

УДК 541.1 + 621.785.36 + 621.78.011

Е. К. Юхно¹, Л. А. Башкиров¹, Л. С. Лобановский², С. В. Труханов², С. И. Латушко¹¹Белорусский государственный технологический университет²Научно-практический центр по материаловедению Национальной академии наук Беларуси

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0,001 \leq x \leq 0,004$)
СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА**

Твердофазным методом проведен синтез однофазных керамических образцов твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0,001 \leq x \leq 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ и исследованы их кристаллическая структура, полевые зависимости намагниченности при 5 К и 300 К и температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости. Показано, что температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ с $x = 0,001; 0,003; 0,004$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ при температурах 25, 60, 73 и 165 К соответственно меняют знак и при более высоких температурах магнитная восприимчивость становится отрицательной. Установлено, что при 300 К увеличение напряженности магнитного поля до 14 Тл приводит к линейному увеличению диамагнитной удельной намагниченности всех исследованных твердых растворов. При температуре 5 К намагниченность твердых растворов $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ при увеличении напряженности магнитного поля до 14 Тл увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое в поле напряженностью 14 Тл не достигается. Установлено, что при 5 К для твердого раствора $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$, в котором проведено незначительное замещение диамагнитных ионов La^{3+} парамагнитными ионами Pr^{3+} (0,1 мол. %), увеличение магнитного поля до 5 Тл приводит к постепенному возрастанию величины парамагнитной удельной намагниченности. При дальнейшем росте величины магнитного поля до 14 Тл происходит снижение намагниченности и переход ее в диамагнитную область. Удельная намагниченность твердых растворов на основе индата лантана, содержащего более 0,1 мол. % ионов Pr^{3+} , является положительной вплоть до 14 Тл.

Ключевые слова: твердый раствор, индат лантана, рентгенофазовый анализ, магнитная восприимчивость, намагниченность.

Ye. K. Yukhno¹, L. A. Bashkirov¹, L. S. Lobanovskiy², S. V. Trukhanov², S. I. Latushko¹¹Belarusian State Technological University²Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus

**MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0.001 \leq x \leq 0.004$)
PEROVSKITE – STRUCTURE PHOTOLUMINESCENT MATERIALS**

Solid phase synthesis of single-phased ceramic samples of $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0.001 \leq x \leq 0.004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ solid solutions was carried out and their crystal structure, fields dependences of magnetization at 5 and 300 K and the temperature dependences of molar magnetic susceptibility were examined. It is shown that the temperature dependences of the molar magnetic susceptibility of $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ with $x = 0.001; 0.003; 0.004$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ solid solutions at temperatures 25, 60, 73 and 165 K respectively change sign, and their magnetic susceptibility is negative at higher temperatures. It was found that at 300 K increasing of the magnetic field up to 14 T leads to a linear increasing of the diamagnetic specific magnetization of all solid solutions investigated. At temperature of 5 K magnetization of $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ solid solutions with increasing magnetic field up to 14 T increases non-linearly with a gradual approach to magnetic saturation, but at 14 T it is not achieved. In reference to $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$ solid solution with a small substitution degree of diamagnetic La^{3+} ions by paramagnetic Pr^{3+} ions (0.1 mol. %) it was found that increasing of the magnetic field up to 5 T leads to a gradual increasing of the paramagnetic specific magnetization value. Further growing of the magnetic field up to 14 T leads to decreasing of the magnetization and its transition to the diamagnetic region. The specific magnetization of lanthanum indate based solid solutions that contain more than 0.1 mol. % Pr^{3+} ions is positive up to 14 T.

Key words: solid solution, lanthanum indate, X-ray diffraction, magnetic susceptibility, magnetization.

