

НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 541.1 + 621.785.36 + 621.78.011

*Е. К. ЮХНО, Л. А. БАШКИРОВ***ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ ИНДАТА ЛАНТАНА LaInO_3 , ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+}** *Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: bashkirov@belstu.by*

Твердофазным методом получены образцы твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,002; 0,003; 0,004$), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{M}_y\text{O}_3$ ($\text{M} - \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{3+}; y = 0,002; 0,003$), проведены их рентгенофазовый, ИК-спектроскопический, дилатометрический, термический анализы. Все полученные образцы были однофазными с кристаллической структурой орторомбически искаженного перовскита. Показано, что ИК-спектры поглощения всех твердых растворов отличаются незначительно от ИК-спектров LaInO_3 . Установлено, что в интервале температур 400–1100 К исследованные твердые растворы на основе индата лантана являются термостабильными.

Ключевые слова: индат лантана, твердый раствор, рентгенофазовый анализ, ИК-спектроскопия, тепловое расширение, термический анализ.

*Е. К. YUKHNO, L. A. BASHKIROV***PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS BASED ON LANTHANUM INDATATE DOPED BY Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} IONS***Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus, e-mail: bashkirov@belstu.by*

$\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,002; 0,003; 0,004$), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{M}_y\text{O}_3$ ($\text{M} - \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{3+}; y = 0,002; 0,003$) solid solutions were obtained by solid-phase method and studied by XRD, IR-spectroscopic, dilatometric and thermal analysis methods. All samples were single-phased and had the structure of orthorhombically distorted perovskite. It has been found that the IR-spectra for all solid solutions differ slightly from those for LaInO_3 . It has been shown that in the temperature range of 400–1100 K all solid solutions based on lanthanum indatate are thermally stable.

Keywords: lanthanum indatate, solid solution, X-ray diffraction, IR-spectroscopy, thermal expansion, thermal analysis.

Введение. Твердые растворы на основе LaInO_3 , легированного ионами редкоземельных элементов, обладают хорошими фотолюминесцентными свойствами и могут быть использованы в светодиодах и FED-дисплеях (дисплеях с автоэлектронной эмиссией) [1–3]. Известно, что твердые растворы на основе LaInO_3 , легированного ионами Pr^{3+} , излучают в красной и сине-зеленой областях спектра [1]. Введение в кристаллическую решетку ионов $3d$ -элементов (Cr^{3+} , Mn^{3+}) может усилить фотолюминесценцию, вызванную ионами редкоземельных элементов (сенсбилизация). Для получения высокоэффективных фотолюминофоров количество вводимых в кристаллическую решетку редкоземельных и $3d$ -элементов должно быть небольшим, чтобы не произошло концентрационного тушения люминесценции [4]. Однако ИК-спектры поглощения, тепловое расширение и термическая стабильность твердых растворов на основе индата лантана, обладающего фотолюминесцентными свойствами, исследованы недостаточно, хотя одним из важнейших требований к таким материалам является высокая термическая стабильность [5]. Люминофоры на основе индата лантана часто наносят на подложки со структурой перовскита или на активные элементы полупроводниковых светодиодов, излучающих в ультрафиолетовой области спектра. При этом для получения пленок ряда сегнетоэлектриков со структурой перовскита в качестве

подложки используется твердый раствор на основе LaGaO_3 [6]. В связи с этим необходимо, чтобы коэффициенты линейного теплового расширения для фотолюминофора на основе LaInO_3 и подложки были практически равными.

Цель настоящей работы – исследование кристаллической структуры, ИК-спектров поглощения, теплового расширения, термической стабильности твердых растворов на основе LaInO_3 , легированного ионами редкоземельных (Pr^{3+}) и 3d-элементов (Cr^{3+} , Mn^{3+}) с концентрацией легирующих ионов не более 0,4 мол. %.

Методика эксперимента. Твердые растворы на основе индата лантана $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,002; 0,003; 0,004$), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{M}_y\text{O}_3$ ($\text{M} - \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{3+}; y = 0,002; 0,003$) получали твердофазным методом из оксидов лантана (La_2O_3), индия (In_2O_3), празеодима (Pr_6O_{11}), хрома (Cr_2O_3), марганца (Mn_2O_3). Все реактивы имели квалификацию «х. ч.». Оксид лантана был предварительно прокален в течение часа на воздухе при температуре 1273 К.

