

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

УДК 544.344.01; 54-165; 546.161+548.5; 535.37

ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ ФЛЮОРИТОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ $\text{CdF}_2\text{—PbF}_2\text{—MnF}_2$ И ИХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 2020 г. И. И. Бучинская^{1,*}, С. Х. Батыгов², А. Г. Иванова¹¹Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*E-mail: buchinskayaii@gmail.com

Поступила в редакцию 10.01.2020 г.

После доработки 07.02.2020 г.

Принята к публикации 10.02.2020 г.

Концентрационная серия кристаллов твердого раствора $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_{2+x}$ ($0 \leq x \leq 0.7$) и кристалл $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ выращены из расплава методом вертикальной направленной кристаллизации (Бриджмена) во фторирующей атмосфере. Однофазные кристаллы флюоритовой структуры получены при легировании $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ фторидом марганца вплоть до 5 мол. %. При более высоком содержании MnF_2 в кристаллах выпадает примесная тетрагональная фаза, изоструктурная группе соединений Ba_2MF_6 ($M = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Zn}$). Проведены исследования оптического поглощения и люминесценции кристаллов $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ и $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$. Спектры поглощения указывают на октаэдрическую симметрию окружения ионов Mn^{2+} в трехкомпонентном кристалле $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$. Широкая полоса люминесценции Mn^{2+} в $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$ с максимумом 605 нм наблюдается только при 77 К.

DOI: 10.31857/S0023476120040074

ВВЕДЕНИЕ

Дифторид кадмия и высокотемпературная модификация дифторида свинца кристаллизуются в структурном типе флюорита с параметрами кристаллической решетки $a = 5.388$ и 5.940 \AA соответственно [1, 2]. В системе $\text{PbF}_2\text{—CdF}_2$ образуется непрерывный флюоритовый твердый раствор $\text{Pb}_{1-x}\text{Cd}_x\text{F}_2$ ($0 \leq x \leq 1$) с минимумом на кривых плавкости при $x = 0.33 \pm 0.02$ и температуре $T_{\text{пл}} = 745 \pm 5^\circ\text{C}$ [2, 3]. Структурные исследования и исследования методом ядерного магнитного резонанса твердого раствора состава $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ свидетельствуют о существовании тетрагональных упорядоченных кластеров Pb_2CdF_6 при сохранении кубической макросимметрии [4–7]. Кристаллы $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ выращивались неоднократно [8–11]. Высокие плотность и радиационная стойкость в сочетании с относительно низкой температурой плавления делают их перспективными конструкционными и функциональными оптическими материалами [12, 13].

Некоторые оптические и радиационные характеристики кристаллов $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ и влияние на них ряда примесей изучались в [14]. Кристаллический материал $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ имеет низкий уровень световыходов (<0.1% от $\text{NaI} : \text{Tl}$) и является

радиатором черенковского излучения. Из всех исследованных примесей только MnF_2 изменяет люминесцентные характеристики $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ (увеличивает световыход до уровня ~0.5% от $\text{NaI} : \text{Tl}$, при этом значительно увеличивает время высвечивания >300 нс).

Для кристаллов твердого раствора $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ при концентрациях $0.05 < x < 0.07$ обнаружен максимальный световыход (~2000 фотонов/МэВ) на длине волны $\lambda \approx 550 \text{ нм}$ [14] (при $x > 0.02$ эти кристаллы достигают радиационной стойкости 10 Мрад). Люминесценция CdF_2 и кубического PbF_2 , слабелегированных Mn^{2+} , изучалась в [15] и [16] соответственно.

Представляется интересным продолжить исследование оптических свойств смешанных кристаллов $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$.