Введение. В настоящее время перспективны исследования люминесцентных материалов на основе индата лантана LaInO_3 в связи с широкими возможностями их применения (например, в светодиодах белого света) [1–4]. Лю-

минесцентные свойства твердых растворов на основе LaInO_3 , легированного ионами Pr^{3+} , исследованы в работах [1, 5]. Было установлено, что введение в кристаллическую решетку индата лантана ионов Pr^{3+} позволяет получить фото-

люминофор, излучающий в красной и синезеленой областях спектра. Однако интенсивность полос фотолюминесценции ионов Pr^{3+} невелика. В связи с этим в настоящее время проводятся исследования, направленные на поиск сенситизатора фотолюминесцентных свойств ионов Pr^{3+} и других парамагнитных редкоземельных элементов. Магнитные свойства твердых растворов со структурой перовскита, содержащих ионы редкоземельных элементов, как и их фотолюминесцентные свойства, определяются схемой энергетических уровней $4f$ -электронов. Поэтому исследование таких фотолюминофоров на основе LaInO_3 должно быть комплексным, с исследованием как фотолюминесцентных, так и магнитных свойств. В работе [6] были изучены магнитные свойства твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ с содержанием ионов Pr^{3+} 10 мол. % и более. Однако высокоэффективные фотолюминофоры на основе LaInO_3 содержат значительно меньше 10 мол. % ионов Pr^{3+} , но их магнитные свойства не исследованы.

Цель настоящей работы – синтез твердых растворов на основе индата лантана со структурой перовскита $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0,001 \leq x \leq 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$, исследование их кристаллической структуры, полевых зависимостей намагниченности при 5 и 300 К в магнитных полях до 14 Тл, температурных зависимостей молярной магнитной восприимчивости.

Основная часть. Синтез керамических образцов твердых растворов на основе индата лантана LaInO_3 со структурой перовскита $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0,001 \leq x \leq 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$, являющихся перспективными фотолюминофорами, излучающими в красной и синезеленой областях видимого света, получали твердофазным методом из оксидов лантана (La_2O_3), индия (In_2O_3), празеодима (Pr_6O_{11}), хрома (Cr_2O_3). Все реактивы имели квалификацию «х. ч». Оксид лантана был предварительно обожжен в течение 1 ч на воздухе при температуре 1273 К.

Исходные оксиды, взятые в заданном молярном соотношении, смешивали и мололи в планетарной мельнице *Pulverizette* фирмы *Fritch* с добавлением этанола в стаканчиках с шарами из диоксида циркония. Полученную шихту прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм и затем обжигали в атмосфере воздуха при температуре 1523 К в течение 6 ч. После предварительного обжига таблетки дробили, перемалывали, прессовали в бруски длиной 30 мм и сечением $5 \times 5 \text{ мм}^2$, которые обжигали при температуре 1523 К в атмосфере воздуха в течение 6 ч.

Рентгеновские дифрактограммы получали на дифрактометре *D8 Advance* фирмы *Bruker* с использованием CuK_α -излучения при комнат-

ной температуре в диапазоне углов $2\Theta = 20\text{--}80^\circ$. Параметры элементарной ячейки кристаллической решетки рассчитаны с помощью рентгеноструктурного табличного процессора RTP. Удельная намагниченность при температурах 5 и 300 К в магнитных полях до 14 Тл и магнитная восприимчивость в интервале температур 5–300 К в магнитном поле 0,86 Тл полученных твердых растворов индатов измерены вибрационным методом на универсальной высокополево измерительной системе (*Cryogenic Ltd, London, 4IS*) в ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению».

Анализ рентгеновских дифрактограмм полученных образцов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($0,001 \leq x \leq 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ (рис. 1) показал, что они являются однофазными и имеют кристаллическую структуру орторомбически искаженного перовскита типа GdFeO_3 ($a < c / \sqrt{2} < b$) [7], параметры элементарной ячейки которых приведены в табл. 1. Из-за небольших количеств легирующих ионов Pr^{3+} , Cr^{3+} параметры кристаллической решетки всех исследованных твердых растворов отличаются незначительно от соответствующих параметров кристаллической решетки LaInO_3 [8].

