сенсibilизации составляет около 50 %. Увеличение концентрации  $Tb^{3+}$  в два раза (с 5 до 10 ат. %) при неизменной концентрации  $Ce^{3+}$  (1 ат. %) сопровождается приблизительно 10 % возрастанием эффективности сенсibilизированной люминесценции  $Tb^{3+}$ .

**Ключевые слова:** соосаждение; алюмобораты иттрия; люминесценция; сенсibilизация.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № X17Д-012).

### Образец цитирования:

Шевченко Г. П., Бокшиц Ю. В., Ивлиева И. Ю., Малашкевич Г. Е., Кичанов С. Е. Спектрально-люминесцентные свойства микрокристаллов  $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$ , полученных методом соосаждения // Журн. Белорус. гос. ун-та. Химия. 2018. № 1. С. 61–66.

### For citation:

Shevchenko G. P., Bokshyts Y. V., Ivlieva I. Y., Malashkevich G. E., Kichanov S. E. The spectral-luminescent properties of microcrystalline  $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$ , obtaining by coprecipitation method. *J. Belarus. State Univ. Chem.* 2018. No. 1. P. 61–66 (in Russ.).

### Авторы:

**Гвидона Петровна Шевченко** – кандидат химических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории нанохимии.

**Юлия Валентиновна Бокшиц** – кандидат химических наук; научный сотрудник лаборатории нанохимии.

**Ирина Юрьевна Ивлиева** – младший научный сотрудник лаборатории нанохимии.

**Георгий Ефимович Малашкевич** – доктор физико-математических наук; заведующий лабораторией фотофизики активированных материалов.

**Сергей Евгеньевич Кичанов** – кандидат технических наук; старший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики.

### Authors:

**Gvidona P. Shevchenko**, PhD (chemistry), docent; leading researcher at the laboratory of nanochemistry.

*gvidonashvchenko@gmail.com*

**Yuliya V. Bokshyts**, PhD (chemistry); researcher at the laboratory of nanochemistry.

*gvidonashvchenko@gmail.com*

**Irina Y. Ivlieva**, junior researcher at the laboratory of nanochemistry.

*gvidonashvchenko@gmail.com*

**Georgii E. Malashkevich**, doctor of science (physics and mathematics); head of the laboratory of photophysics of activated materials.

*g.malashkevich@ifanbel.bas-net.by*

**Sergey E. Kichanov**, PhD (engineering); senior researcher at the laboratory of neutron physics.

*ekich@nf.jinr.ru*

## THE SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF MICROCRYSTALLINE $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$ , OBTAINING BY COPRECIPITATION METHOD

G. P. SHEVCHENKO<sup>a</sup>, Y. V. BOKSHYTS<sup>a</sup>, I. Y. IVLIEVA<sup>a</sup>, G. E. MALASHKEVICH<sup>b</sup>, S. E. KICHANOV<sup>c</sup>

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

<sup>b</sup>*Institute of Physics named after B. I. Stepanov, National Academy of Sciences of Belarus,  
68-2 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220072, Belarus*

<sup>c</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie Street, Dubna 141980, Moscow Region, Russia*

*Corresponding author: G. P. Shevchenko (gvidonashevchenko@gmail.com)*

$YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$  microcrystals were synthesized via using colloid-chemical approach. The effect of sensitizing of  $Tb^{3+}$  ion luminescence by  $Ce^{3+}$  ions, caused by electronic excitation energy transfer of  $Ce^{3+}$  ions from  $5d$  levels to  $^7F_j$  levels of  $Tb^{3+}$ , was established. The efficiency of such sensitization is about 50 %. With the concentration of  $Ce^{3+}$  being the same (1 at. %), doubling the  $Tb^{3+}$  concentration (from 5 to 10 at. %) will cause 10 % increase of sensitized luminescence efficiency of  $Tb^{3+}$ .

