

Получение люминесцентного материала на основе $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$, легированного ионами тербия и европия

Ж.К. Оразов¹, А.К. Болатов^{1*},
Н.Г. Кононова², В.С. Шевченко²,
К.А. Кох^{2,3}, Б.М. Уралбеков¹,
А.Б. Кузнецов², А.Е. Кох²

¹Центр физико-химических методов исследования и анализа, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: assetbolatov@gmail.com

Новый люминесцентный материал на основе сложного бората $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$, легированный ионами Tb^{3+} и Eu^{3+} , получен методом высокотемпературного твердофазного синтеза. Методом рентгенофазового анализа показано, что $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ кристаллизуется в тригональной сингонии с пространственной группой R-3m и изотипно минералу бючлииту $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$. Кристаллическая структура люминофора является слоистой, сформированной из $[\text{BO}_3]$ треугольников, $[\text{YO}_6]$ октаэдров, $[\text{BaO}_9]$ и $[\text{NaO}_9]$ полиэдров. Рассчитанные значения параметров элементарной ячейки составляют для $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$: $a=5,3510(6)\text{ \AA}$, $c=17,9338(3)\text{ \AA}$, $V=444,71(2)\text{ \AA}^3$. Исследованы люминесцентные свойства $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$.

Ключевые слова: $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$; кристаллическая структура; легирование; люминесцентный материал.

Тербий және европий иондарымен легирленген $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$ негізіндегі люминесцентті материалды алу

Ж.К. Оразов¹, А.К. Болатов^{1*},
Н.Г. Кононова², В.С. Шевченко²,
К.А. Кох^{2,3}, Б.М. Уралбеков¹,
А.Б. Кузнецов², А.Е. Кох²

¹Физика-химиялық зерттеу және талдау әдістері орталығы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²В.С. Соболев атындағы геология және минералогия институты, Новосібір, Ресей

³Новосібір мемлекеттік университеті, Новосібір, Ресей

*E-mail: assetbolatov@gmail.com

Tb^{3+} және Eu^{3+} иондарымен легирленген, $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$ күрделі боратына негізделген жаңа люминесцентті материал жоғары температуралы қатты фазалы синтез нәтижесінде алынды. Рентгендік дифракциялық талдау әдісін қолдана отырып, $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ қосылысы тригональдық жүйеде R-3m кеңістік тобымен кристалданатыны және бючлиит минералына $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ изотипті екені көрсетілді. Люминофордың кристалдық құрылымы қабатталған, $[\text{BO}_3]$ үшбұрыштарынан, $[\text{YO}_6]$ октаэдрлерден, $[\text{BaO}_9]$ және $[\text{NaO}_9]$ полиэдрлерден құрылған. $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ үшін есептелген бірлік ұяшық параметрлері келесідей болды: $a=5,3510(6)\text{ \AA}$, $c=17,9338(3)\text{ \AA}$, $V=444,71(2)\text{ \AA}^3$. $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ қосылысының люминесценттік қасиеттері зерттелді.

Түйін сөздер: $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$; кристалдық құрылым; легирлеу; люминесцентті материал.

Obtaining of luminescent material based on $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$ doped with terbium and europium ions

Zh.K. Orazov¹, A.K. Bolatov^{1*},
N.G. Kononova², V.S. Shevchenko²,
K.A. Koh^{2,3}, B.M. Uralbekov¹,
A.B. Kuznetsov², A.E. Koh²

¹Center of Physical Chemical Methods of Research and Analysis, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia




*E-mail: assetbolatov@gmail.com

A new luminescent material based on complex borate $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$ doped with Tb^{3+} and Eu^{3+} ions was obtained by high-temperature solid-state synthesis. Using X-ray diffraction analysis it was shown that $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ crystallizes in trigonal system with the space group R-3m and isotypic with the mineral buetschliit $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$. The crystal structure of the phosphor is layered, formed from $[\text{BO}_3]$ triangles, $[\text{YO}_6]$ octahedra, $[\text{BaO}_9]$ and $[\text{NaO}_9]$ polyhedra. The calculated unit cell parameters for $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ are: $a=5.3510(6)\text{ \AA}$, $c=17.9338(3)\text{ \AA}$, $V=444.71(2)\text{ \AA}^3$. The luminescent properties of $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ were studied.