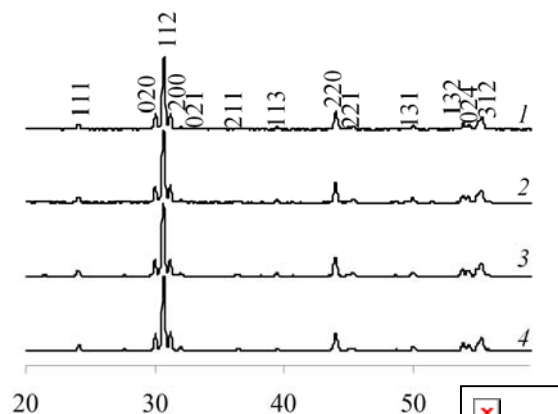


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы твердых растворов:

1 – $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$; 2 – $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$;
3 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$; 4 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{InO}_3$

Температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости в интервале температур 5–300 К ($\chi_{\text{мол}}$) исследованных твердых растворов на основе индата лантана $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,003; 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ приведены на рис. 2. Следует отметить, что температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости для всех исследованных индатов $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ меняют знак при температурах 25, 60, 73 и 165 К соответственно и при более высоких температурах магнитная восприимчивость становится отрицательной.

Таблица 1

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

Состав	Параметры кристаллической решетки					$c/\sqrt{2}$, Å
	a , Å	b , Å	c , Å	V , Å ³	$\varepsilon = (b-a)/a$	
$\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$	5,734	5,938	8,228	280,1	0,0356	5,818
$\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$	5,741	5,939	8,237	280,8	0,0345	5,824
$\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$	5,739	5,942	8,234	280,8	0,0354	5,822
$\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$	5,726	5,939	8,227	279,8	0,0372	5,817
LaInO_3 [8]	5,718	5,932	8,214	278,6	0,0374	5,808

Это указывает на то, что для исследованных твердых растворов вклады в магнитную восприимчивость парамагнитных ионов Pr^{3+} , Cr^{3+} и диамагнитной матрицы LaInO_3 отличаются между собой незначительно, причем парамагнитный вклад ионов Pr^{3+} , Cr^{3+} при повышении температуры уменьшается, а диамагнитный вклад от температуры не зависит.

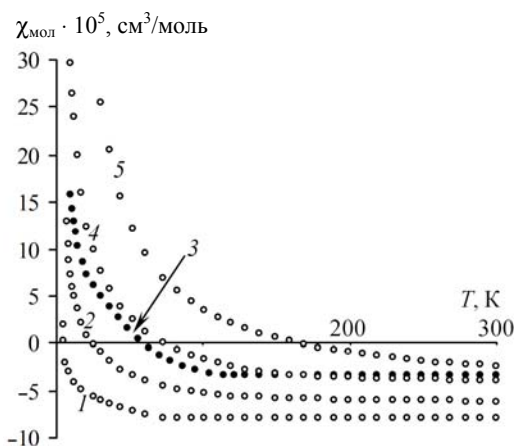


Рис. 2. Температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости индатов:
 1 – LaInO_3 ; 2 – $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$;
 3 – $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$; 4 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$;
 5 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{InO}_3$

По этой причине температурные зависимости величин обратной молярной восприимчивости ($1/\chi_{\text{мол}}$) исследованных твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,003; 0,004$) (рис. 3) получены с учетом величины и знака молярной магнитной восприимчивости при определенной температуре для LaInO_3 (рис. 2, кривая 1). Их анализ показывает, что для всего исследованного интервала температур 5–300 К (рис. 3а) закон Кюри – Вейсса (линейная зависимость $1/\chi_{\text{мол}}$ от T) не выполняется. Однако в интервале температур 20–100 К зависимость $1/\chi_{\text{мол}}$ от T является линейной (рис. 3б).

Для интервалов температур выполнения закона Кюри – Вейсса (рис. 3б) методом наименьших квадратов определены уравнения линейной зависимости $1/\chi_{\text{мол}}$ от T ($1/\chi_{\text{мол}} = a + bT$).

