

УДК 546.07'273.48.54

СИНТЕЗ И ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОФОСФОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕТРАБОРАТА КАДМИЯ

© 2021 г. Т. Н. Хамаганова*

Байкальский институт природопользования СО Российской академии наук,
ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: khama@binm.ru

Поступила в редакцию 04.02.2021 г.

После доработки 26.03.2021 г.

Принята к публикации 28.03.2021 г.

Методом твердофазного синтеза получены новые фазы $\text{CdB}_4\text{O}_7:x\text{Cr}^{3+}$ ($x = 3, 5, 7$ мол. %). Полученные фазы переменного состава изучены методами порошковой рентгенографии, дифференциальной сканирующей калориметрии. Установлена изоструктурность синтезированных образцов между собой и с тетраборатом CdB_4O_7 (пр. гр. *Pbca*). Исследованы термолюминесцентные свойства кристаллофосфоров CdB_4O_7 , легированных ионами Cr^{3+} и Mn^{2+} , возбуждаемых ультрафиолетом.

Ключевые слова: тетраборат кадмия, поликристаллы, термолуинофоры

DOI: 10.31857/S0002337X21080182

ВВЕДЕНИЕ

Материалы на основе неорганических кислородсодержащих соединений бора отличаются широким спектром практического использования. Среди них найдены лазерные, оптические, пьезо-, акустоэлектрические и люминесцентные материалы. Для создания эффективных люминофоров ведется интенсивный поиск новых твердотельных матриц. Бораты, обладающие широкой областью прозрачности наряду с высокой химической и термической устойчивостью, являются перспективными материалами для использования в светодиодах, электро- и плазменных панелях, трехмерных дисплеях и т.д. [1–3]. В качестве твердотельных матриц рассматриваются некоторые бораты одно- и двухвалентных металлов, активно исследуются их термолюминесцентные свойства [4–9]. Ведется поиск боратов, проявляющих люминесценцию при введении активаторов, в состав которых входят другие катионы.

Известно, что соединения кадмия проявляют эффективную люминесценцию при добавлении ионов Mn^{2+} [10, 11]. Ионы Mn^{2+} с электронной конфигурацией $3d^5$ показывают широкую полосу излучения и как центр свечения важны для создания новой светотехники. Так, спектры порошкового бората $\text{Cd}_2\text{B}_2\text{O}_5$, легированного ионами Mn^{2+} , показали термолюминесценцию при возбуждении ультрафиолетом [12], а бораты CdB_4O_7 и $\text{Cd}_2\text{B}_6\text{O}_{11}$ при введении ничтожно малых количеств этих ионов прояв-

ляли оранжевое свечение при возбуждении катодными лучами [13].

Положение низшего возбужденного состояния Mn^{2+} сильно зависит от напряженности кристаллического поля, что позволяет смещать цвет излучения замещенных центров с зеленого на красный. Тетраэдрически координированный Mn^{2+} (слабое кристаллическое поле) обычно дает зеленое излучение, тогда как октаэдрически координированный Mn^{2+} (сильное кристаллическое поле) — оранжево-красное излучение [14].

Настоящая работа является продолжением исследования [15] по синтезу и термолюминесценции твердых растворов тетраборатов CdB_4O_7 , активированных ионами Mn^{2+} и Tb^{3+} , проявляющих эмиссию при возбуждении излучением стронций-иттриевого β -источника.

Цель настоящей работы — получение поликристаллических образцов фаз на основе CdB_4O_7 , легированных ионами переходных металлов (Cr^{3+} , Mn^{2+}), и установление областей их возможного использования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Режимы синтеза $\text{CdB}_4\text{O}_7:x\text{Mn}^{2+}$ описаны нами ранее [15]. В настоящей работе получены и описаны фазы, активированные ионами Cr^{3+} .