Порошки оксидов, взятых в заданных молярных соотношениях, смешивали и мололи в планетарной мельнице «Pulverizette 6» с добавлением этанола (материал стакана и мелющих шаров – ZrO_2). Полученную шихту (с добавлением этанола) прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм, которые сушили на воздухе при комнатной температуре, а затем обжигали при 1523 К на воздухе в течение 6 ч. Для того чтобы избежать возможного (при синтезе и спекании) взаимодействия таблеток с материалом подложки (Al_2O_3), образцы отделяли от подложки тонким буферным слоем шихты того же состава, что и сами таблетки. Охлаждение образцов от температур спекания до комнатной температуры протекало медленно, вместе с печью (скорость охлаждения составляла 2–5 $\text{K}\cdot\text{мин}^{-1}$). После предварительного обжига таблетки дробили, перемалывали, прессовали с добавлением небольшого количества этанола в бруски длиной 30 мм и сечением $5 \times 5 \text{ мм}^2$, которые обжигали при температуре 1523 К на воздухе в течение 6 ч на подложках из оксида алюминия.

Рентгеновские дифрактограммы получали на дифрактометре D8 ADVANCED фирмы Bruker с использованием CuK_α -излучения при комнатной температуре в диапазоне углов $2\Theta = 20\text{--}80^\circ$. Параметры кристаллической структуры (a , b , c и объем элементарной ячейки V) полученных твердых растворов на основе индата лантана LaInO_3 были рассчитаны при помощи рентгеноструктурного табличного процессора (RTP), с использованием значений межплоскостных расстояний и индексов Миллера для 12–15 рефлексов. Погрешность в определении параметров элементарных ячеек не превышала $\pm 0,001 \text{ \AA}$.

Инфракрасные (ИК) спектры синтезированных твердых растворов в интервале волновых чисел $250\text{--}900 \text{ см}^{-1}$ записывали в таблетированных с KBr смесях на ИК-Фурье спектрометре NEXUS фирмы Thermo Nicolet. Масса навески исследуемого твердого раствора на основе индата лантана составляла $\approx 1 \text{ мг}$ – около 0,1 % от массы KBr. Погрешность определения частот колебаний не превышала $\pm 2 \text{ см}^{-1}$.

Термическое расширение керамических образцов твердых растворов на основе индата лантана исследовали в интервале температур 400–1100 К при помощи кварцевого dilatометра с вертикальным расположением кварцевого толкателя с индикатором микронным ИГМ (рычажно-зубчатая многооборотная головка с ценой деления 0,001 мм в динамическом режиме со скоростью нагревания-охлаждения 3–5 $\text{K}\cdot\text{мин}^{-1}$). Нагрев и охлаждение осуществляли на воздухе в печи электросопротивления. Образцы представляли собой прямоугольные параллелепипеды размером $5 \times 5 \times 30 \text{ мм}$. Погрешность определения относительного удлинения образцов не превышала 0,1 %. Значения среднего линейного коэффициента термического расширения (α) образцов рассчитывали при помощи метода наименьших квадратов. Погрешность в определении α составляла 1–5 % для различных образцов и температурных интервалов.

Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), термогравиметрического и дифференциального термогравиметрического (ТГ, ДТГ) анализов снимали на дериватографе TGA/DSC1/1600 фирмы METTLER TOLEDO Instruments (Швейцария) в статической воздушной атмосфере в интервале температур 300–1265 К с использованием в качестве эталона Al_2O_3 при линейном режиме нагрева образцов со скоростью 10 град/мин, масса порошкообразной навески составляла 65 мг.

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ рентгеновских дифрактограмм (рис. 1) показал, что все исследованные образцы на основе индата лантана, легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , являются однофазными и имеют кристаллическую структуру орторомбически искаженного перовскита типа GdFeO_3 ($a < c\sqrt{2} < b$ [7]). Параметры кристаллической решетки полученных твердых растворов приведены в табл. 1. Ионы Pr^{3+} в твердом растворе на основе индата лантана замещают ионы La^{3+} в соответствующей подрешетке LaInO_3 . Так как разница ионных радиусов La^{3+} и Pr^{3+} незначительная (ионный радиус La^{3+} на 0,04 Å больше ионного радиуса Pr^{3+} [8]), то, как установлено в работе [9], в двойной системе $(1-x)\text{LaInO}_3-x\text{PrInO}_3$ при замещении ионов La^{3+} ионами Pr^{3+} происходит образование непрерывного ряда твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$, параметры a , b , c элементарной ячейки которых при увеличении степени замещения x постепенно уменьшаются. Однако, так как концентрация ионов Pr^{3+} в исследованных твердых растворах не превышает 0,4 мол.%, параметры кристаллической решетки всех исследованных твердых растворов отличаются незначительно от соответствующих параметров кристаллической решетки LaInO_3 [9]. Так, например, твердый раствор $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$ имеет следующие параметры кристаллической решетки: $a = 5,741$ Å, $b = 5,939$ Å, $c = 8,237$ Å, $V = 280,8$ Å³, а исследованный в работе [9] индат лантана LaInO_3 – $a = 5,718$ Å, $b = 5,932$ Å, $c = 8,214$ Å, $V = 278,6$ Å³.