По коэффициентам a и b этих уравнений рассчитаны молярные постоянные Кюри ($C_M = 1/b$) и постоянные Вейсса ($\Theta = -a/b$) (табл. 2). Эффективный магнитный момент ионов Pr^{3+} ($\mu_{\text{эф, Pr}^{3+}}$) для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ рассчитывали по формуле (1)

$$\mu_{\text{эф, Pr}^{3+}} = 2,828\sqrt{C_M/x}. \quad (1)$$

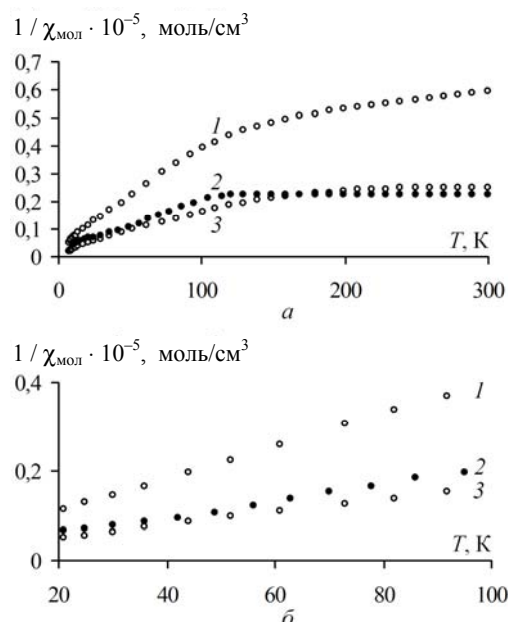


Рис. 3. Температурные зависимости обратной величины молярной магнитной восприимчивости с учетом поправки на диамагнетизм LaInO_3 в исследованном интервале температур 5–300 К (а) и в интервале температур выполнения закона Кюри – Вейсса 20–100 К (б) индатов:
 1 – $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$; 2 – $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$;
 3 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$

Полученные значения $\mu_{\text{эф, Pr}^{3+}}$ для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ с $x = 0,001; 0,003; 0,004$ равны 4,68; 3,81 и 3,73 μ_B соответственно. Как следует из расчетов, полученные значения эффективного магнитного момента ионов Pr^{3+} для твердых растворов $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$ отличаются незначительно от теоретической величины $\mu_{\text{теор, Pr}^{3+}} = 3,58 \mu_B$ [9].

Таблица 2

Молярная постоянная Кюри (C_M), постоянная Вейсса (Θ), эффективный магнитный момент ионов Pr^{3+} , Cr^{3+} ($\mu_{эф}$) в интервале температур выполнения закона Кюри – Вейсса для твердых растворов $La_{1-x}Pr_xInO_3$ ($x = 0,001; 0,003; 0,004$), $La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$

Состав	$C_M \cdot 10^2, \text{см}^3 \cdot \text{К} / \text{моль}$	$\mu_{эф}, \mu_B$	$\Theta, \text{К}$	$\Delta T, \text{К}$
$La_{0,999}Pr_{0,001}InO_3$	0,2740	4,68 (Pr^{3+})	-9,9	20–100
$La_{0,997}Pr_{0,003}InO_3$	0,5451	3,81 (Pr^{3+})	-12,2	20–100
$La_{0,996}Pr_{0,004}InO_3$	0,6956	3,73 (Pr^{3+})	-15,2	20–100
$La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$	0,5058	3,18 (Cr^{3+})	0,6	5–100

Исключение при определенной температуре вклада ионов Pr^{3+} в магнитную восприимчивость твердого раствора $La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$, содержащего одновременно парамагнитные ионы Pr^{3+} , Cr^{3+} , проведено по формуле (2) путем отнимания от величин молярной магнитной восприимчивости при определенной температуре этого твердого раствора величины молярной магнитной восприимчивости при этой же температуре твердого раствора $La_{0,996}Pr_{0,004}InO_3$:

$$\chi_{Cr^{3+}} = \chi_{La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3} - \chi_{La_{0,996}Pr_{0,004}InO_3} \quad (2)$$

Температурная зависимость величин обратных значений $\chi_{Cr^{3+}}$ для исследованного твердого раствора $La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$ приведена на рис. 4а. Для интервала температур выполнения закона Кюри – Вейсса 5–100 К (рис. 4б) рассчитаны молярная постоянная Кюри (C_M), постоянная Вейсса (Θ), эффективный магнитный момент ионов Cr^{3+} (табл. 2). Полученная величина эффективного магнитного момента иона хрома $\mu_{эф, Cr^{3+}}$, равная 3,18 μ_B , несколько ниже теоретической величины $\mu_{теор, Cr^{3+}} = 3,87 \mu_B$ [9].