Фазовые диаграммы систем $\text{PbF}_2\text{—MnF}_2$ [17, 18] и $\text{CdF}_2\text{—MnF}_2$ [19] известны. В первой образуется тетрагональное соединение Pb_2MnF_6 , которое отнесено к пр. гр. $P4_2/nbc$ с параметрами элементарной ячейки $a = 7.98$, $c = 16.92 \text{ \AA}$ [17, 18, 20]. Есть данные о существовании PbMnF_4 [21]. Твердых растворов на основе компонентов в этой системе не обнаружено. Во второй системе существует обширная область флюоритового твердого раствора

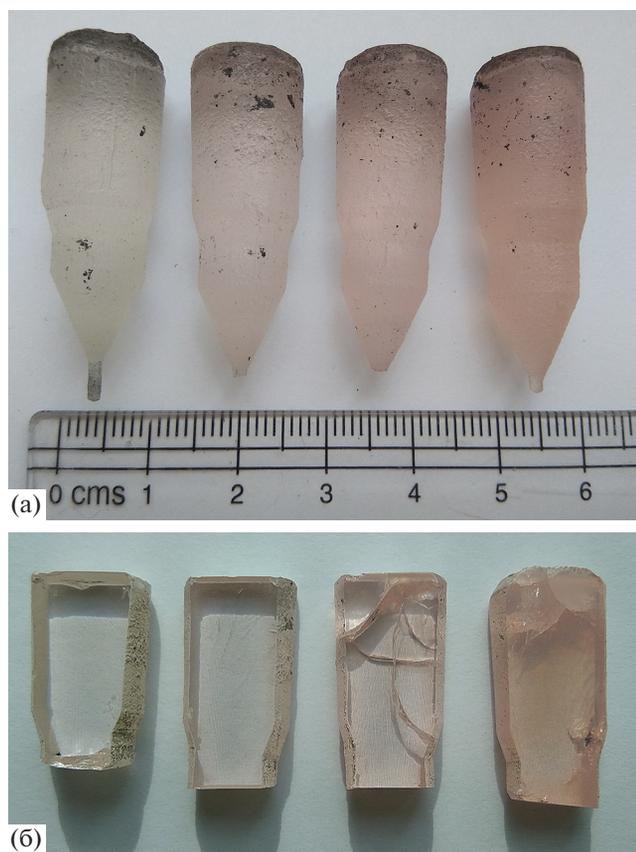


Рис. 1. Кристаллы $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ ($0.01 \leq x \leq 0.07$), выращенные (а) и просветленные для оптического просмотра (б).

$\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ вплоть до $x \leq 0.79$. На основании этого в тройной системе $\text{CdF}_2\text{—PbF}_2\text{—MnF}_2$ можно ожидать образования флюоритового твердого раствора $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$.

Цель данной работы – выращивание кристаллов твердого раствора $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$, определение предела вхождения в него ионов Mn^{2+} (x) и изучение спектроскопических характеристик образца с максимальной концентрацией Mn^{2+} .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выращивание кристаллов $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ с $x = 0, 0.01, 0.03, 0.05, 0.07$ проводили методом вертикальной направленной кристаллизации (методом Бриджмена) в открытом многоячейстом графитовом тигле в смешанной атмосфере He и продуктов пиролиза тетрафторэтилена. В качестве исходных веществ использовали коммерческие реактивы марки “х. ч.”, предварительно высушенные в вакууме и проплавленные во фторирующей атмосфере для очистки от кислородсодержащих примесей. Температурный градиент в ростовой зоне составлял ~ 50 К/см, ско-

рость опускания тигля – 3.5 мм/ч. Потери вещества в процессе выращивания не превышали 2% от массы исходной загрузки. Для сравнительных исследований в аналогичных условиях выращен кристалл состава по шихте $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$.

Фазовый состав и параметры элементарной ячейки полученных кристаллов определяли методом порошкового рентгенофазового анализа (РФА). Съемку рентгенограмм проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku-MiniFlex 600 (Rigaku, Япония) с использованием излучения CuK_α в диапазоне углов 2θ от 10° до 100° . Идентификацию фаз выполняли в программе PXDRL (Rigaku, Япония) по базе данных ICDD PDF-2 (версия 2017). Параметры элементарных ячеек определяли по программе DICVOL [22] и уточняли методом Ле Бейла [23] в программе Jana2006 [24].

Спектры поглощения измеряли на спектрофотометре Cary 5000 в диапазоне длин волн 300–600 нм.