Keywords: $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2:0,07\text{Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$; crystal structure; doping; luminescent material.



Получение люминесцентного материала на основе $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$, легированного ионами тербия и европия

Ж.К. Оразов¹ , А.К. Болатов^{1*} , Н.Г. Кононова², В.С. Шевченко², К.А. Кох^{2,3}, Б.М. Уралбеков¹ , А.Б. Кузнецов², А.Е. Кох²

¹Центр физико-химических методов исследования и анализа, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: assetbolatov@gmail.com

1. Введение

Соединения боратов редкоземельных элементов применяются в качестве нелинейно-оптических (НЛО) материалов, люминофоров и др. [1-3]. В настоящее время синтезировано множество боратов в двойных, тройных и четверных системах [4-6].

При исследовании четверной системы $\text{R}_2\text{O}_3\text{-MeO-M}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ открыты новые функциональные бораты (где, М – щелочной металл, Me – щелочноземельный металл, R – редкоземельный элемент), в том числе, бораты с люминесцентными свойствами. Также, в системе $\text{R}_2\text{O}_3\text{-MeO-M}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ был открыт ряд новых соединений, а именно: $\text{M BaYB}_6\text{O}_{12}$ (M = Rb, Cs) [7], $\text{LiCaTb}_5(\text{BO}_3)_6$ [8], $\text{LiSrTb}_2(\text{BO}_3)_3$ [9] и $\text{LiCdRe}_5(\text{BO}_3)_6$ [10], которые являются потенциальными магнитооптическими материалами; соединения $\text{K}_7\text{M}^{\text{II}}\text{RE}_2(\text{B}_5\text{O}_{10})_3$ [11,12] и $\text{K}_7\text{CaR}_2(\text{B}_5\text{O}_{10})_3$ [13-14] были предложены в качестве потенциальных НЛО материалов.

Опубликованный авторами обзор по боратам в системе $\text{M}_2\text{O-BaO-R}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ [15] показал, что имеется большой потенциал в поиске перспективных люминесцентных соединений на основе $\text{NaBaR}(\text{BO}_3)_2$, $\text{KCaR}(\text{BO}_3)_2$, $\text{KSrR}(\text{BO}_3)_2$. Эти боратные соединения являются подходящими матрицами для различных легирующих ионов благодаря наличию I, II, III-валентных позиций в структуре (катионы щелочных, щелочноземельных и редкоземельных элементов). Наличие катионов-разбавителей в структуре боратов обеспечивает

оптимальное расстояние между люминесцентными центрами, что приводит к уменьшению концентрационного тушения люминесценции. Кроме того, указанные материалы обладают относительно высокими показателями механической прочности и химической устойчивости [15-19].

В данной работе новый люминесцентный материал на основе сложного бората $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$ (далее по тексту NBY), легированный ионами Tb^{3+} и Eu^{3+} (далее по тексту $\text{NBY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$), получен высокотемпературным твердофазным синтезом. Параметры элементарной ячейки полученного соединения уточнены методом Le Bail по данным рентгеновской дифрактометрии на порошке. Приводятся люминесцентные свойства этого материала.

2. Эксперимент

2.1 Подготовка образцов

Соединение $\text{NBY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ было синтезировано двухстадийной высокотемпературной твердофазной реакцией по методике, описанной в патенте [20]. BaCO_3 (99,9%), Na_2CO_3 (99,9%), Y_2O_3 (99,9%), H_3BO_3 (99,5%), Eu_2O_3 (99,99%) и Tb_4O_7 (99,99%) (предоставленные Chemcraft, Россия) использовали в качестве исходных материалов.

Стехиометрические количества прекурсоров были взвешены на аналитических весах, тщательно измельчены и гомогенизированы в агатовой ступке. В дальнейшем смесь помещали в платиновый тигель, проводили предварительный нагрев при 700 °С в течение 12 ч, а после

перетерали в ступке. Конечную реакцию проводили при температуре, которую определяли путем пошагового повышения температуры на 50°C, начиная от 750°C, на каждой ступени температуру выдерживали в течение 12 ч. Твердофазный синтез проводили в однозонной нагревательной установке (Лаборатория роста кристаллов, ИГМ СО РАН, Россия). После охлаждения печи до комнатной температуры продукты реакции были растерты в порошок и проанализированы методом РФА.