При 5 К намагниченность твердых растворов $La_{0,997}Pr_{0,003}InO_3$, $La_{0,996}Pr_{0,004}InO_3$, $La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$ (рис. 5, кривые 3–5) при увеличении напряженности магнитного поля до 14 Тл увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое в поле напряженностью 14 Тл не достигается.

Установлено, что при 5 К для твердого раствора $La_{0,999}Pr_{0,001}InO_3$ (рис. 5, вставка) увеличение напряженности магнитного поля до 5 Тл приводит к постепенному возрастанию величины парамагнитной удельной намагниченности. При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля происходит снижение величины намагниченности за счет того, что диамагнитный вклад в намагниченность этого твердого раствора становится больше парамагнитного вклада, и в магнитном поле 12,5 Тл она переходит в диамагнитную область.

Удельная намагниченность при 5 К твердых растворов на основе индата лантана, содержа-

щего ионов Pr^{3+} более 0,1 мол. %, является положительной вплоть до магнитного поля 14 Тл.

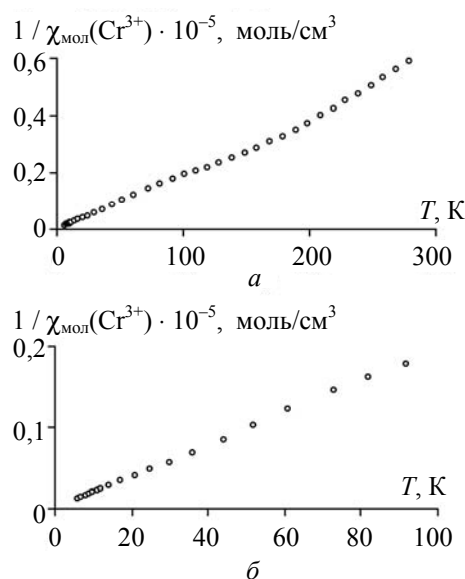


Рис. 4. Температурная зависимость обратной величины молярной магнитной восприимчивости $1 / \chi_{\text{мол}}(Cr^{3+})$ ионов Cr^{3+} в исследованном интервале температур 5–300 К (а) и в интервале температур выполнения закона Кюри – Вейсса 5–100 К (б) для твердого раствора $La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$

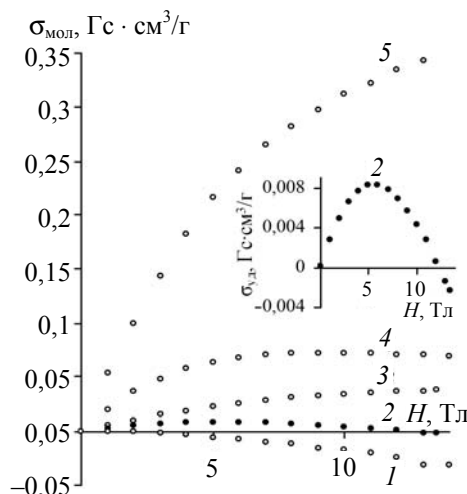


Рис. 5. Полевые зависимости удельной намагниченности при 5 К твердых растворов: 1 – $LaInO_3$; 2 – $La_{0,999}Pr_{0,001}InO_3$; 3 – $La_{0,997}Pr_{0,003}InO_3$; 4 – $La_{0,996}Pr_{0,004}InO_3$; 5 – $La_{0,996}Pr_{0,004}In_{0,996}Cr_{0,004}O_3$

Как видно на рис. 6, при температуре 300 К удельная намагниченность ($\sigma_{\text{уд}}$) всех исследованных твердых растворов на основе LaInO_3 имеет отрицательный знак и при росте величины магнитного поля возрастает практически линейно. Это показывает, что диамагнитная составляющая намагниченности этих твердых растворов при 300 К больше парамагнитной составляющей.