Спектры люминесценции возбуждали светодиодами с разной длиной волны излучения и измеряли на миниспектрометре FSD-10 при $T = 77$ и 300 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выращенные кристаллы $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ имели розоватую окраску (рис. 1), интенсивность которой нарастала с увеличением содержания марганца. Окраска свидетельствовала о присутствии ионов Mn^{2+} , хотя нельзя исключать наличия других валентных состояний. В кристаллах, содержащих по шихте 3, 5 и 7 мол. % MnF_2 , наблюдалась ячеистая субструктура, вызванная концентрационным переохлаждением расплава при направленной кристаллизации. В кристалле с 7 мол. % MnF_2 присутствовали видимые глазом мелкодисперсные включения, количество которых увеличивалось к его верхней части.

Рентгенофазовый анализ показал, что кристаллы, выращенные из шихты состава $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ с добавлением MnF_2 1 и 3 мол. %, полностью однофазны, имеют флюоритовую структуру (пр. гр. $Fm\bar{3}m$) (рис. 2, спектр 1). При содержании 5 мол. % MnF_2 по шихте (рис. 2, спектры 2, 3) в самой верхней части кристалла фиксируются следы второй фазы, содержание которой увеличивается с ростом концентрации MnF_2 в шихте (рис. 2, спектр 4). Рефлексы примесной фазы проиндексированы в тетрагональной сингонии (пр. гр. $I4/mmm$) с параметрами решетки $a = 4.0127(1)$ и $c = 16.8983(1)$ Å. Эта флюоритоподобная фаза изоструктурна группе соединений Ba_2MF_6 ($M = \text{Mn}, \text{Co}, \text{Zn}$) [25, 26] с близкими значениями параметров решетки. Вероятно, тетрагональная флюоритоподобная фаза образуется на основе соедине-

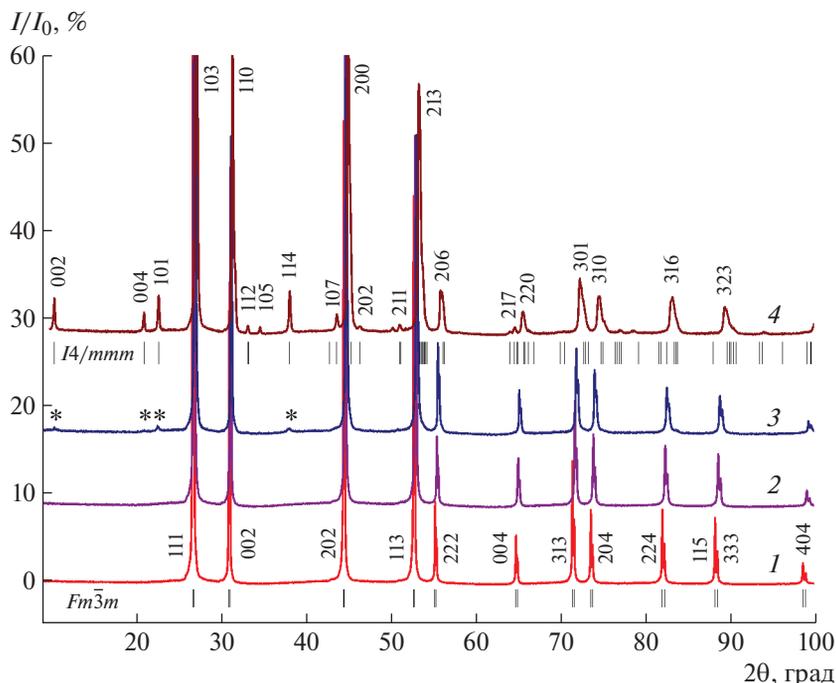


Рис. 2. Рентгенограммы образцов в системе $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2\text{--MnF}_2$: 1 – 1 мол. % MnF_2 ; 2 – 5 мол. % MnF_2 , низ кристалла; 3 – 5 мол. % MnF_2 , верх кристалла (* – появление примесной фазы); 4 – 7 мол. % MnF_2 . Показаны положения рефлексов Брэгга для фаз пр. гр. $Fm\bar{3}m$ и $I4/mmm$.

ния Pb_2MnF_6 , в котором один или оба катиона частично замещены Cd^{2+} .