**Key words:** coprecipitation; yttrium aluminium borate; luminescence; sensitization.

**Acknowledgements.** The work has been supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant No. X17Д-012).

### Введение

Бораты общей формулы  $RM_3(BO_3)_4$ , где R – редкоземельные ионы или иттрий, а M (Al, Fe, Ga, Cr) – кристаллы со структурой хантита, обладают ярко выраженными люминесцентными и нелинейно-оптическими свойствами и характеризуются высокой термической, химической и механической устойчивостью [1–3]. Кроме того, они демонстрируют аномально низкое концентрационное тушение люминесценции редкоземельных элементов (РЗЭ), обусловленное межйонным переносом возбуждений, из-за рекордно большого расстояния между ближайшими ионами Ln–Ln, равного 0,59 нм [4]. Это связано со структурой хантита, в которой полиэдры  $[RO_6]$  разделены полиэдрами  $[BO_3]$ . Среди боратов наиболее перспективным является алюмоборат иттрия ( $YAl_3(BO_3)_4$ , YAB), который характеризуется оптической прозрачностью в широком диапазоне длин волн – от 200 до 7000 нм [5; 6]. Замещая полностью или частично ион  $Y^{3+}$  ионами РЗЭ, можно получать люминесцирующие материалы с требуемыми параметрами. Так, YAB :  $Sm^{3+}, Eu^{3+}, Tb^{3+}, Dy^{3+}$  могут использоваться для получения твердотельных лазеров, излучающих в видимой области, YAB :  $Nd^{3+}, Er^{3+}$  – твердотельных лазеров, излучающих в ближней инфракрасной области, YAB :  $Ce^{3+}, Tb^{3+}$  – высокоэффективных УФ-визуализаторов, востребованность которых в биологических и медицинских исследованиях постоянно растет [7–11].

Цель настоящей работы – исследование фазового состава, морфологии и люминесценции серии микрокристаллических образцов YAB, активированных ионами  $Ce^{3+}, Tb^{3+}$  и полученных методом соосаждения, который обеспечивает высокое гомогенное распределение ионов-активаторов в решетке хозяина.

### Методика эксперимента

Образцы алюмобората иттрия, активированного церием и тербием, получали по ранее запатентованной методике [12] путем соосаждения гидроксидов из водных растворов соответствующих солей в присутствии борной кислоты. Для совместного осаждения использовали растворы нитратов иттрия и алюминия в концентрации 1 моль/л, полученные путем растворения их оксидов в воде в присутствии  $HNO_3$ , растворы аммиака ( $\rho = 0,982$  г/см<sup>3</sup>) и борной кислоты в концентрации 1 моль/л. В качестве солей-активаторов применяли нитраты тербия и церия, которые добавляли к смеси растворов нитратов иттрия и алюминия из расчета 5 ат. % Tb, а также 1 ат. % Ce и 5 или 10 ат. % Tb по замещаемому иону  $Y^{3+}$ . В эксперименте использовались реактивы марки «х. ч.». Исходные реагенты в виде растворов азотнокислых солей иттрия и алюминия смешивали в соответствии со стехиометрией  $Y_2O_3 : 3Al_2O_3$ , добавляли нитраты тербия и церия и 10 % избыток  $H_3BO_3$  (по сравнению со стехиометрическим количеством). Осаждение проводили при перемешивании, медленно прикапывая полученный раствор исходных реагентов к раствору аммиака до pH 7,5–8,0. Полученные суспензии совместно осажденных гидроксидов оставляли на сутки, затем отделяли осадки путем центрифугирования, промывали спиртом и высушивали на воздухе при температуре 60–80 °С. Образующиеся ксерогели термообработывали

на воздухе 2 ч при температуре 600 °С для удаления из ксерогелей структурно связанной воды и кислотных остатков и 2 ч при температуре 1150 °С для формирования алюмобората иттрия.