Серия из трех поликристаллических боратов составов $\text{CdB}_4\text{O}_7:x\text{Cr}^{3+}$ ($x = 3, 5, 7$ мол. %) получе-

Таблица 1. Кристаллографические и термические характеристики порошков CdB_4O_7 , активированных ионами Cr^{3+} (пр. гр. *Pbca*, $Z = 8$)

Фаза	$a, \text{\AA}$	$b, \text{\AA}$	$c, \text{\AA}$	$V, \text{\AA}^3$	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$
CdB_4O_7 [15]	8.229(1)	8.704(2)	14.1800(7)	1015.7	976
CdB_4O_7 [16]	8.229(1)	8.704(1)	14.1760(2)	1015.4	
$\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Cr}^{3+}$ (3 мол. %)	8.2263(5)	8.7099(8)	14.174(1)	1015.6	974
$\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Cr}^{3+}$ (5 мол. %)	8.2222(5)	8.7080(9)	14.1612(7)	1013.9	
$\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Cr}^{3+}$ (7 мол. %)	8.2187(5)	8.7052(9)	14.1571(7)	1012.8	

на твердофазными реакциями. Исходными реагентами служили H_3BO_3 квалификации “х. ч.” и предварительно прокаленные CdO , Cr_2O_3 квалификации “ч. д. а.”. Для компенсации потерь B_2O_3 в процессе отжига использовали незначительный избыток H_3BO_3 . Реакционные смеси подвергали многоступенчатой термообработке на воздухе при 400–850°C в течение 230–250 ч. Ступенчатый нагрев чередовали с перетираниями через каждые 20–30 ч для гомогенизации смесей. После прокаливания образцы боратов медленно охлаждались в режиме остывания печи. Равновесие реакции считалось достигнутым, если фазовый состав прокаленных образцов не менялся при двух последовательных отжигах. Идентификацию продуктов синтеза выполняли методом рентгенофазового анализа (РФА). В результате синтеза получены однофазные поликристаллические порошки серо-зеленого цвета.

РФА образцов проводили по дифрактограммам, снятым на порошковом автодифрактометре Bruker D-8 ADVANCE AXS ($\text{CuK}\alpha$ -излучение) с детектором VANTEC-1 в интервале углов $2\theta = 10^\circ\text{--}60^\circ$ с шагом 0.02° . Фазы идентифицировали с помощью базы данных PDF-2. Индексирование рентгенограмм синтезированных образцов проводили методом структурной аналогии с использованием кристаллографических данных CdB_4O_7 [16]. Параметры элементарных ячеек полученных фаз, уточненные по программе TOPAS-4, приведены в табл. 1.

Термический анализ бората $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Cr}^{3+}$ (3 мол. %) проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на термоанализаторе Jupiter STA 449C фирмы NETZSCH. Съемку осуществляли в интервале температур 25–1000°C при скорости нагрева 10°C/мин в атмосфере аргона.

Люминесцентные свойства полученных боратов изучали регистрацией кривых высвечивания по методике [17]. Кривые высвечивания снимали в интервале 25–400°C на оригинальной установке, описанной в [15]. В качестве возбуждающего радиационного источника использовали облучатель УФ кварцевый марки ОУФК-09-1 со спек-

тральным диапазоном излучений 205–315 нм. Время экспозиции облучателя составляло 5–15 мин. Регистрация спектров осуществлялась с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с диапазоном регистрации 300–600 нм. Результаты измерений термолюминесцентной чувствительности нормировали по сигналу от эталона — LiF:Mg,Ti (TLD-100).

Спектры возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ) и фотолюминесценции (ФЛ) предварительно таблетированных образцов снимали на люминесцентном спектрометре LS 55 фирмы Perkin Elmer. Спектры ФЛ регистрировали при комнатной температуре в диапазоне длин волн от 200 до 900 нм. В качестве источника возбуждения использована импульсная ксеноновая лампа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В кристаллической структуре CdB_4O_7 выделены двойные идентичные друг другу борокислородные сетки, содержащие однотипные боратные единицы [16]. Боратные единицы характеризуются как изолированный полианион, обнаруженный в структуре буры [18], который состоит из четырех искаженных боратных полиэдров. Атомы бора в структуре проявляют двоякую координацию, половина из них имеет КЧ = 4. Координационное окружение атомов кадмия представлено четырьмя кислородными атомами, формирующими искаженные тетраэдры.