2.1 Исследование и описание образцов

Фазовый анализ и параметры элементарной ячейки легированного бората были определены методом рентгеновской дифракции на порошке с использованием дифрактометра Miniflex 600 (Япония), работающий на $\text{CuK}\alpha$ излучении, с диапазоном сканирования от 5° до 80°, шаг сканирования 0,02°/шаг, а также с использованием метода Le Bail. Спектры фотолюминесценции (PL) и возбуждения (PLE) были получены с использованием спектрофлуориметра с ксеноновой лампой SOLAR CM 2203 (Беларусь).

3. Результаты и обсуждения

3.1 Кристаллическая структура

На рисунках 1-2 представлены результаты порошкового РФА и уточнения параметров кристаллической решетки, согласно которым исследуемый образец $\text{NBY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ изоструктурен $\text{KBaY}(\text{BO}_3)_2$ (далее по

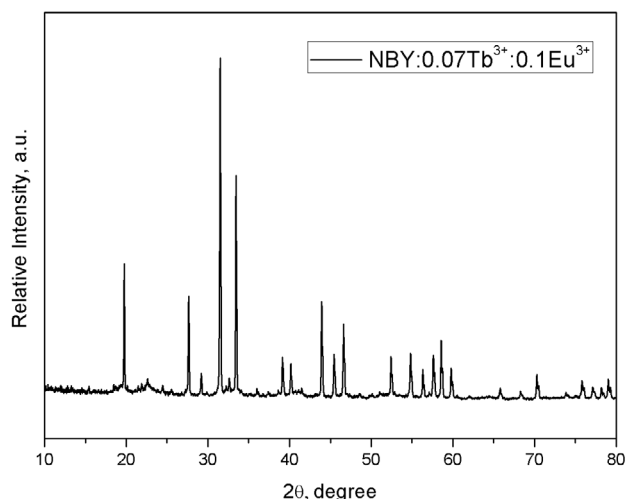


Рисунок 1 – Рентгенодифрактограмма $\text{NBY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$

тексту $\text{KBaY}(\text{BO}_3)_2$), изотипный с минералом бюклиитом $\text{K}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$, и кристаллизуется в тригональной сингонии с пространственной группой $R\bar{3}m$ [21-22]. Следует также отметить наличие примесных фаз $\text{NBY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ со структурой NBY , кристаллизующейся в тригональной системе с пространственной группой $R\bar{3}$ [15-18], в количестве 4% и оксида иттрия в количествах меньше 1%.