Для серии полученных образцов проведены структурные исследования в Объединенном институте ядерных исследований на дифрактометре EmuScan PANalytical с интенсивным потоком рентгеновского излучения ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение). Морфологию и размер частиц определяли методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборах LEO-1420. Спектры люминесценции (СЛ) и спектры возбуждения люминесценции (СВЛ) записывались при температуре 298 К на спектрофлуориметре СДЛ-1.

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены рентгенограммы полученных образцов, кристаллическая структура которых соответствует  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  (JCPDS-2002, PDF72-1978). Пики четкие и узкие, что свидетельствует о хорошей закристаллизованности образцов. Ионы  $\text{Ce}^{3+}$  и  $\text{Tb}^{3+}$  замещают  $\text{Y}^{3+}$ . Вследствие малого различия в ионных радиусах их влияние на положение дифракционных рефлексов незначительно. Однако для образцов с тербием характерно небольшое смещение дифракционных пиков в сторону больших углов, что может указывать на замещение ионов иттрия церием и тербием (№ 1, 3, 4) в решетке  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  с эффектом ее сжатия, более выраженным для содержания 5 % Tb, поскольку ионный радиус  $\text{Tb}^{3+}$  заметно меньше, чем  $\text{Ce}^{3+}$ :  $\text{Ce}^{3+} - 0,114$  нм,  $\text{Tb}^{3+} - 0,092$  нм (координационное число – 6). Для образца № 2 с максимальным содержанием тербия (10 % Tb, 1 % Ce) отмеченное смещение пиков отсутствует, и можно предполагать формирование других фаз с тербием с менее значительным включением в кристаллическую решетку  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , что требует дополнительного исследования.

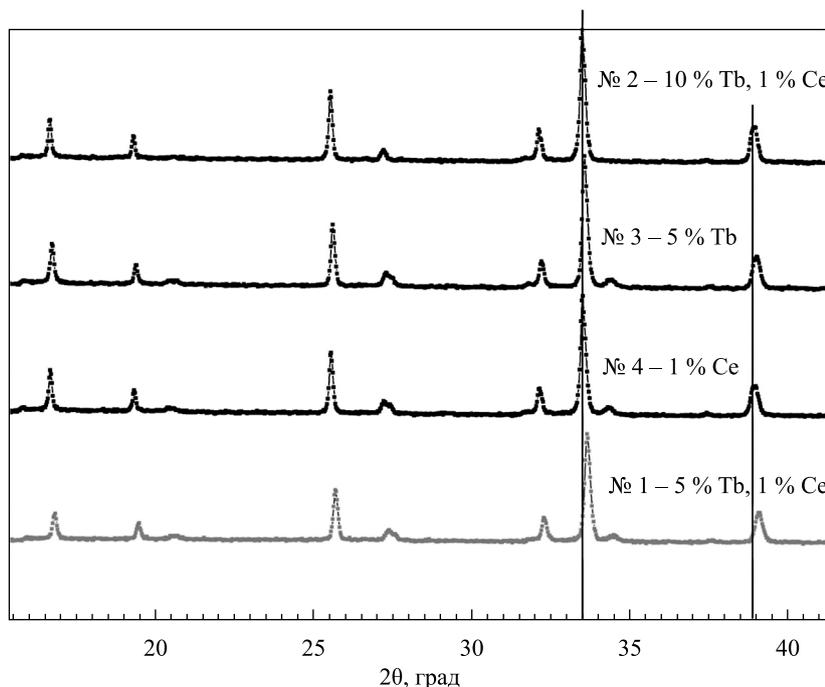


Рис. 1. Рентгенограммы образцов  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , одноактивированных и соактивированных Ce и Tb ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение)

Fig. 1. XRD patterns for  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  samples, activated and co-activated by Ce and Tb ( $\text{CuK}_\alpha$ -radiation)

Образцы  $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , активированные Ce и Tb, по данным СЭМ (рис. 2), состоят из частиц размером от 0,2 до 2,0 мкм. Средний размер частиц образца YAB, содержащего 1 % Ce и 5 % Tb, составляет около 0,5 мкм, а образца YAB, содержащего 1 % Ce и 10 % Tb, – около 1,0 мкм. Частицы имеют как многоугольную форму с числом граней от четырех до шести, так и палочкообразную форму. Размер палочкообразных частиц колеблется от 0,2 до 1,0 мкм, размер наиболее часто встречающихся достигает 0,3 мкм.