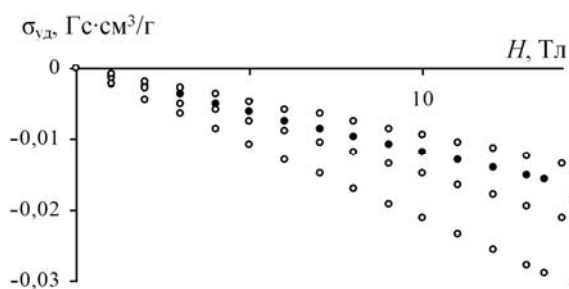


Рис. 6. Полевые зависимости удельной намагниченности при 300 К твердых растворов: 1 – $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$; 2 – $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$; 3 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$; 4 – $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$

Магнитные моменты ионов Pr^{3+} ($\mu_{\text{Pr}^{3+}}$) в твердых растворах $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,003; 0,004$) рассчитывали по формуле (3)

$$\mu_{\text{Pr}^{3+}} = \frac{(\sigma_{\text{уд La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3} - (1-x) \sigma_{\text{уд LaInO}_3})M}{5585x}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{уд La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3}$ – величина удельной намагниченности соответствующего твердого раствора при температуре 5 К в магнитном поле, отвечающем максимальному значению удельной намагниченности (табл. 3); $\sigma_{\text{уд LaInO}_3}$ – удельная намагниченность LaInO_3 при этом магнитном поле при температуре 5 К; M – молярная масса соответствующего твердого раствора; 5585 – число, равное произведению величины магнетона Бора на число Авогадро.

Магнитный момент ионов Cr^{3+} ($\mu_{\text{Cr}^{3+}}$) в твердом растворе $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ при температуре 5 К в магнитном поле напряженностью 14 Тл рассчитывали по формуле (4)

$$\mu_{\text{Cr}^{3+}} = \frac{(\sigma_{\text{уд La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3} - \sigma_{\text{уд La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3})M}{5585 \cdot 0,004}. \quad (4)$$

Проведенные по формуле (3) расчеты (табл. 3) показали, что полученные значения магнитных моментов ионов Pr^{3+} значительно меньше теоретического значения спин-орбитального магнитного момента иона Pr^{3+} ($\mu_{\text{теор, Pr}^{3+}} = 3,58 \mu_{\text{В}}$ [9]). Это свидетельствует о том, что магнитные поля, при которых наблю-

даются максимальные значения величины парамагнитной намагниченности (табл. 3), не приводят к полному магнитному упорядочению парамагнитных моментов ионов Pr^{3+} .

Таблица 3

Удельная намагниченность ($\sigma_{\text{уд}}$) и магнитный момент ионов $\text{Pr}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$ (μ) для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,003; 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ при температуре 5 К

Состав	$\sigma_{\text{уд}}$, Гс·см ³ /г	μ , $\mu_{\text{В}}$
$\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$	0,01397 ($\sigma_{\text{макс}}$ при 5 Тл)	0,75 (Pr^{3+})
$\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3$	0,06775 (при 13,5 Тл)	1,22 (Pr^{3+})
$\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3$	0,08673 ($\sigma_{\text{макс}}$ при 9Тл)	1,17 (Pr^{3+})
$\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$	0,35146 (при 14 Тл)	3,81 (Cr^{3+})