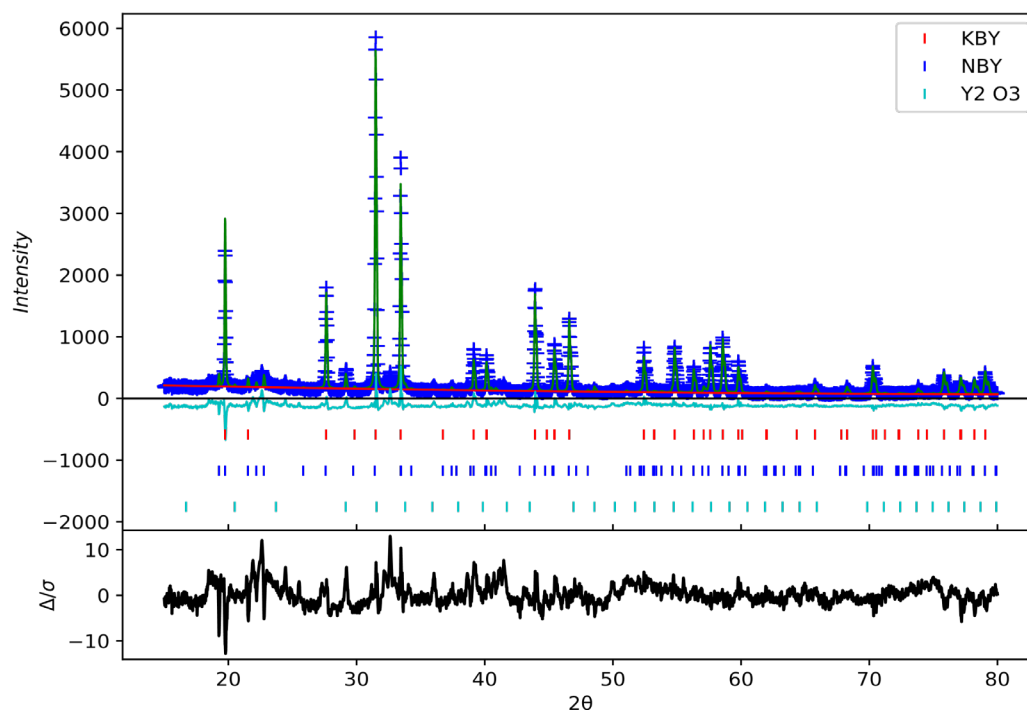


Рисунок 2 – Экспериментальная (синяя) и рассчитанная (зеленая) рентгенограммы и их разностный профиль (голубой) для рентгенограммы $\text{NBY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ по методу Ли Бэйла с использованием программы GSAS

Структура $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ слоистая, состоящая из сдвоенных слоев плоских BO_3 треугольников, соединенных в двумерный каркас редкоземельными атомами, которые, в свою очередь, образуют октаэдр путем координирования с 6 атомами O. Двухслойный пакет $\{\text{M}[\text{A}(\text{BO}_3)_2]\}$ является базисным строительным блоком данного класса структур. Прототипом можно считать борат $\text{Ba}_2\text{Mg}(\text{BO}_3)_2$ [23], в нем нейтральные по заряду пакеты $\{\text{Mg}[\text{Ba}(\text{BO}_3)_2]\}$ упакованы в ромбоэдрической ячейке в шестислойную укладку. В структуре $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ катионы Ba^{2+} и Na^+ координированы с 9 атомами O и разупорядочены по A-позициям, в результате структура характеризуется шестислойным с-периодом.

Рассчитанные значения параметров элементарной ячейки составляют для $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$: $a=5,3510(6)$ Å, $c=17,9338(3)$ Å, $V=444,71(2)$ Å³. Для структурной модификации NbY параметры элементарной ячейки: $a=5,3508(5)$ Å, $c=35,9899(2)$ Å, $V=892,40(1)$ Å³.

3.2 Люминесцентные свойства

В спектре возбуждения наблюдается широкая полоса в диапазоне от 200 до 300 нм с максимумом около 246 нм, которая обусловлена $4f \rightarrow 5d$ электронным переходом в ионе Tb^{3+} . Кроме того, наличие полос в спектре возбуждения $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ объясняется переносом заряда между атомами в ковалентной связи $\text{Eu}^{3+}-\text{O}^{2-}$, т.е. с переходом электрона с орбитали кислорода на орбиталь европия $4f^6$. Линии в более длинноволновой области спектра связаны с переходами внутри иона Eu^{3+} , которые могут быть приписаны переходам ${}^7F_1 \rightarrow {}^5D_1$ (рисунок 3) [21, 24-27].

Спектры люминесценции соединения $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$ показывают интенсивное характеристическое зеленое и красное свечения (рисунок 4). Спектр фотолюминесценции, возбуждаемый длиной волны 246 нм, состоит из полос при 475-490 нм (${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_6$), 542 и 552 нм (${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_3$), 590 нм (${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_4$) и 620 нм (${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_3$), обусловленных хорошо известными переходами атомных термов тербия ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_J$ ($J=6, 5, 4, 3$). Кроме того, в спектре люминесценции наблюдаются характеристические линии эмиссии иона Eu^{3+} , соответствующих переходам электронов внутри $4f$ -оболочки при 590 нм (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$), 612 нм (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$), 664 нм (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$), 678 нм (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$) и 696 нм (${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_5$).