Таблица 1. Параметры a , b , c и объем элементарной ячейки V , степень орторомбического искажения ε для твердых растворов на основе индата лантана LaInO_3 , легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+}

Состав	Параметры элементарной кристаллической ячейки					$c/\sqrt{2}$, Å
	a , Å	b , Å	c , Å	V , Å ³	$\varepsilon \cdot 10^2$	
$\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$	5,734	5,938	8,228	280,1	3,56	5,818
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$	5,740	5,939	8,242	280,9	3,46	5,828
$\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$	5,741	5,939	8,237	280,8	3,45	5,824
$\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$	5,739	5,942	8,234	280,8	3,54	5,822
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,998}\text{Cr}_{0,002}\text{O}_3$	5,737	5,942	8,233	280,6	3,57	5,822
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$	5,739	5,940	8,236	280,8	3,50	5,824
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,998}\text{Mn}_{0,002}\text{O}_3$	5,744	5,941	8,237	281,1	3,42	5,824
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Mn}_{0,003}\text{O}_3$	5,742	5,940	8,243	281,2	3,45	5,829
LaInO_3 [9]	5,718	5,932	8,214	278,6	3,74	5,808
PrInO_3 [9]	5,653	5,905	8,150	272,1	4,46	5,763

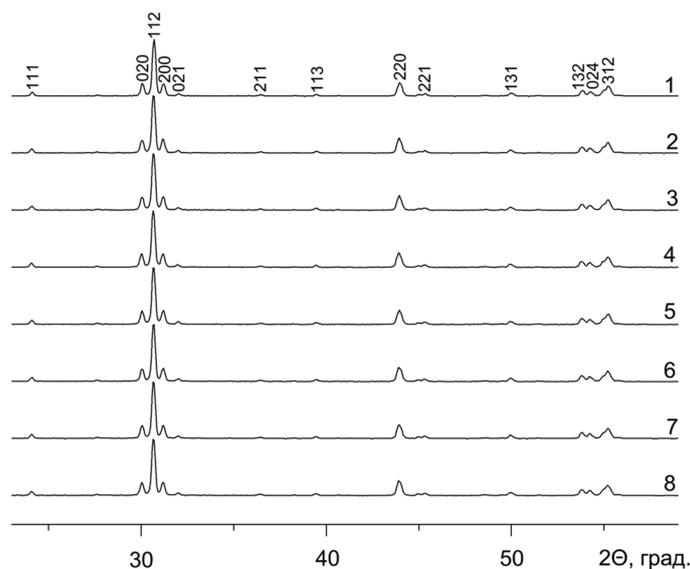


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001$ (1); 0,002 (2); 0,003 (3); 0,004 (4)), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{Cr}_y\text{O}_3$ ($y = 0,002$ (5); 0,003 (6)), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{Mn}_y\text{O}_3$ ($y = 0,002$ (7); 0,003 (8))

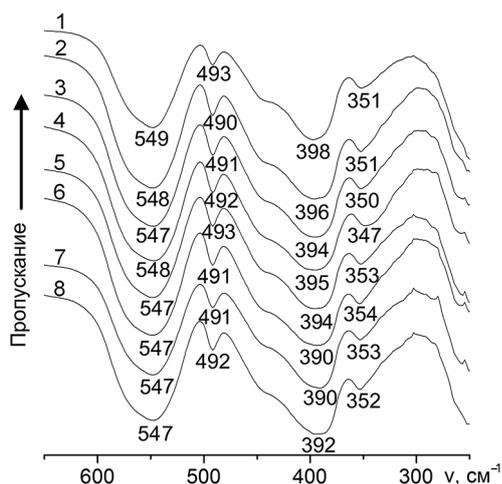


Рис. 2. ИК-спектры поглощения твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001$ (1); $0,002$ (2); $0,003$ (3); $0,004$ (4)), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{Cr}_y\text{O}_3$ ($y = 0,002$ (5); $0,003$ (6)), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{1-y}\text{Mn}_y\text{O}_3$ ($y = 0,002$ (7); $0,003$ (8))