Анализ фазового состава синтезируемых образцов показал, что формирование боратов начинается в интервале 650–700°C и нарастает с повышением температуры до 800–850°C. По данным РФА, все исследованные образцы были однофазными, рефлексы примесных фаз не обнаружены.

Положения линий на рентгенограммах и относительные интенсивности искоемых фаз, прокаленных при 850°C в течение 150 ч, соответствуют тетраборату кадмия, кристаллизующемуся в ромбической сингонии (пр. гр. *Pbca*) согласно Card # 01-071-2169 Международного центра дифракционных данных ICDD.

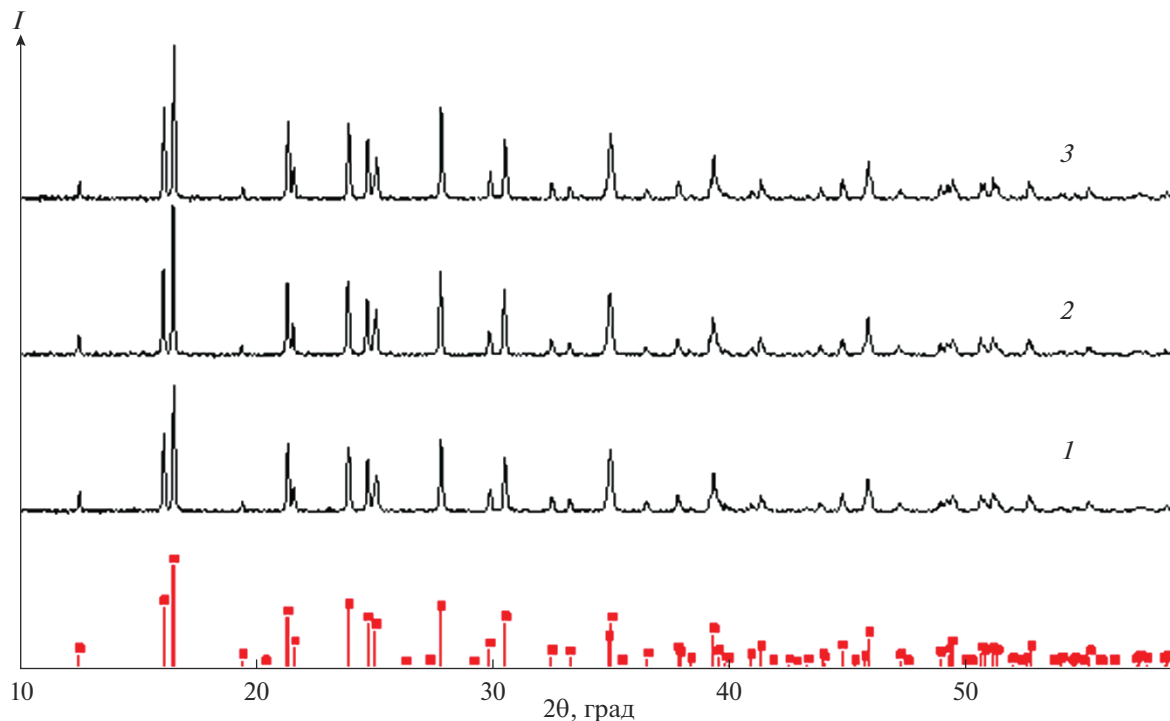


Рис. 1. Рентгенограммы $\text{Cd}_{1-x}\text{B}_4\text{O}_7:x \text{Cr}^{3+}$ с $x = 3$ (1), 5 (2), 7 мол. % (3) и CdB_4O_7 (PDF-2 Data Base: Card # 01-071-2169).