4. Заключение

Высокотемпературным твердофазным методом был получен новый люминесцентный материал состава $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$, определены его параметры кристаллической структуры и люминесцентные свойства. Наличие линий на в спектре люминесценции, характерных ионам тербия (в области 500-550 нм) и европия (в области 600-650 нм), подтверждает внедрение этих ионов в матрицу NbY, и дает возможность получения новых перспективных люминофоров от красного до зеленого

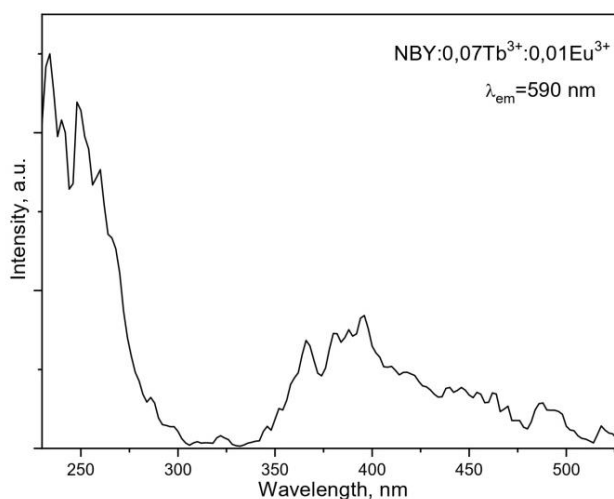


Рисунок 3 – Спектр возбуждения для $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$, при длине волны испускания 590 нм

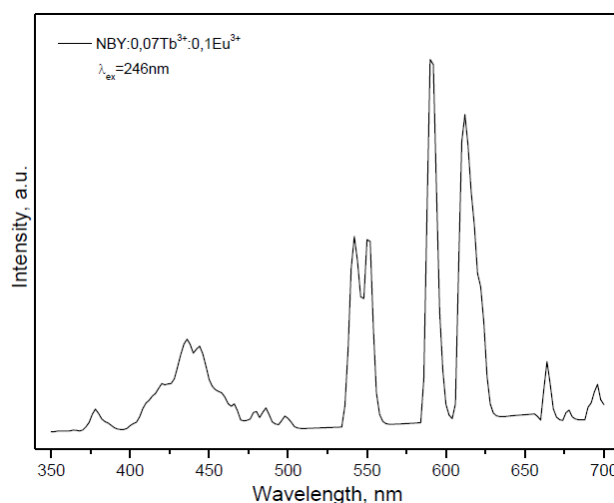


Рисунок 4 – Спектр люминесценции $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$, при длине волны возбуждения $\lambda=246$ нм

цвета свечения для изготовления диодных ламп. В дальнейшем планируется детальное изучение механизма передачи энергии между люминесцентными центрами в $\text{NbY:0,07Tb}^{3+}:0,1\text{Eu}^{3+}$.

Благодарности

Работа была выполнена за счет грантового финансирования научных исследований Министерства образования и науки Республики Казахстан по теме: ИРН AP05130794 "Новые редкоземельные бораты: синтез, кристаллохимические особенности, оптические свойства".