словленные валентными колебаниями связей $\text{In}(\text{Cr}, \text{Mn})\text{--O}$ ($547\text{--}549\text{ см}^{-1}$, $490\text{--}493\text{ см}^{-1}$) и $\text{La}(\text{Pr})\text{--O}$ ($390\text{--}398\text{ см}^{-1}$, $347\text{--}354\text{ см}^{-1}$). Частоты полос поглощения всех полученных твердых растворов на основе индата лантана хорошо согласуются с данными, полученными для LaInO_3 [10].

При увеличении содержания в твердом растворе $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ионов Pr^{3+} от $x = 0,001$ до $0,004$ (рис. 2) частоты валентных колебаний связей $\text{In}\text{--O}$ и $\text{La}(\text{Pr})\text{--O}$ изменяются в пределах погрешности метода измерения ($\pm 2\text{ см}^{-1}$). Замещение $0,2; 0,3$ мол.% ионов индия In^{3+} в твердом растворе $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$ ионами Cr^{3+} или Mn^{3+} практически не оказывает влияния на значения минимумов полос поглощения валентных колебаний связей $\text{In}(\text{Cr}, \text{Mn})\text{--O}$ и связей $\text{La}(\text{Pr})\text{--O}$ в интервале частот $351\text{--}354\text{ см}^{-1}$, однако приводит к незначительному смещению минимумов полос поглощения валентных колебаний связей $\text{La}(\text{Pr})\text{--O}$ в низкочастотную область (от 396 см^{-1} для $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$ до 390 см^{-1} для твердых растворов $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$ и $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,998}\text{Mn}_{0,002}\text{O}_3$).

Приведенные на рис. 3 температурные зависимости относительного удлинения $\Delta l/l_0$ исследованных керамических образцов на основе индата лантана, легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , практически линейные. Следовательно, в интервале температур $400\text{--}1100\text{ К}$ отсутствуют фазовые переходы. Рассчитанные методом наименьших квадратов по температурным зависимостям относительного удлинения коэффициенты линейного теплового расширения (α) приведены в табл. 2. Их анализ показывает, что увеличение степени замещения x ионов La^{3+} ионами Pr^{3+} в твердом растворе $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ от $x = 0,001$ до $0,004$ приводит к уменьшению величины коэффициента линейного теплового расширения α от $7,54 \cdot 10^{-6}$ до $6,74 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$, а замещение в твердом растворе $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$ $0,3$ мол.% ионов In^{3+} ионами Cr^{3+} практически не приводит к изменению величины коэффициента линейного теплового расширения α . Полученные коэффициенты линейного теплового расширения согласуются с величиной $8,89 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-1}$ для твердого раствора $\text{La}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{InO}_3$, изученного в работе [9].

На кривых ДСК (рис. 4) для исследованных твердых растворов $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$, $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Mn}_{0,003}\text{O}_3$ никаких тепловых эффектов не наблюдается, что подтверждает сделанный на основании линейного характера температурных зависимостей относительного удлинения $\Delta l/l_0$ образцов вывод об отсутствии в исследованных образцах при температурах $400\text{--}1100\text{ К}$ каких-либо фазовых переходов. Однако на кривых ТГ наблюдаются незначительные потери массы с отклонением от линейной зависимости, указывающие на увеличение скорости потери массы, максимумы величин которых (минимумы на кривых ДТГ) достигаются при определенной температуре T_1 , расположенной в области температур $577\text{--}603\text{ К}$. Общая потеря массы в интервале температур $300\text{--}1265\text{ К}$ для всех исследованных образцов

При замещении ионов In^{3+} в $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$ ионами Cr^{3+} и Mn^{3+} , концентрация которых составляет всего $0,2\text{--}0,3$ мол.%, несмотря на сравнительно большую разницу ионных радиусов In^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} (разница ионных радиусов In^{3+} и Cr^{3+} составляет $0,28\text{ \AA}$, In^{3+} и Mn^{3+} – $0,22\text{ \AA}$ [8]), параметры кристаллической решетки образующихся твердых растворов также отличаются незначительно от соответствующих параметров LaInO_3 . Значения степени орторомбического искажения структуры перовскита ε ($\varepsilon = (b-a)/a$) для полученных твердых растворов на основе индата лантана, легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , также изменяются незначительно и их величины равны $(3,45\text{--}3,56) \cdot 10^{-2}$ (табл. 1). Положительный знак степени орторомбического искажения остается постоянным, что согласуется с данными для системы твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$), изученной в работе [9].