На рис. 1 приведены рентгенограммы синтезированных боратов и эталона. Видно, что все линии полученных фаз соответствуют CdB_4O_7 . В соответствии с этим рентгенограммы легированных фаз были проиндексированы в ромбической установке. По результатам индексирования дифрактограмм параметры ромбических ячеек $\text{CdB}_4\text{O}_7:x\text{Cr}^{3+}$ изменяются практически линейно в исследованном диапазоне концентраций ($0 \leq x \leq 0.07$), что указывает на образование непрерывного ряда твердых растворов (табл. 1). Сопоставление вычисленных параметров кристаллических решеток твердых растворов, содержащих ионы хрома, с параметрами решеток фаз, легированных ионами марганца [15], показало их согласие. Параметры элементарных ячеек в обоих случаях монотонно сокращаются, что связано с величинами радиусов катионов, вводимых в структуру тетрабората кадмия. Полагаем, что меньший радиус ионов-активаторов по сравнению с размерами ионов матрицы (Cd^{2+}) способствует их равномерному распределению по структурным позициям.

По результатам ДСК, на кривой нагрева имеет один эндотермический эффект при 974°C , отнесенный к процессу плавления образца (рис. 2). Масса образца оставалась неизменной на протяжении всего процесса подъема температуры вплоть до плавления. Температура плавления легированной хромом фазы близка к температуре плавления чи-

стого тетрабората кадмия ($t_{\text{пл}} = 976^\circ\text{C}$), установленной в [15].

Для фаз переменного состава $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{Cr}^{3+}$ и $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{Mn}^{2+}$ с $x = 3, 5, 7$ мол. % получены зависимости интенсивности термолюминесценции от содержания активатора при возбуждении ультрафиолетовым излучением.

Фазы $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ дополнительно изучены после воздействия на них рентгеном. Физико-химический эффект, возникающий при взаимодействии излучения с веществом, состоит в следующем. Некоторые вещества под воздействием внешнего возбуждения способны люминесцировать. В них под

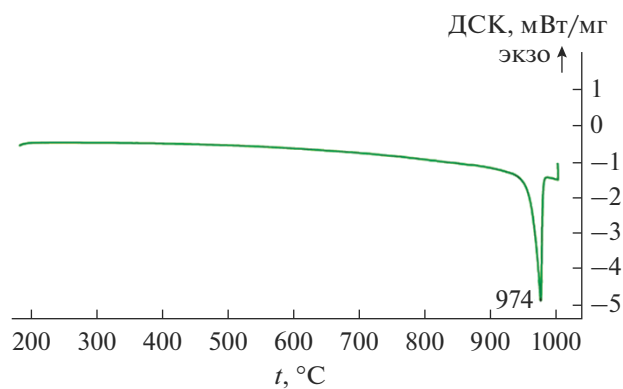


Рис. 2. Кривая нагрева $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Cr}^{3+}$ (3 мол. %).

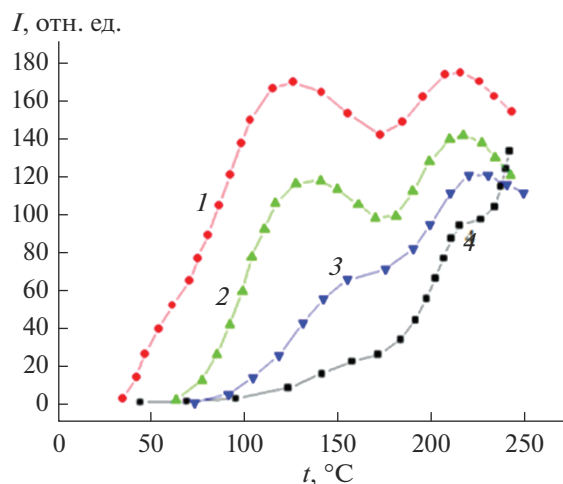


Рис. 3. Кривые термического высвечивания образцов $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{Cr}^{3+}$ с $x = 3$ (1), 5 (2), 7 мол. % (3), TLD-100 (4) при возбуждении УФ в течение 20 мин.