Литература

- 1 Chen C., Wu Y., Jiang A., Wu B., You G., Li R., Lin S. New nonlinear-optical crystal: LiB_3O_5 // *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*. – 1989. – Vol.6, Is.4. – P.616-621.
- 2 Cheng L.K., Bosenberg W., Tang C.L. Growth and characterization of low temperature phase barium metaborate crystals // *Journal of Crystal Growth*. – 1988. – Vol.89, Is.4. – P.553-559.
- 3 Jiang H., Li J., Wang J., Hu X., Liu H., Teng B., Zhang C., Dekker P., Wang P. Growth of $\text{Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystals and their optical and self-frequency-doubling properties // *Journal of crystal growth*. – 2001. – Vol.233, Is.1. – P.248-252.
- 4 Wang D.Y., Chen T.M., Cheng B.M. Host sensitization of Tb^{3+} ions in tribarium lanthanide borates $\text{Ba}(3)\text{Ln}(\text{BO}_3)_3$ ($\text{Ln} = \text{Lu}$ and Gd) // *Inorganic Chemistry*. – 2012. – Vol.51, Is.5. – P.2961-2965.
- 5 Wu Y., Ding D., Pan S., Yang F., Ren, G. Luminescence characteristics of Ce^{3+} -doped $\text{Lu}_{1-x}\text{Sc}_x\text{BO}_3$ solid solution single crystals grown by Czochralski method // *Optical Materials*. – 2011. – Vol.33, Is.4. – P.655-659.
- 6 Kuznetsov A.B., Kokh K.A., Kononova N.G., Shevchenko V.S., Rashchenko S.V., et al. Growth and crystal structure of $\text{Li}_3\text{Ba}_4\text{Sc}_3\text{B}_8\text{O}_{22}$ borate and its Tb^{3+} doped green-emitting phosphor // *Journal of Luminescence*. – 2020. – Vol.217. – P.116755.
- 7 Chen X., Zhang F., Shi Y., Sun Y., Yang Z., Pan, S. $\text{MBaYB}_6\text{O}_{12}$ ($\text{M} = \text{Rb}, \text{Cs}$): two new rare-earth borates with large birefringence and short ultraviolet cutoff edges // *Dalton Transactions*. – 2018. – Vol.47, Is.3. – P.750-757.
- 8 Li R. K., Wu C. C., Xia M. J. $\text{LiCaTb}_5(\text{BO}_3)_6$: A new magneto-optical crystal promising as Faraday rotator // *Optical Materials*. – 2016. – Vol.62. – P.452-457.
- 9 Chen P., Xia M., Li R. K. A terbium rich orthoborate $\text{LiSrTb}_2(\text{BO}_3)_3$ and its analogues // *New Journal of Chemistry*. – 2015. – Vol.39, Is.12. – P.9389-9395.
- 10 Xia M., Zhai K., Lu J., Sun Y., Li R.K. Orthoborates $\text{LiCdRE}_5(\text{BO}_3)_6$ ($\text{RE} = \text{Sm-Lu}$ and Y) with Rare-Earth Ions on a Triangular Lattice: Synthesis, Crystal Structure, and Optical and Magnetic Properties // *Inorganic chemistry*. – 2017. – Vol.56, Is.14. – P.8100-8105.
- 11 Mutailipu M., Xie Z., Su X., Zhang M., Wang Y., Yang Z., Pan S. Chemical cosubstitution-oriented design of rare-earth borates as potential ultraviolet nonlinear optical materials // *Journal of the American Chemical Society*. – 2017. – Vol.139, Is.50. – P.18397-18405.
- 12 Xie Z., Mutailipu M., He G., Han G., Wang Y., Yang Z., Pan S. A series of rare-earth borates $\text{K}_7\text{MRE}_2\text{B}_{15}\text{O}_{30}$ ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Cd}, \text{Pb}$; $\text{RE} = \text{Sc}, \text{Y}, \text{Gd}, \text{Lu}$) with large second harmonic generation responses // *Chemistry of Materials*. – 2018. – Vol.30, Is.7. – P.2414-2423.
- 13 Kuznetsov A.B., Ezhov D.M., Kokh K.A., Kononova N.G., Shevchenko V.S., et al. Flux growth and optical properties of $\text{K}_7\text{CaY}_2(\text{B}_5\text{O}_{10})_3$ nonlinear crystal // *Materials Research Bulletin*. – 2018. – Vol.107. – P.333-338.