Спектры люминесценции ионов  $\text{Tb}^{3+}$  в Tb- и Tb + Ce-активированных образцах YAB при  $\lambda_{\text{возб}} = 310$  нм, близкой к максимальной интенсивности полосы возбуждения иона  $\text{Ce}^{3+}$ , представленные на рис. 3, а, в основном обусловлены люминесценцией ионов  $\text{Tb}^{3+}$  в исследуемой области спектра при длинах волн

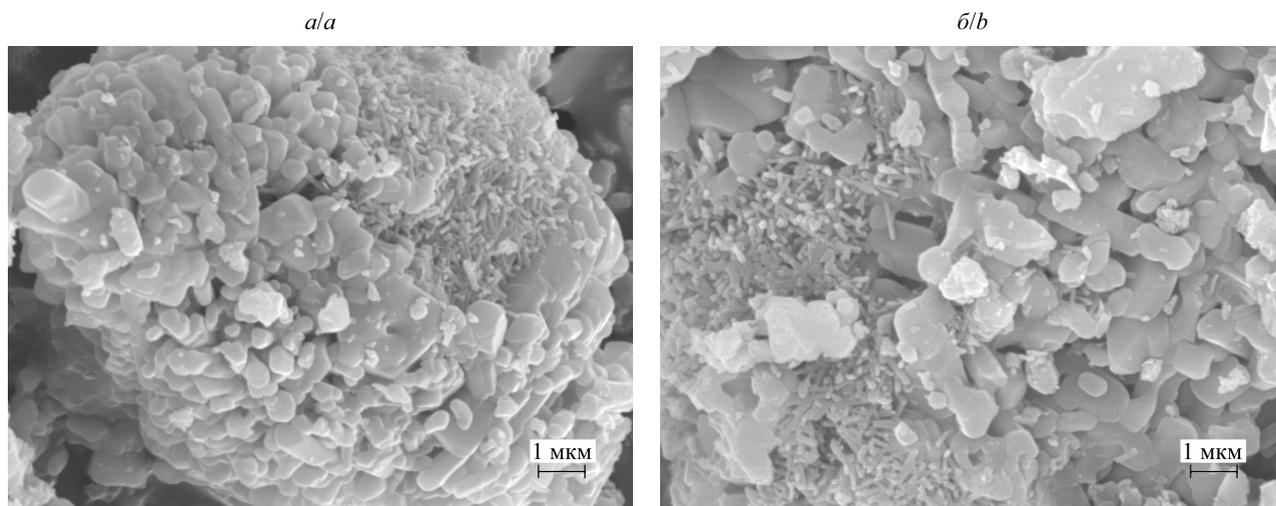


Рис. 2. СЭМ образцов  $YAl_3(BO_3)_4$ , активированных: *a* – 1 % Ce + 5 % Tb; *b* – 1 % Ce + 10 % Tb

Fig. 2. SEM for  $YAl_3(BO_3)_4$  samples, activated: *a* – 1 % Ce + 5 % Tb; *b* – 1 % Ce + 10 % Tb