В результате кристаллизации из расплава флюорита смешанного состава $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$, содержащего ионы Mn^{2+} с меньшим ионным радиусом, чем у Pb^{2+} и Cd^{2+} [27], происходит закономерное уменьшение параметра элементарной ячейки. Параметр решетки флюоритовой фазы изменяется от 5.75(9) Å для $\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33}\text{F}_2$ (что полностью совпадает с ранее полученным значением 5.75963 ± 0.00007 Å [28]) до 5.70(9) Å для кристалла с 7 мол. % MnF_2 (рис. 3).

Кристалл с составом по шихте $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ однофазный, принадлежит структурному типу флюорита. Его параметр элементарной ячейки изменяется от 5.37(4) Å для нижней части до 5.36(4) Å для верхней. По зависимости параметра решетки от состава [19]: $a = 5.3888 - 0.19x$, проведена оценка изменения состава кристалла по длине в результате направленной кристаллизации. Выявлено, что содержание в нем MnF_2 изменяется от 6 до 8 мол. %. Вероятно, центральная часть кристалла близка по составу к составу исходной шихты.

Образцы для спектроскопических исследований были вырезаны из средних по длине частей выращенных кристаллов. На рис. 4 показаны их спектры поглощения, а также спектр поглощения

кристалла MnF_2 , полученного в [29]. Спектры содержат полосы, обусловленные электронными переходами в ионе Mn^{2+} . Спектр поглощения исследуемого кристалла $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ отличается от спектра возбуждения, приведенного в [15], наличием сложной структуры в полосе 400 нм, свя-

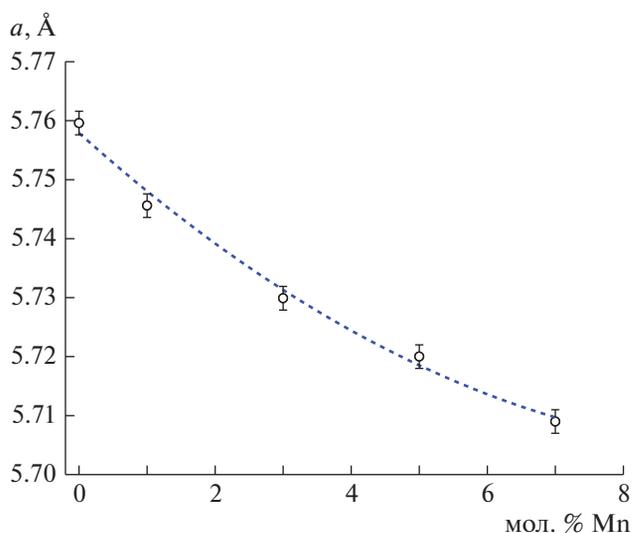


Рис. 3. Зависимость параметра флюоритовой фазы в кристаллах $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ от содержания Mn^{2+} .

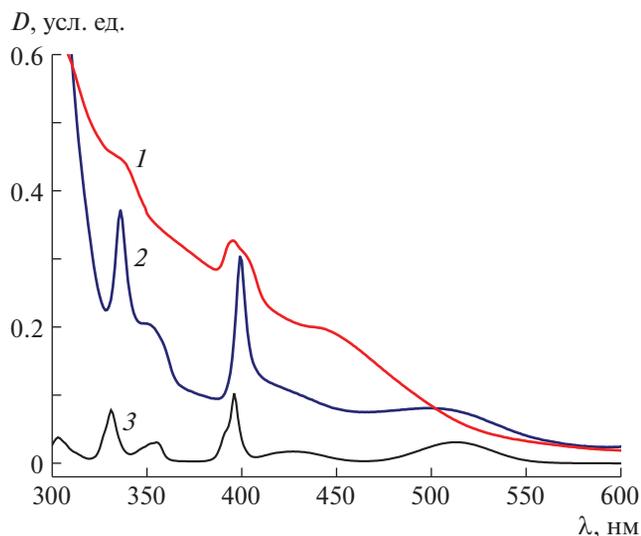


Рис. 4. Спектры поглощения $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ (1), $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$ (2) и MnF_2 (3).