- 14 Kuznetsov A.B., Ezhov D.M., Kokh K.A., Kononova N.G., Shevchenko V.S., et al. Nonlinear optical crystals $\text{K}_7\text{CaR}_2(\text{B}_5\text{O}_{10})_3$ ($\text{R} = \text{Nd}, \text{Yb}$), growth and properties // *Journal of Crystal Growth*. – 2019. – Vol.519. – P.54-59.
- 15 Uralbekov B., Shevchenko V., Kuznetsov A., Kokh A., Kononova N., et al. Novel compounds in the $\text{MMER}(\text{BO}_3)_2$ borate family ($\text{M} = \text{alkali metal}, \text{Me} = \text{alkaline earth metal}, \text{R} = \text{rare-earth element}$): Syntheses, crystal structures and luminescent properties // *Journal of Luminescence*. – 2019. – Vol.216. – ID.116712.
- 16 Seryotkin Y.V., Bakakin V.V., Kokh A.E., Kononova N.G., Svetlyakova T.N., et al. Synthesis and crystal structure of new layered $\text{BaNaSc}(\text{BO}_3)_2$ and $\text{BaNaY}(\text{BO}_3)_2$ orthoborates // *Journal of Solid State Chemistry*. – 2010. – Vol.183, Is.5. – P.1200-1204.
- 17 Svetlyakova T.N., Kokh A.E., Kononova N.G., Fedorov P.P., Rashchenko S.V., Maillard A. Search for compounds of the $\text{NaBaR}(\text{BO}_3)_2$ family ($\text{R} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Gd}, \text{and Yb}$) and the new $\text{NaBaYb}(\text{BO}_3)_2$ orthoborate // *Crystallography Reports*. – 2013. – Vol.58, Is.1. – P.54-60.
- 18 Kononova N., Shevchenko V., Kokh A., Nabeeva T., Chapron D., Maillard A., et al. Synthesis of New Isostructural Orthoborates $\text{NaBaR}(\text{BO}_3)_2$ with $\text{R} = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}$ and Lu // *Materials Research*. – 2016. – Vol.19, Is.4. – P.834-838.
- 19 Kokh A., Kononova N., Shevchenko V., Seryotkin Y., Bolatov A., Abdullin K., et al. Syntheses, crystal structure and luminescence properties of the novel isostructural $\text{KSrR}(\text{BO}_3)_2$ with $\text{R} = \text{Y}, \text{Yb}, \text{Tb}$ // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol.711. – P.440-445.
- 20 Евразийский Патент №025559. Фотолюминесцентный материал редкоземельного ортобората и способ его получения/ Кох А.Е., Кононова Н.Г., Шевченко В.С., Сереткин Ю.В., Болатов А.К., Уралбеков Б.М., Буркитбаев М.; опубл. 30.01.2017, Бюл. Is.1'2017. – 557 с.
- 21 Gao J., Song L., Hu X. A buetschliite-type rare-earth borate, $\text{KBaY}(\text{BO}_3)_2$ // *Solid State Sciences*. – 2011. – Vol.13, Is.1. – P.115-119.
- 22 Kononova N.G., Shevchenko V.S., Kokh A.E., Bolatov A.K., Uralbekov B.M., et al. Synthesis of two new orthoborates $\text{KBaPr}(\text{BO}_3)_2$ and $\text{KBaNd}(\text{BO}_3)_2$ // *Crystal Research and Technology*. – 2017. – Vol.52, Is.8. – P.1700024.
- 23 Akella A., Keszler D. A. Structure and Eu^{2+} luminescence of dibarium magnesium orthoborate // *Materials research bulletin*. – 1995. – Vol.30, Is.1. – P.105-111.
- 24 Tang H., Li Y., Yang R., Gao W. Phase formations and red-luminescence enhancement of Eu^{3+} -activated $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$ phosphors // *Journal of Luminescence*. – 2019. – Vol.208. – P.253-258.
- 25 Geng W., Zhou X., Ding J., Wang Y. $\text{NaBaY}(\text{BO}_3)_2$: Ce^{3+} , Tb^{3+} : A novel sharp green-emitting phosphor used for WLED and FEDs // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2018. – Vol.101, Is.10. – P.4560-4571.