350–700 нм за счет  $f-f$ -переходов с возбужденного уровня  $^5D_4$  на уровни  $^7F_j$  (рис. 4). Наиболее интенсивная полоса люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  с максимумами при 545 и 550 нм вызывается переходом  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ . Расщепление эмиссионных линий серии переходов  $^5D_4 \rightarrow ^7F_j$ , которое наблюдается как в случае образцов, активированных только ионами  $Tb^{3+}$ , так и в случае Tb + Ce-соактивированных, может быть обусловлено разными кристаллографическими позициями тербия при замещении ионов иттрия. Как видно из рис. 3, *a* (кривые 2 и 3), спектры люминесценции практически не зависят от концентрации ионов  $Tb^{3+}$ , что, по-видимому, является следствием достаточно большого минимального расстояния (Ln–Ln) в YAB и заглубленного положения состояния  $^5D_4$ . Люминесценция ионов  $Ce^{3+}$  в соактивированных образцах проявляется в виде малоинтенсивной полосы, расщепленной на две компоненты ( $\lambda_{\text{макс}} = 350$  нм и  $\lambda_{\text{макс}} = 370$  нм), которые соответствуют переходам из метастабильного состояния смешанной  $4f^05d^1$ -конфигурации в состояния  $^2F_{5/2}$  и  $^2F_{7/2}$  основного терма. В Tb + Ce-соактивированных образцах при длине волны возбуждения  $\lambda_{\text{возб}} = 310$  нм интенсивность люминесценции  $Tb^{3+}$  примерно на два порядка выше, чем в образце, активированном только  $Tb^{3+}$ , что свидетельствует о значительном эффекте сенсibilизации люминесценции ионов  $Tb^{3+}$  ионами  $Ce^{3+}$ .

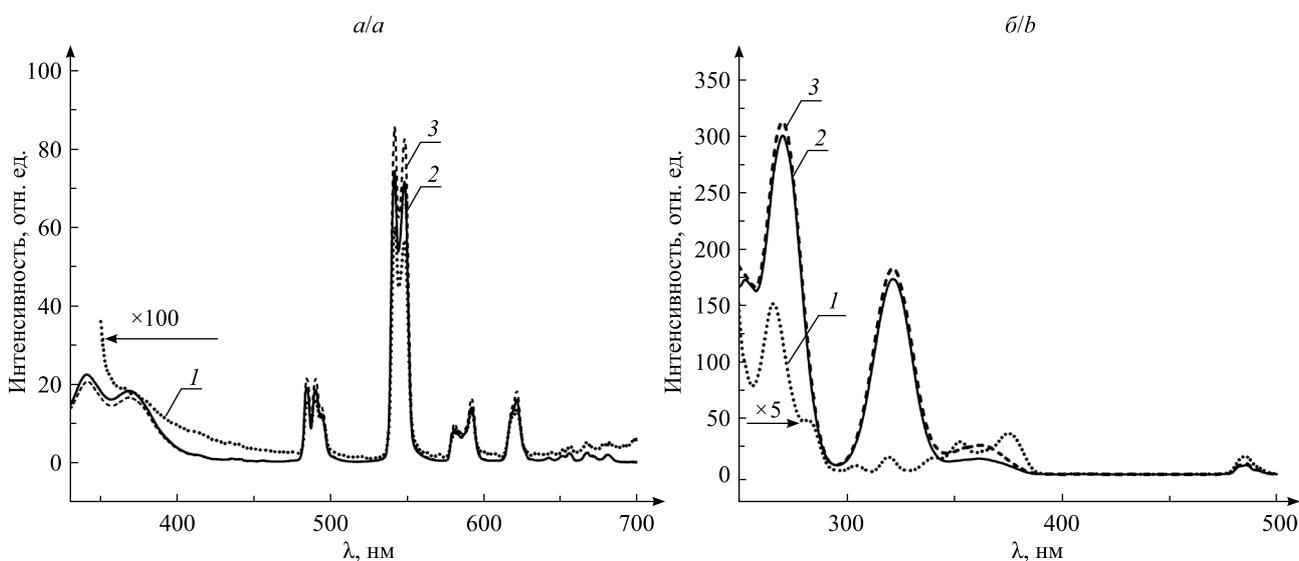


Рис. 3. СЛ (*a*) и СВЛ (*b*) для образцов  $YAl_3(BO_3)_4$ , активированных:

1 – 5 %  $Tb^{3+}$ ; 2 – 1 %  $Ce^{3+}$  + 5 %  $Tb^{3+}$ ; 3 – 1 % Ce + 10 % Tb;

$\lambda_{\text{возб}} = 310$  нм (*a*);  $\lambda_{\text{рег}} = 545$  нм (*b*)

Fig. 3. Luminescence (*a*) and excitation luminescence (*b*) spectra for  $YAl_3(BO_3)_4$  samples, activated:

1 – 5 %  $Tb^{3+}$ ; 2 – 1 %  $Ce^{3+}$  + 5 %  $Tb^{3+}$ ; 3 – 1 % Ce + 10 % Tb;

$\lambda_{\text{exc}} = 310$  нм (*a*);  $\lambda_{\text{reg}} = 545$  нм (*b*)

Эффективность такой сенсбилизации, судя по отношению парциальной интенсивности люминесценции  $Tb^{3+}$  к интегральной, включающей в себя дополнительно полосу люминесценции  $Ce^{3+}$  (двугорбая полоса при  $\lambda < 400$  нм), составляет около 50 %. Увеличение концентрации  $Tb^{3+}$  до 10 ат. % при неизменной концентрации  $Ce^{3+}$  (1 ат. %) сопровождается приблизительно 10 % возрастанием эффективности сенсбилизированной люминесценции  $Tb^{3+}$  (см. рис. 3, а, кривые 2 и 3).

Реализация описанной сенсбилизации люминесценции подтверждается также спектрами возбуждения люминесценции (рис. 3, б, кривые 2 и 3), на которых отчетливо видно появление двух интенсивных УФ-полос при длинах волн 270 и 320 нм, характерных для ионов  $Ce^{3+}$  в YAB [13]. Следует также отметить, что при  $\lambda_{\text{возб}} = 375$  нм, характерной для ионов  $Tb^{3+}$ , интенсивность люминесценции образца  $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$  возрастает всего примерно в 2 раза.

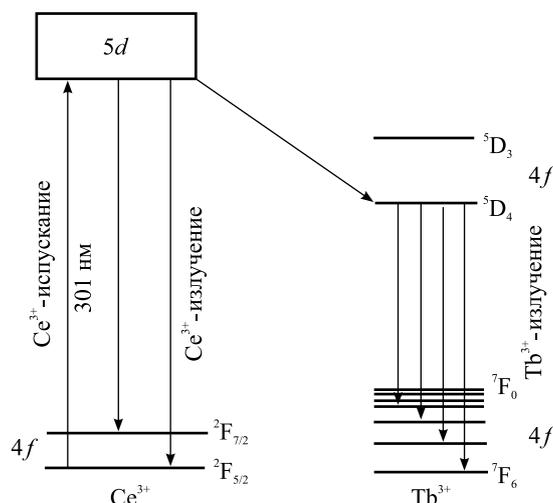


Рис. 4. Схема энергетических уровней ионов  $Ce^{3+}$  и  $Tb^{3+}$  и переноса энергии при реализации эффекта сенсбилизации люминесценции тербия

Fig. 4. Scheme of energy levels of  $Ce^{3+}$  and  $Tb^{3+}$  ions and energy transfer during the realization of the terbium luminescence sensitization effect

Таким образом, синтезированные с использованием коллоидно-химического метода микрокристаллы  $YAl_3(BO_3)_4 : Ce^{3+}, Tb^{3+}$  со средними размерами частиц от 0,2 до 1,0 мкм характеризуются эффективной (50 % и выше) сенсбилизацией ионами  $Ce^{3+}$  люминесценции ионов  $Tb^{3+}$ , интенсивность которой усиливается на два порядка по сравнению с несенсбилизированными образцами. Данный эффект обусловлен переносом энергии электронного возбуждения  $5d$ -уровней ионов  $Ce^{3+}$  на  $7F_j$ -уровни  $Tb^{3+}$ . За счет высокой концентрации активатора без явного тушения люминесценции можно достичь высокой интенсивности излучения. Установленные люминесцентные свойства активированных алюмоборатов дают возможность использовать такие материалы в целях разработки новых люминофоров для преобразования УФ-излучения в излучение видимого спектра.