действием ионизирующего излучения высокой энергии выбиваются электроны, локализуемые в центрах захвата (центры свечения), которыми обычно становятся дефекты кристаллической решетки [17]. Введенные в кристаллическую структуру активные ионы хрома и марганца становятся такими центрами свечения фосфора, в которых происходит накопление поглощенной энергии. При таком внешнем воздействии, как быстрый нагрев материала, вся поглощенная при УФ-возбуждении энергия высвобождается наружу. Процесс выброса накопленной энергии сопровождается свечением, которое фиксируется с помощью ФЭУ. В ходе настоящего исследования кривые свечения получены при продолжительностях воздействия УФ-облучателя в течение 5, 10, 15, 20 мин и рентгеном 6 мин. Максимальный выход люминесценции наблюдался при наиболее длительном воздействии УФ на образцы с активными ионами хрома.

На рис. 3 представлены кривые термического высвечивания порошков $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{Cr}^{3+}$ ($x = 3, 5, 7$ мол. %) и эталона при облучении УФ в течение 20 мин. Анализ регистрируемых спектров выявил влияние концентрации активаторов на интенсивность люминесценции. Эффективная люминесценция уменьшается с ростом концентрации ионов Cr^{3+} , а максимум свечения соответствует фазе с минимальным содержанием хрома.

Кривые термического высвечивания образцов твердых растворов $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$, возбужденных ультрафиолетом и рентгеном, приведены на рис. 4. Интенсивность люминесценции материалов сильно зависит от типа возбуждающего излучения. Свечение УФ-облученных образцов почти в 5 раз выше, чем образцов, облученных рентгеном. Сравне-

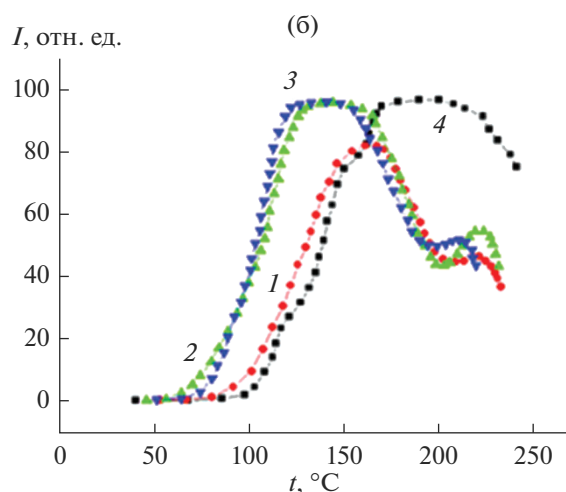
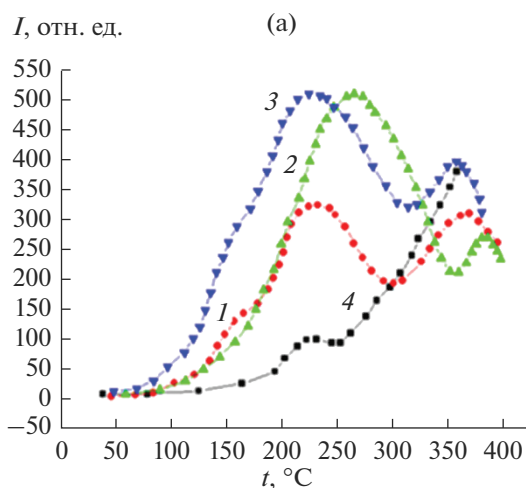


Рис. 4. Кривые термического высвечивания образцов $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{Mn}^{2+}$ с $x = 3$ (1), 5 (2), 7 мол. % (3), TLD-100 (4) при возбуждении УФ в течение 10 мин (а) и рентгеном в течение 6 мин (б).