занной с переходом ${}^6A_1 \rightarrow {}^4E, {}^4A_1(G)$ в ионе Mn^{2+} . В [16, 30–32] сложная структура этой полосы в кристаллах флюоритовой структуры объяснялась образованием центров Mn^{2+} с некубической симметрией, но для кристалла $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ более вероятным представляется перекрытие перехода ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_2(G)$ с переходом ${}^6A_1 \rightarrow {}^4E, {}^4A_1(G)$ (рис. 4, кривая 1). Спектр поглощения Mn^{2+} в матрице $\text{Cd}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{F}_2$, также имеющей кубическую структуру, значительно отличается от спектра в $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$, в то же время положения полос Mn^{2+} в $\text{Cd}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{F}_2$ близки к положениям полос поглощения в MnF_2 , имеющем структуру рутила (кривая 3). Положения полос поглощения и соответствующие переходы в ионах марганца в разных матрицах приведены в табл. 1.

Для уточнения положений полос использовалась диаграмма Танабе–Сугано (рис. 5). Параметры Рака B и кристаллического поля Δ рассчиты-

вали с использованием перехода ${}^6A_1 \rightarrow {}^4A_1, {}^4E(G)$, соответствующего полосе поглощения в области 400 нм, положение которой слабо зависит от силы кристаллического поля, и перехода ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_1(G)$, соответствующего наиболее длинноволновой полосе поглощения. Разности энергий этих полос соответствуют значениям Δ/B , отмеченным вертикальными линиями на рис. 5. Значения B и Δ , рассчитанные с использованием значений Δ/B , приведены в табл. 1. Величина Δ для $\text{Cd}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{F}_2$ (756 см^{-1}) ближе к его величине в MnF_2 (813 см^{-1}), чем в CdF_2 (480 см^{-1}), что дает основание предполагать октаэдрическую симметрию окружения Mn^{2+} в $\text{Cd}_{0.67}\text{Pb}_{0.33}\text{F}_2$.

Спектры люминесценции образцов состава $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ и $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$ показаны на рис. 6. Спектр люминесценции образца $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ при комнатной температуре состоит из полосы с максимумом при 522 нм и полушириной 55 нм, приписанной переходу ${}^4T_1(G) \rightarrow {}^6A_1$ в ионе Mn^{2+} [15]. Охлаждение до $T = 77 \text{ К}$ вызывает смещение максимума на 531 нм и уменьшение полуширины полосы до 34 нм.

В образце $(\text{Cd}_{0.67}\text{Pb}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$ при комнатной температуре люминесценция Mn^{2+} не возбуждается, но при охлаждении до 77 К появляется полоса люминесценции с максимумом при 605 нм и полушириной 59 нм. Наблюдаемая большая полуширина этой полосы в сравнении с кристаллами $\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ может указывать на частичное разупорядочение в $(\text{Cd}_{0.67}\text{Pb}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выращены из расплава трехкомпонентные кристаллы $(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{1-x}\text{Mn}_x\text{F}_2$ ($0 \leq x \leq 0.7$). Выявлено, что однофазная область флюоритового твердого раствора (при его кристаллизации из расплава с последующим медленным охлаждением) существует вплоть до 5 мол. % MnF_2 . При более высоких концентрациях MnF_2 , предположи-

Таблица 1. Положения полос поглощения Mn^{2+} в исследованных кристаллах

Переход	Длина волны, нм		
	$(\text{Pb}_{0.67}\text{Cd}_{0.33})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{F}_2$ $B = 771 \text{ см}^{-1}$ $\Delta = 756 \text{ см}^{-1}$	$\text{Cd}_{0.93}\text{Mn}_{0.07}\text{F}_2$ $B = 775 \text{ см}^{-1}$ $\Delta = 480 \text{ см}^{-1}$	MnF_2 $B = 778 \text{ см}^{-1}$ $\Delta = 813 \text{ см}^{-1}$
${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_1(G)$	509	450	516
${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_2(G)$	432	410	430
${}^6A_1 \rightarrow {}^4A_1, {}^4E(G)$	400	396	397
${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_2(D)$	350	340	350
${}^6A_1 \rightarrow {}^4E(D)$	330	330	330

