

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. ШЕВЧЕНКО¹⁾, Ю. В. БОКШИЦ¹⁾, И. Ю. ИВЛИЕВА¹⁾,
Г. Е. МАЛАШКЕВИЧ²⁾, С. Е. КИЧАНОВ³⁾

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

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

³⁾ 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^a, Y. V. BOKSHYTS^a, I. Y. IVLIEVA^a, G. E. MALASHKEVICH^b, S. E. KICHANOV^c

^aInstitute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University,
14 Lieninhradskaja Street, Minsk 220006, Belarus

^bInstitute of Physics named after B. I. Stepanov, National Academy of Sciences of Belarus,
68-2 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220072, Belarus

^cJoint 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/см³) 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 Empyrean PANalytical с интенсивным потоком рентгеновского излучения (CuK_α -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 Ce^{3+} и Tb^{3+} замещают 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 Tb^{3+} заметно меньше, чем 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.

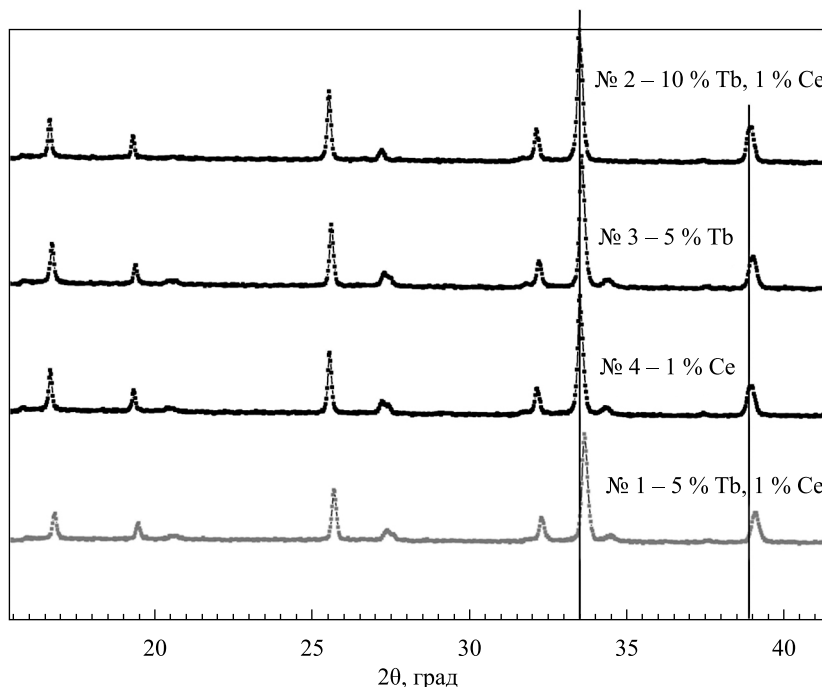


Рис. 1. Рентгенограммы образцов $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$, одноактивированных и соактивированных Ce и Tb (CuK_α -излучение)

Fig. 1. XRD patterns for $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ samples, activated and co-activated by Ce and Tb (CuK_α -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 Tb^{3+} в Tb- и Tb + Ce-активированных образцах YAB при $\lambda_{\text{возб}} = 310$ нм, близкой к максимальной интенсивности полосы возбуждения иона Ce^{3+} , представленные на рис. 3, а, в основном обусловлены люминесценцией ионов Tb^{3+} в исследуемой области спектра при длинах волн

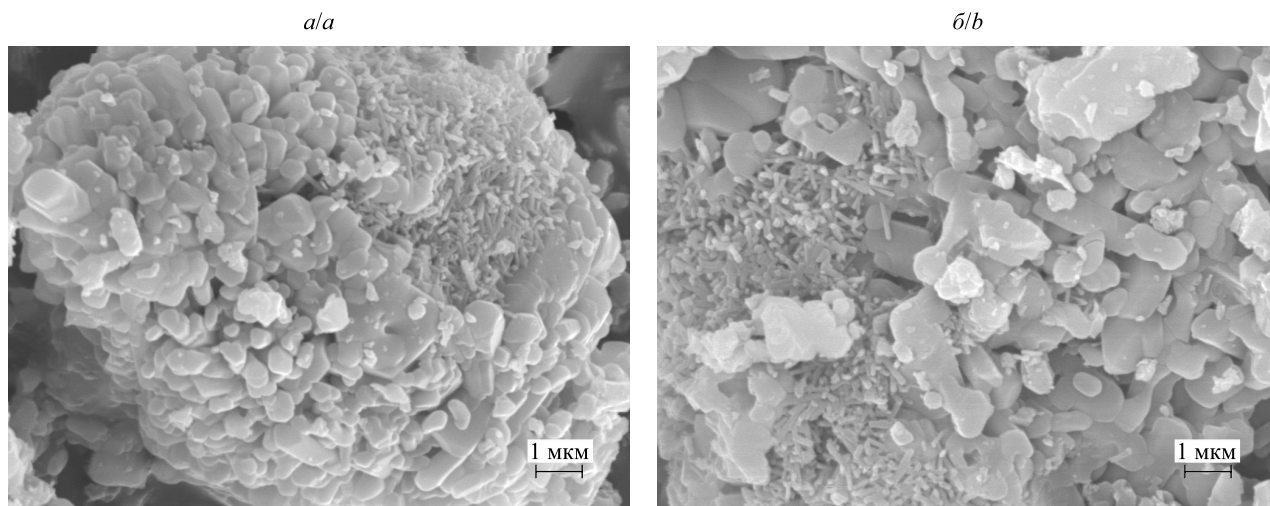


Рис. 2. СЭМ образцов $YAl_3(BO_3)_4$, активированных: *a* – 1 % Ce + 5 % Tb; *b* – 1 % Ce + 10 % Tb

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+} .