### Библиографические ссылки

1. Dutta D. P., Tyagi A. K. Inorganic phosphor materials for solid state white light generation // Solid State Phenom. 2009. Vol. 155. P. 113–143. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.155.113.
2. Maia L. J. Q., Fick J., Bouchard C., et al. Elaboration and optimization of (Y,Er)Al<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> glassy planar waveguides through the sol-gel process // Opt. Mat. 2010. Vol. 32, issue 3. P. 484–490.
3. Koporulina E. V., Leonyuk N. I., Hansen D., et al. Flux growth and luminescence of Ho : YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> and PrAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystals // J. Cryst. Growth. 1998. Vol. 191, issue 4. P. 767–773. DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00347-9.
4. Hong H. Y.-P., Dwight K. Crystal structure and fluorescence lifetime of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, a promising laser material // Mater. Res. Bull. 1974. Vol. 9, issue 12. P. 1661–1665. DOI: 10.1016/0025-5408(74)90158-5.
5. Wang P., Dawes J., Dekker P., et al. Highly efficient diode-pumped ytterbium-doped yttrium aluminium borate laser // Opt. Commun. 2000. Vol. 174, issues 5/6. P. 467–470. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00686-0.
6. Mazzera M., Baraldi A., Buffagni E., et al. Spectroscopic analysis of Pr<sup>3+</sup> crystal-field transitions in YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> // Appl. Phys. B. 2011. Vol. 104, issue 3. P. 603–617. DOI: 10.1007/s00340-011-4421-7.
7. Leonyuk N. I., Leonyuk L. I. Growth and characterization of RM<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystals // Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. 1995. Vol. 31, issues 3/4. P. 179–278. DOI: 10.1016/0960-8974(96)83730-2.

8. Jung S. T., Yoon J. T., Chung S. J. Phase transition of neodymium yttrium aluminium borate with composition // *Mater. Res. Bull.* 1996. Vol. 31, issue 8. P. 1021–1027. DOI: 10.1016/S0025-5408(96)00059-1.
9. Jaque D., Capmany J., Molero F., et al. Up-conversion luminescence in the Nd<sup>3+</sup> : YAB self frequency doubling laser crystal // *Opt. Mater.* 1998. Vol. 10, issue 3. P. 211–217.
10. Watterich A., Aleshkevych P., Borowiec M. T., et al. Optical and magnetic spectroscopy of rare-earth-doped yttrium aluminium borate YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> single crystals // *J. Phys.: Cond. Matter.* 2003. Vol. 15, № 19. P. 3323–3331. DOI: 10.1088/0953-8984/15/19/331.
11. Liu Y., Yang Z., Yu Q., et al. Luminescence properties of Ba<sub>2</sub>LiB<sub>5</sub>O<sub>10</sub> : Dy<sup>3+</sup> phosphor // *Mater. Lett.* 2011. Vol. 65. P. 1956–1958. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.04.002.
12. Способ получения поликристаллического алюмобората иттрия со структурой хантита : пат. 16458 Респ. Беларусь, МПК С 09 К 11/80, С 09 К 11/63 / Г. Е. Малашкевич, Г. П. Шевченко, Е. В. Третьяк, Г. В. Шишко ; заявитель Ин-т физики НАН Беларуси. № а 20101690 ; заявл. 10.11.2010.
13. Бокшиц Ю. В., Брежнева Н. Ю., Шевченко Г. П. Влияние химической природы осадителя на формирование ультрадисперсных порошков YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> : Ce // *Неорг. материалы.* 2016. Т. 52, № 11. С. 1217–1222.