ние показывает, что независимо от источника возбуждения интенсивность люминесценции фаз $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ имеет тенденцию роста при повышении содержания активатора. Она становится максимальной при 5 мол. % Mn и практически не изменяется с ростом содержания Mn^{2+} . Отмечена разница в интенсивностях люминесценции УФ-облученных боратов, допированных ионами Cr^{3+} и Mn^{2+} . Интенсивность свечения марганецсодержащих боратов почти в три раза выше, чем хромсодержащих.

На рис. 5 приведены спектры ФЛ и ВФЛ $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ (5 мол. %). Узкая полоса около 210 нм в спектре ВФЛ (а) отнесена к УФ-поглощению решетки боратной матрицы. Для исходной матрицы край поглощения с $\lambda < 250$ нм благоприятен, поскольку не конкурирует с полосой ртутного резонанса (254 нм), используемого в люминес-

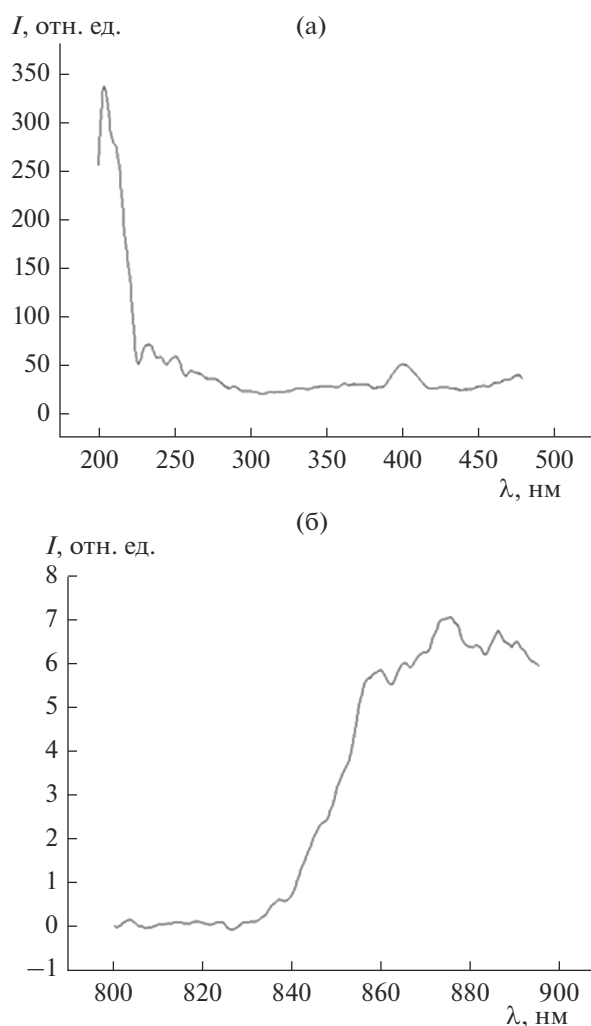


Рис. 5. Спектры ВФЛ (а), ФЛ (б) $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ (5 мол. %).

центных лампах [10]. Полоса возбуждения вблизи 400 нм связана с переходом между $3d$ -состояниями ионов Mn^{2+} . Она наблюдалась при излучении Mn^{2+} в других решетках, например $\text{MgGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}$ [19]. Спектр ФЛ представляет собой широкую “полосу” линий с максимумом ~875 нм. Сдвиг “полосы” в область больших длин волн, по-видимому, связан со значительным искажением тетраэдрического окружения Mn^{2+} в структуре тетрабората кадмия и усилением кристаллического поля замещенных центров, приводящим к расщеплению электронных уровней. Такого рода аномальное излучение Mn^{2+} обнаружено недавно в $\alpha\text{-LiZnBO}_3:\text{Mn}^{2+}$ [20], $\beta\text{-Zn}_3\text{B}_2\text{O}_6:\text{Mn}^{2+}$ [21].