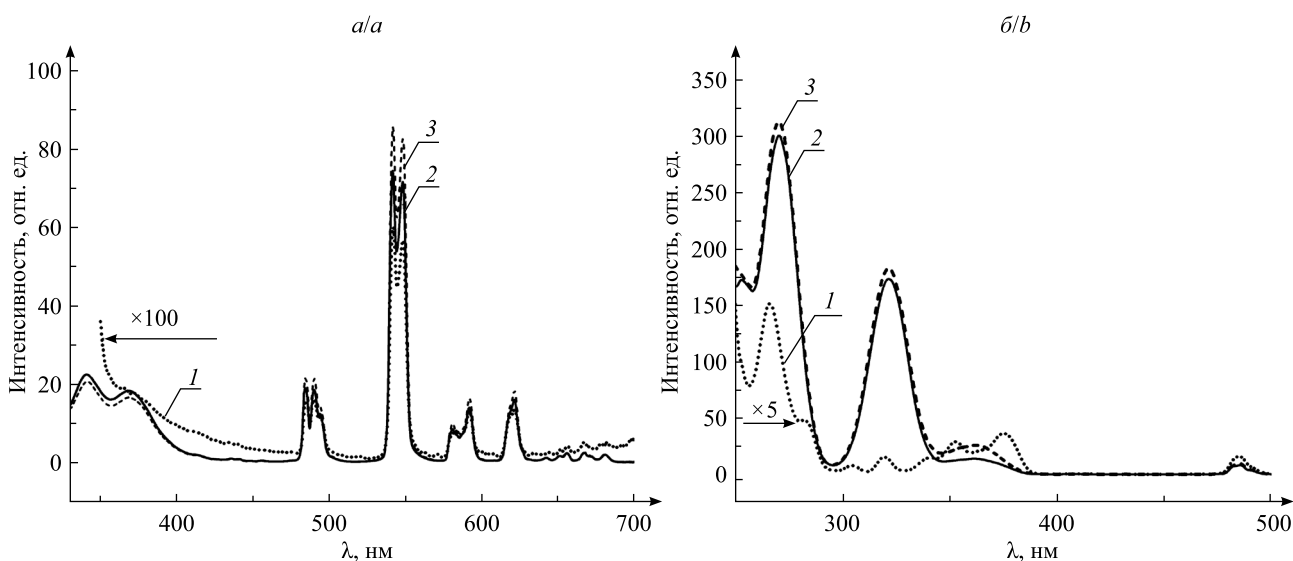


Рис. 3. СЛ (*a*) и СВЛ (*b*) для образцов $YAl_3(BO_3)_4$, активированных:

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.

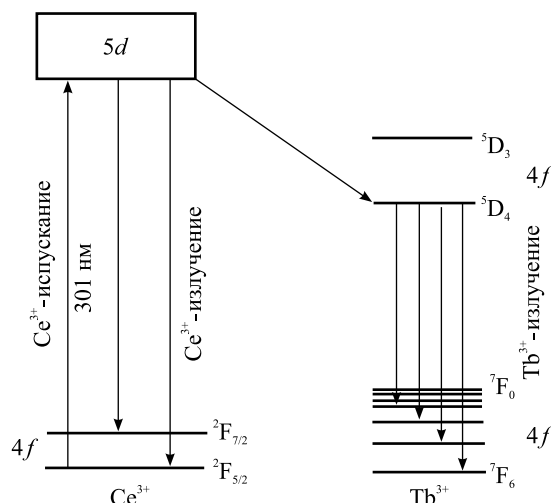


Рис. 4. Схема энергетических уровней ионов Ce^{3+} и Tb^{3+} и переноса энергии при реализации эффекта сенсбилизации люминесценции тербия

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)Al₃(BO₃)₄ 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 : YAl₃(BO₃)₄ and PrAl₃(BO₃)₄ 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 NdAl₃(BO₃)₄, 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 Pr³⁺ crystal-field transitions in YAl₃(BO₃)₄ // 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 RM₃(BO₃)₄ 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 Nd³⁺ : 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 YAl₃(BO₃)₄ 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 Ba₂LiB₅O₁₀ : Dy³⁺ 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 YAl₃(BO₃)₄ : 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)Al₃(BO₃)₄ 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 : YAl₃(BO₃)₄ and PrAl₃(BO₃)₄ 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 NdAl₃(BO₃)₄, 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 Pr³⁺ crystal-field transitions in YAl₃(BO₃)₄. *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 RM₃(BO₃)₄ 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 Nd³⁺ : 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 YAl₃(BO₃)₄ 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 Ba₂LiB₅O₁₀ : Dy³⁺ 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 YAl₃(BO₃)₄ : 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.