- 26 Peng Y., Lian Z., Zhang L., Shen G., Wang X., Yan Q. Ce³⁺/Tb³⁺ co-doped KBaY (BO₃)₂: A color-tunable blue-green phosphor for near-UV white LEDs // *Materials Express*. – 2014. – Vol.4, Is.6. – P.533-538.
- 27 Freidzon A.Y., Kurbatov I.A., Vovna V.I. Ab initio calculation of energy levels of trivalent lanthanide ions // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2018. – Vol.20, Is.21. – P.14564-14577.

References

- 1 Chen C, Wu Y, Jiang A, Wu B, You G, et al (1989) *J Opt Soc Am B* 6:616-621. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.6.000616>
- 2 Cheng LK, Bosenberg W, Tang CL (1988) *J Cryst Growth* 89:553-559. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(88\)90218-7](https://doi.org/10.1016/0022-0248(88)90218-7)
- 3 Jiang H, Li J, Wang J, Hu XB, Liu H, Teng B, Wang P (2001) *J Cryst Growth* 233:248-252. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)01562-7](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)01562-7)
- 4 Wang DY, Chen TM, Cheng BM (2012) *Inorg Chem* 51:2961-2965. <https://doi.org/10.1021/ic202241h>
- 5 Wu Y, Ding D, Pan S, Yang F, Ren G (2011) *Opt Mater* 33:655-659. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.11.024>
- 6 Kuznetsov AB, Kokh KA, Kononova NG, Shevchenko VS, Rashchenko SV, et al (2020) *J Lumin* 217:116755. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116755>
- 7 Chen X, Zhang F, Shi Y, Sun Y, Yang Z, Pan S (2018) *Dalton Trans* 47:750-757. <https://doi.org/10.1039/C7DT04223J>
- 8 Li RK, Wu CC, Xia MJ (2016) *Opt Mater* 62:452-457. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2016.10.025>
- 9 Chen P, Xia M, Li RK (2015) *New J Chem* 39:9389-9395. <https://doi.org/10.1039/C5NJ01913C>
- 10 Xia M, Zhai K, Lu J, Sun Y, Li RK (2017) *Inorg Chem* 56:8100-8105. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.7b00756>
- 11 Mutailipu M, Xie Z, Su X, Zhang M, Wang Y, Yang Z, Pan S (2017) *J Am Chem Soc* 139:18397-18405. <https://doi.org/10.1021/jacs.7b11263>
- 12 Xie Z, Mutailipu M, He G, Han G, Wang Y, Yang Z, Pan S (2018) *Chem Mater* 30:2414-2423. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.8b00491>
- 13 Kuznetsov AB, Ezhov DM, Kokh KA, Kononova NG, Shevchenko VS, et al (2018) *Mater Res Bull* 107:333-338. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.07.037>
- 14 Kuznetsov AB, Ezhov DM, Kokh KA, Kononova NG, Shevchenko VS, et al (2019) *J Cryst Growth* 519: 54-59. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2019.05.007>
- 15 Uralbekov B, Shevchenko V, Kuznetsov A, Kokh A, Kononova N, et al (2019) *J Lumin* 216:116712. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.116712>
- 16 Seryotkin YV, Bakakin VV, Kokh AE, Kononova NG, Svetlyakova TN, et al (2010) *J Solid State Chem* 183:1200-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2010.03.005>
- 17 Svetlyakova TN, Kokh AE, Kononova NG, Fedorov PP, Rashchenko SV, Maillard A (2013) *Crystallogr Rep* 58:54-60. <https://doi.org/10.1134/S1063774513010136>
- 18 Kononova N, Shevchenko V, Kokh A, Nabeeva T, Chapron D, et al (2016) *Mater Res* 19:834-838. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0081>
- 19 Kokh AE, Kononova NG, Shevchenko VS, Seryotkin YV, Bolatov AK, et al (2017) *J Alloys Comp* 711:440-445. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.322>
- 20 Eurasian Patent №025559. The photoluminescent material of rare-earth orthoborate and method for its production [Fotolyuminescentnyy material redkozemel'nogo ortoborata i sposob yego polucheniya]/ Kokh AE, Kononova NG, Shevchenko VS, Seryotkin YV, Bolatov AK, Uralbekov BM, Burkitbayev M: published 30.01.2017, № 1'2017. (In Russian)
- 21 Gao J, Song L, Hu X, Zhang D (2011) *Solid State Sci* 13:115-119. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.021>
- 22 Kononova NG, Shevchenko VS, Kokh AE, Bolatov AK, Uralbekov BM, et al (2017) *Cryst Res Technol* 52:1700024. <https://doi.org/10.1002/crat.201700024>
- 23 Akella A, Keszler DA (1995) *Mater Res Bull* 30:105-111. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(94\)00113-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(94)00113-8)
- 24 Tang H, Li Y, Yang R, Gao W (2019) *J Lumin* 208:253-258. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.12.058>
- 25 Geng W, Zhou X, Ding J, Wang Y (2018) *J Am Ceram Soc* 101:4560-4571. <https://doi.org/10.1111/jace.15693>
- 26 Peng Y, Lian Z, Zhang L, Shen G, Wang X, Yan Q (2014) *Mater Express* 4:533-538. <https://doi.org/10.1166/mex.2014.1195>
- 27 Freidzon AY, Kurbatov IA., Vovna VI (2018) *Phys Chem Chem Phys* 20:14564-14577. <https://doi.org/10.1039/C7CP08366A>