Полученные результаты показывают, что фазы CdB_4O_7 , легированные переходными металлами (Cr, Mn), можно рассматривать как перспективные в качестве термолуминофоров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поликристаллические бораты $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{ Cr}^{3+}$ ($x = 3, 5, 7$ мол. %) синтезированы твердофазным методом в интервале температур 400–850°C с использованием в качестве исходных компонентов оксидов CdO , Cr_2O_3 и борной кислоты H_3BO_3 . Установлено, что введение активных ионов приводит к образованию фаз переменного состава на основе тетрабората кадмия, кристаллизующихся в одном структурном типе (пр. гр. *Pbca*).

Показано, что энергия возбуждения УФ достаточна для проявления термолюминесценции изученными фазами $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{ Cr}^{3+}$ и $\text{CdB}_4\text{O}_7:x \text{ Mn}^{2+}$ ($x = 3, 5, 7$ мол. %). Отмечено снижение эффективности свечения в ряду хромсодержащих боратов при увеличении концентрации активных ионов. Содержание ионов активатора в количестве 3 мол. % Cr^{3+} и 5 мол. % Mn^{2+} приводит к максимальной интенсивности излучения образцов. Спектры ФЛ показали, что $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ (5 мол. %) может возбуждаться при ~210 нм. Для тетраэдрически координированного Mn^{2+} наблюдается аномальное красное излучение вследствие расщепления его электронных уровней.

Таким образом, фазы CdB_4O_7 , легированные переходными металлами (Cr, Mn), перспективны как твердофазные термолюминесцентные матрицы, эффективно возбуждаемые УФ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН проект № V.45.1.8 (№ ГР АААА-А17-117021310256-9) с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН (Улан-Удэ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li P., Yang Z., Pang L., Wang Z., Guo Q. Luminescent Characteristics of $\text{Ba}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4:\text{Eu}^{3+}$ Phosphor for White LED // J. Rare Earth. 2008. V. 26. P. 44–47. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(08\)60034-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(08)60034-4)
2. Simura R., Kawai S., Sugiyama K., Yanagida T., Sugawara T., Shishido T., Yoshikawa A. Valence State of Dopant and Scintillation Properties of Ce-doped $\text{Sr}_3\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ Crystal // J. Cryst. Growth. 2013. V. 362. P. 296–299. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.11.089>
3. Santiago M., Grasselli C., Caselli E., Lester M., Lavat A., Spano F. Thermoluminescence of $\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$ // Phys. Status Solidi A. 2001. V. 185. № 2. P. 285–289. [https://doi.org/10.1002/1521-396X\(200106\)185:2<285::AID-PSSA285>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1521-396X(200106)185:2<285::AID-PSSA285>3.0.CO;2-9)
4. Wu L., Sun J.C., Zhang Y., Jin S.F., Kong Y.F., Xu J.J. Structure Determination and Relative Properties of Novel Chiral Orthoborate KMgBO_3 // Inorg. Chem. 2010. V. 49. № 6. P. 2715–2720. <https://doi.org/10.1021/ic901963t>