ИК-спектры поглощения исследуемых твердых растворов (рис. 2) отличаются между собой незначительно, на них присутствуют полосы поглощения, обу-

Таблица 2. Коэффициент линейного теплового расширения (α), общая потеря массы в интервале температур 300–1265 К ($\Delta m_{\text{общ}}$) и потеря массы (Δm_1) при температуре T_1 соответственно для твердых растворов на основе индата лантана LaInO_3 , легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+}

Состав	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$\Delta m_{\text{общ}}, \text{мас.}\%$	$\Delta m_1, \text{мас.}\%$	T_1, K
$\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$	7,54	–	–	–
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$	8,17	0,230	0,099	603
$\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$	7,67	–	–	–
$\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$	6,74	–	–	–
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$	8,01	0,089	0,091	568
$\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Mn}_{0,003}\text{O}_3$	–	0,082	0,079	577

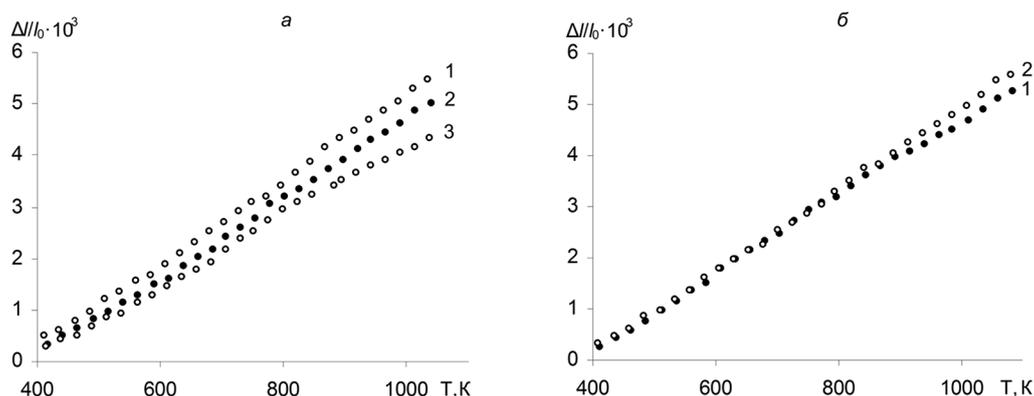


Рис. 3. Температурные зависимости относительного удлинения $\Delta l/l_0$ твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ с $x = 0,002$ (1); 0,003 (2); 0,004 (3) (а); $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$ (1), $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$ (2) (б)

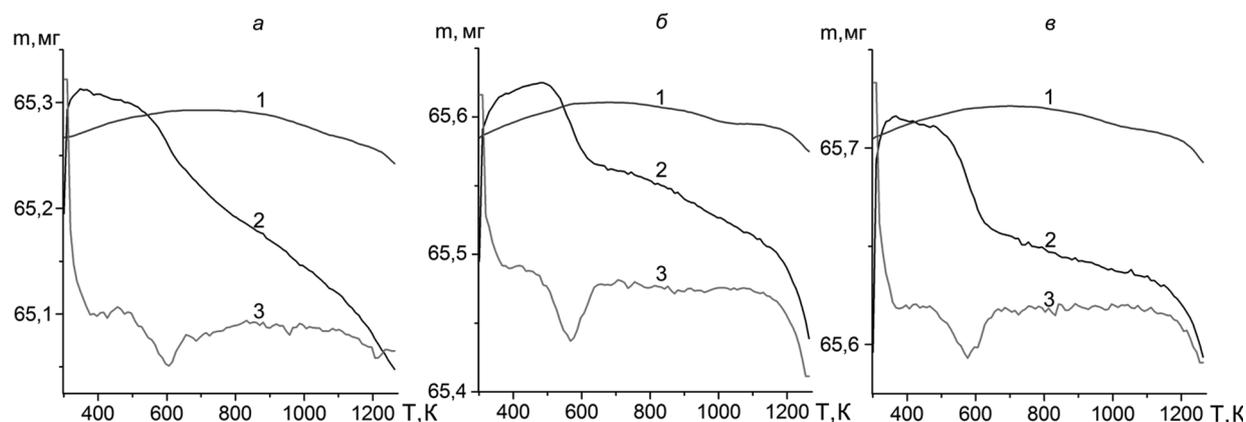


Рис. 4. Кривые ДСК (1), ТГ (2), ДТГ (3) для твердых растворов $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$ (а); $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$ (б); $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Mn}_{0,003}\text{O}_3$ (в)