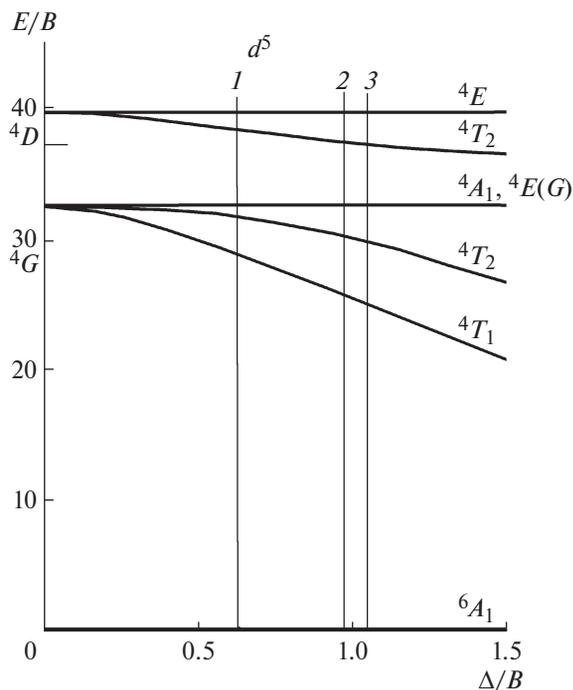


Рис. 5. Часть диаграммы Танабе–Сугано для Mn^{2+} . Вертикальными линиями указаны значения Δ/B для $Cd_{0.93}Mn_{0.07}F_2$ (1), $(Pb_{0.67}Cd_{0.33})_{0.95}Mn_{0.05}F_2$ (2) и MnF_2 (3).

тельно на основе соединения Pb_2MnF_6 с частично замещенными катионами Cd^{2+} , появляется примесная тетрагональная фаза. Для определения состава ее катионной подрешетки следует получить монокристаллические образцы.

Спектры поглощения кристаллов $(Pb_{0.67}Cd_{0.33})_{1-x}Mn_xF_2$ содержат слабые полосы поглощения, обусловленные запрещенными по спину переходами в ионе Mn^{2+} . Положения полос указывают на образование Mn^{2+} центров с локальной октаэдрической симметрией окружения в кубической кристаллической матрице. Люминесценция кристалла $(Pb_{0.67}Cd_{0.33})_{0.95}Mn_{0.05}F_2$ наблюдается только при 77 К, ее спектр состоит из широкой полосы с максимумом 605 нм. По сравнению со спектром $Cd_{0.93}Mn_{0.07}F_2$ полоса люминесценции значительно уширена и сдвинута в длинноволновую область.

Авторы выражают благодарность Д.Н. Каримову за помощь в обработке результатов эксперимента.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию в части роста и структурного исследования кристаллов. Рентгенодифракционные исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП ФНИЦ “Кристаллография и фото-

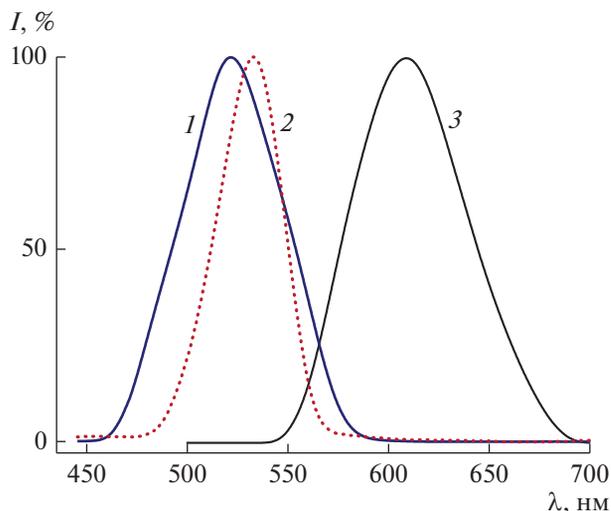


Рис. 6. Спектры люминесценции при возбуждении в области 400 нм: 1 – $Cd_{0.93}Mn_{0.07}F_2$ (300 К), 2 – $Cd_{0.93}Mn_{0.07}F_2$ (80 К), 3 – $(Pb_{0.67}Cd_{0.33})_{0.95}Mn_{0.05}F_2$ (77 К).