5. Jiang L.H., Zhang Y.L., Li C.Y., Hao J.Q., Su Q. Thermoluminescence Properties of Ce^{3+} -doped $\text{LiSr}_4(\text{BO}_3)_3$ Phosphor // *Mater. Lett.* 2007. V. 61. P. 5107–5109.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.04.016>
6. Liu L., Zhang Y., Hao J., Li C., Wang S., Su Q. Thermoluminescence Studies $\text{LiBa}_2\text{B}_5\text{O}_{10}:\text{Re}^{3+}$ (Re = Dy, Tb, Tm) // *J. Phys. Chem. Solids.* 2007. V. 68. P. 1745–1748.
<https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2007.04.020>
7. Huy B.T., Quang V.X., Chau H.T.B. Effect of Doping on the Luminescence Properties of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ // *J. Lumin.* 2008. V. 128. P. 1601–1605.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2008.03.007>
8. Un A. Investigation of Dopant Effect on Some TL Dosimeters Containing Boron // *Radiat. Phys. Chem.* 2013. V. 85. P. 23–35.
<http://dx.org/10.1016/j.radphyschem.2012.10.016>
9. Cai G.M., Yang N., Liu H.X., Zhang Y.Q., Si J.Y. Single-phased and Color Tunable $\text{LiSrBO}_3:\text{Dy}^{3+}, \text{Tm}^{3+}, \text{Eu}^{3+}$ Phosphors for White-Light-Emitting Application // *J. Lumin.* 2017. V. 187. P. 211–220.
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2017.03.017>
10. Wanmaker W.L., Verriet J.C., ter Vrugt J.W. Manganese-Activated Luminescence in $\text{Cd}/2\text{PO}/4\text{F}$ // *Phil. Res. Rep.* 1972. V. 27. P. 350–357.
11. Blasse G. The Luminescence of the Gd(II) Ion and of Cadmium Compounds // *J. Alloys Compd.* 1994. V. 210. P. 71–73.
12. Dittmann R., Hahn D., Müller U. On the Luminescence and Thermoluminescence of Manganese Activated Cadmium Borate // *J. Lumin.* 1970. V. 3. № 3. P. 230–239.
[https://doi.org/10.1016/0022-2313\(71\)90060-3](https://doi.org/10.1016/0022-2313(71)90060-3)
13. Hummel F.A., Subbarao E.C. The System Cadmium Oxide-Boric Oxide // *J. Electrochem. Soc.* 1957. V. 104. P. 616–618.
14. Blasse G., Grabmaier B.C. A General Introduction to Luminescent Materials // *Luminescent Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994. P. 232.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-79017-1_1
15. Хамаганова Т.Н., Хумаева Т.Г., Субанакоев А.К., Перевалов А.В. Синтез и термолюминесцентные свойства $\text{CdB}_4\text{O}_7:\text{Tb}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$ // *Неорган. материалы*. 2017. Т. 53. № 1. С. 59–63.
<https://doi.org/10.7868/S0002337X17010109>
16. Ihara M., Krogh-Moe J. Crystal Structure of Cadmium Diborate $\text{CdO} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ // *Acta Crystallogr.* 1966. V. 20. P. 132–134.
<https://doi.org/10.1107/S0365110X66000239>
17. Daniels F., Boyd C.A., Saunders D.F. Thermoluminescence as a Research Tool // *Science*. 1953. V. 117. P. 343–349.
<https://doi.org/10.1126/science.117.3040.343>
18. Morimoto N. The Crystal Structure of Borax // *Mineral. J.* 1956. V. 2. № 1. P. 1–18.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/minerj1953/2/1/2_1_1/_pdf
19. Palumbo D.T., Brown J.J. Electronic States of Mn^{2+} -Activated Phosphors: I. Green-Emitting Phosphors // *J. Electrochem. Soc.* 1970. V. 117. P. 1184–1188.
<https://doi.org/10.1149/1.2407765>
20. Wang H., Wu L., Yi H., Wang B., Wu L., Gao Y., Zhang Y. Abnormal Luminescent Property of Mn^{2+} in $\alpha\text{-LiZn-BO}_3:\text{Mn}^{2+}$ // *Dalton Trans.* 2015. V. 44. P. 1427–1434.
<https://doi.org/10.1039/c4dt02626h>
21. Shi Y., Wen Y., Que M., Zhu G., Wang Y. Structure, Photoluminescent and Cathodoluminescent Properties of a Rare-Earth Free Red Emitting $\beta\text{-Zn}_3\text{B}_2\text{O}_6:\text{Mn}^{2+}$ Phosphor // *Dalton Trans.* 2014. V. 43. P. 2418–2423.
<https://doi.org/10.1039/C3DT52405A>