## References

1. Dutta D. P., Tyagi A. K. Inorganic phosphor materials for solid state white light generation. *Solid State Phenom.* 2009. Vol. 155. P. 113–143. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.155.113.
2. Maia L. J. Q., Fick J., Bouchard C., et al. Elaboration and optimization of (Y,Er)Al<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> glassy planar waveguides through the sol-gel process. *Opt. Mat.* 2010. Vol. 32, issue 3. P. 484–490.
3. Koporulina E. V., Leonyuk N. I., Hansen D., et al. Flux growth and luminescence of Ho : YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> and PrAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystals. *J. Cryst. Growth.* 1998. Vol. 191, issue 4. P. 767–773. DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00347-9.
4. Hong H. Y.-P., Dwight K. Crystal structure and fluorescence lifetime of NdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, a promising laser material. *Mater. Res. Bull.* 1974. Vol. 9, issue 12. P. 1661–1665. DOI: 10.1016/0025-5408(74)90158-5.
5. Wang P., Dawes J., Dekker P., et al. Highly efficient diode-pumped ytterbium-doped yttrium aluminium borate laser. *Opt. Commun.* 2000. Vol. 174, issues 5/6. P. 467–470. DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00686-0.
6. Mazzera M., Baraldi A., Buffagni E., et al. Spectroscopic analysis of Pr<sup>3+</sup> crystal-field transitions in YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>. *Appl. Phys. B.* 2011. Vol. 104, issue 3. P. 603–617. DOI: 10.1007/s00340-011-4421-7.
7. Leonyuk N. I., Leonyuk L. I. Growth and characterization of RM<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystals. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 1995. Vol. 31, issues 3/4. P. 179–278. DOI: 10.1016/0960-8974(96)83730-2.
8. Jung S. T., Yoon J. T., Chung S. J. Phase transition of neodymium yttrium aluminium borate with composition. *Mater. Res. Bull.* 1996. Vol. 31, issue 8. P. 1021–1027. DOI: 10.1016/S0025-5408(96)00059-1.
9. Jaque D., Capmany J., Molero F., et al. Up-conversion luminescence in the Nd<sup>3+</sup> : YAB self frequency doubling laser crystal. *Opt. Mater.* 1998. Vol. 10, issue 3. P. 211–217.
10. Watterich A., Aleshkevych P., Borowiec M. T., et al. Optical and magnetic spectroscopy of rare-earth-doped yttrium aluminium borate YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> single crystals. *J. Phys.: Cond. Matter.* 2003. Vol. 15, No. 19. P. 3323–3331. DOI: 10.1088/0953-8984/15/19/331.
11. Liu Y., Yang Z., Yu Q., et al. Luminescence properties of Ba<sub>2</sub>LiB<sub>5</sub>O<sub>10</sub> : Dy<sup>3+</sup> phosphor. *Mater. Lett.* 2011. Vol. 65. P. 1956–1958. DOI: 10.1016/j.matlet.2011.04.002.
12. [A method for producing polycrystalline yttrium aluminoborate with a chantite structure] : пат. 16458 of the Repub. of Belarus, МПК С 09 К 11/80, С 09 К 11/63. G. E. Malashkevich, G. P. Shevchenko, E. V. Tret'yak, G. V. Shyshko ; appl. Inst. of Phys. of Natl. Acad. of Sci. of Belarus. No. a 20101690 ; declar. 10.11.2010 (in Russ.).
13. Bokshyts Y. V., Brezhneva N. Y., Shevchenko G. P. Effect of the Chemical Nature of Precipitant on the Formation of Ultrafine YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> : Ce Powders. *Neorgan. materialy* [Inogr. Neorgan. Mater.]. 2016. Vol. 52, No. 11. P. 1217–1222 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 22.11.2017.  
Received by editorial board 22.11.2017.