ника” при поддержке Минобрнауки (проект RFMEFI62119X0035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров П.П., Соболев Б.П. // Кристаллография. 1992. Т. 37. Вып. 5. С. 1210.
2. Бучинская И.И., Федоров П.П. // Успехи химии. 2004. Т. 73. № 4. С. 404.
3. Buchinskaya I.I., Fedorov P.P., Sobolev B.P. // SPIE Proc.: Solid State Crystals: Growth and Characterization. Zakopane, Poland. 1996. V. 3178. P. 59.
4. Бузник В.М., Суховской А.А., Воилов В.А. и др. // Журн. неорганической химии. 1997. Т. 42. № 12. С. 2092.
5. Fedorov P.P., Buchinskaya I.I., Zhurova E.A. et al. // Conf: Structure and Properties of Crystalline Materials. Dubna. 4–6 March 1997. Abstrs. P. 42.
6. Мацулев А.И., Иванов Ю.Н., Лившиц А.И. и др. // Журн. неорганической химии. 2000. Т. 45. № 2. С. 296.
7. Trnovcova V., Fedorov P.P., Ozvoldova M. et al. // J. Optoelectron. Adv. Mater. 2003. V. 5. № 3. P. 627.
8. Kosacki I., Dynowska E. // J. Cryst. Growth. 1980. V. 50. № 2. P. 575.
9. Kosacki I. // Appl. Phys. A. 1989. V. 49. P. 413.
10. Buchinskaya I.I., Fedorov P.P., Sobolev B.P. // SPIE: Solid State Crystals: Growth and Characterization. Zakopane, Poland. 1996. V. 3178. P. 59.
11. Попов П.А., Матовников А.В., Моисеев Н.В. и др. // Кристаллография. 2015. Т. 60. № 1. С. 128.
12. Васильченко В.Г., Мотин Ю.Д., Кречко Ю.А. и др. // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. № 6. С. 739.
13. Соболев Б.П., Быстрова А.А., Бучинская И.И. и др. // Патент RU 2061114, 27.05.1996.
14. Kaptsov S.I., Solov'ev A.S., Vasil'chenko V.G. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1995. V. 103. P. 323.

15. *Alonso P.J., Alcalá R.* // J. Luminescence. 1981. V. 22. P. 321.
16. *Shcherbakov V.D., Nizamutdinov A.S.* // J. Luminescence. 2019. V. 205. P. 37.
17. *Samouel M., Seances C.R.* // Acad. Sci. C. 1968. V. 268. P. 409.
18. *Samouel M.* // Rev. Chem. Miner. 1971. V. 8. P. 537.
19. *Федоров П.П., Саттарова М.А., Ольховая Л.А. и др.* // Высокочистые вещества. 1991. Т. 3. С. 191.
20. *Dorshow R., Hogg R.D., Jaccarino V.* // Phys. Lett. A. 1979. V. 37. P. 250.
21. *Demortier G., Tressaud A., Tanguy B. et al.* // Rev. Chem. Miner. 1987. V. 24. P. 117.
22. *Boultifand A., Louer D.* // J. Appl. Cryst. 2004. V. 37. P. 724.
<https://doi.org/10.1107/S0021889804014876>
23. *Le Bail A.* // Powder Diffr. 2005. V. 20. № 4. P. 316.
24. *Peříček V., Dušek M., Palatinus L.* // Z. Kristallogr. Cryst. Mater. 2014. B. 229. № 5. S. 345.
25. *Chenavas J., Capponi J.J., Joubert J.C., Marezio M.* // Mater. Res. Bull. 1974. V. 9. P. 13.
26. *Von Schnering H.G.* // Z. Anorg. Allg. Chem. 1967. B. 353. S. 13
27. *Shannon R.D.* // Acta Cryst. A. 1976. V. 32. № 5. P. 751.
28. *Попов П.А., Матовников А.В., Мусеев Н.В. и др.* // Кристаллография. 2015. Т. 60. № 1. С. 111.
<https://doi.org/10.7868/S0023476115010178>
29. *Икрами Д.Д., Кузнецова Н.И., Сидоров В.С., Ручкин Е.Д.* // Журн. неорган. химии. 1984. Т. 29. № 9. С. 2360.
30. *Щербаков В.Д.* // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2010. Т. 152. кн. 4. С. 21.
31. *Щербаков В.Д.* // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2015. Т. 157. кн. 4. С. 172.
32. *Щербаков В.Д.* // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 3. С. 433.