составляет не более 0,230 мас.%. При этом для исследованных твердых растворов на основе индата лантана, легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , в интервале температур 300–503 К наблюдается небольшое увеличение массы. Вероятно, природа этого незначительного увеличения массы твердых растворов $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Cr}_{0,003}\text{O}_3$, $\text{La}_{0,998}\text{Pr}_{0,002}\text{In}_{0,997}\text{Mn}_{0,003}\text{O}_3$ одинакова, но в настоящей работе не установлена. В табл. 2 приведены температуры T_1 и потери массы (Δm_1), определенные по кривым ДТГ и ТГ соответственно для твердых растворов на основе индата лантана. Полученные данные хорошо согласуются с данными термогравиметрического анализа твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$, приведенными в работе [9].

Закключение. В работе твердофазным методом из соответствующих оксидов получены твердые растворы на основе индата лантана LaInO_3 , легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , с содержанием легирующих ионов не более 0,4 мол.% и изучены кристаллическая структура, ИК-спектры поглощения, тепловое расширение, проведен комплексный термический анализ.

Установлено, что образцы индатов являются однофазными и имеют кристаллическую структуру орторомбически искаженного перовскита типа GdFeO_3 ($a < c / \sqrt{2} < b$). Параметры элементарной ячейки кристаллической решетки полученных твердых растворов на основе индата лантана LaInO_3 изменяются незначительно. Установлено, что на ИК-спектрах минимумы полос поглощения валентных колебаний связей $\text{In}(\text{Cr}, \text{Mn})\text{-O}$ и $\text{La}(\text{Pr})\text{-O}$ для разных составов отличаются незначительно. Показано, что исследованные твердые растворы на основе индата лантана, легированного ионами Pr^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , в интервале температур 400–1100 К являются термостабильными, что свидетельствует о перспективности их использования в качестве фотолюминофоров для изготовления светодиодов белого света.

Список использованной литературы

1. Liu, X. Synthesis and luminescent properties of $\text{LaInO}_3: \text{RE}^{3+}$ (RE = Sm, Pr and Tb) nanocrystalline phosphors for field emission displays / X. Liu, J. Lin // *Solid State Sci.* – 2009. – Vol. 11. – P. 2030–2036.
2. Okamoto, S. Luminescent properties of praseodymium-doped alkaline-earth titanates / S. Okamoto, H. Yamamoto // *J. Lumin.* – 2003. – Vol. 102–103. – P. 586–589.
3. Psuja, P. Rare-earth doped nanocrystalline phosphors for field emission displays / P. Psuja, D. Hreniak, W. Strek // *J. Nanomater.* – 2007. – Vol. 2007. – DOI: 10.1155/2007/87350.
4. Ландсберг, Г. С. Оптика / Г. С. Ландсберг // М.: Наука, 1976. – 926 с.
5. New opportunities for lanthanide luminescence / J.-C. G. Bünzli [et al.] // *J. Rare Earths.* – 2007. – Vol. 25, Iss. 5. – P. 257–274.
6. Морозов, А. Н. Реальная структура монокристаллов LaGaO_3 , выращенных методом Чохральского / А. Н. Морозов, О. Ю. Морозова, Н. М. Пономарев // *Кристаллография.* – 1993. – Т. 38, вып. 3. – С. 149–173.
7. Крупицка, С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов : в 2-х т. / С. Крупицка. – М.: Мир, 1976. – Т. 1. – 353 с.
8. Шаскольская, М. П. Кристаллография: учеб. пособие для ВТУЗов / М. П. Шаскольская. – М.: Высшая школа, 1976. – 391 с.
9. Кандидатова, И. Н. Термический анализ, тепловое расширение индатов празеодима-лантана $\text{Pr}_{1-x}\text{La}_x\text{InO}_3$ / И. Н. Кандидатова, Л. А. Башкиров, Г. С. Петров // *Труды БГТУ. Химия и технология неорганич. в-в.* – 2012. – № 3. – С. 29–31.
10. Кандидатова, И. Н. Физико-химические свойства твердых растворов на основе галлатов, индатов редкоземельных элементов со структурой перовскита: дис. ... канд. хим. наук / И. Н. Кандидатова. – Минск, 2014. – 137 с.

Поступила в редакцию 12.05.2015