Заключение. В работе твердофазным методом из соответствующих оксидов получены твердые растворы $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ ($x = 0,001; 0,003; 0,004$), $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$. Установлено, что все полученные образцы являются однофазными и имеют кристаллическую структуру орторомбически искаженного перовскита типа GdFeO_3 . Показано, что температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{InO}_3$ с $x = 0,001; 0,003; 0,004$, $\text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ при температурах 25, 60, 73 и 165 К соответственно меняют знак и при более высоких температурах становятся отрицательными. Это указывает на то, что для исследованных твердых растворов на основе LaInO_3 вклады в магнитную восприимчивость парамагнитных ионов $\text{Pr}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$ и диамагнитной матрицы LaInO_3 отличаются между собой незначительно, причем парамагнитный вклад ионов $\text{Pr}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$ при повышении температуры уменьшается, а диамагнитный вклад от температуры не зависит. Установлено, что при 300 К увеличение напряженности магнитного поля до 14 Тл приводит к линейному увеличению диамагнитной удельной намагниченности всех исследованных твердых растворов. При температуре 5 К намагниченность твердых растворов $\text{La}_{0,997}\text{Pr}_{0,003}\text{InO}_3, \text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{InO}_3, \text{La}_{0,996}\text{Pr}_{0,004}\text{In}_{0,996}\text{Cr}_{0,004}\text{O}_3$ при увеличении напряженности магнитного поля до 14 Тл увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое, однако, не достигается. Установлено, что при 5 К для твердого раствора $\text{La}_{0,999}\text{Pr}_{0,001}\text{InO}_3$, в котором проведено незначительное замещение ионов

La³⁺ парамагнитными ионами Pr³⁺ (0,1 мол. %), увеличение магнитного поля до 5 Тл приводит к постепенному возрастанию величины парамагнитной удельной намагниченности. Однако при дальнейшем росте величины магнитного поля до 14 Тл происходит снижение намагни-

ченности и в магнитных полях выше 12,5 Тл она является диамагнитной. Удельная намагниченность твердых растворов на основе индата лантана, содержащего более 0,1 мол. % ионов Pr³⁺, является положительной при приложенных магнитных полях до 14 Тл.

Литература

1. Liu X., Lin J. Synthesis and luminescent properties of LaInO₃: RE³⁺ (RE = Sm, Pr and Tb) nanocrystalline phosphors for field emission displays // *Solid State Sci.* 2009. Vol. 11. P. 2030–2036.
2. Laksminarasimhan N., Varadaraju U. V. Luminescent host lattices, LaInO₃ and LaGaO₃—a reinvestigation of luminescence of d¹⁰ metal ions // *Mater. Res. Bull.* 2006. Vol. 41. P. 724–731.
3. Luminescent properties of a new red-emitting phosphor based on LaInO₃ for LED / An Tang [et al.] // *Optoelec. Adv. Mater.* 2011. Vol. 5. No. 10. Pp. 1031–1034.
4. The luminescence of Bi³⁺ in LaInO₃, and some other perovskites / L. I. Van Steensel [et al.] // *Mater. Res. Bull.* 1995. Vol. 30, issue 11. P. 1359–1362.
5. Башкиров Л. А., Кандидатова И. Н., Першукевич П. П. Сенсibiliзирующее воздействие ионов хрома (III) на фотолюминесценцию активированного ионами празеодима люминофора на основе индата лантана // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2014. Т. 58. № 1. С. 81–84.
6. Магнитная восприимчивость и эффективный магнитный момент ионов празеодима индатов Pr_{1-x}La_xInO₃ как перспективных материалов лазерной техники / И. Н. Кандидатова [и др.] // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 24–26 ноября 2010 г. Ч. 2. С. 286–289.
7. Powder Diffraction File. Swarthmore: Joint Committee on Powder Diffraction Standart: Card no. 00–047–0067.
8. Кандидатова И. Н., Башкиров Л. А., Петров Г. С. Термический анализ, тепловое расширение индатов празеодима-лантана Pr_{1-x}La_xInO₃ // Труды БГТУ. Сер. 3: Химия и технология неорган. в-в. 2012. С. 29–31.
9. Кринчик Г. С. Физика магнитных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1976. 367 с.

References

1. Liu X., Lin J. Synthesis and luminescent properties of LaInO₃: RE³⁺ (RE = Sm, Pr and Tb) nanocrystalline phosphors for field emission displays. *Solid State Sci.*, 2009, vol. 11, pp. 2030–2036.
2. Laksminarasimhan N., Varadaraju U. V. Luminescent host lattices, LaInO₃ and LaGaO₃ – a reinvestigation of luminescence of d¹⁰ metal ions. *Mater. Res. Bull.*, 2006, vol. 41, pp. 724–731.
3. Tang An., Zhang D., Yang L., Wang X. Luminescent properties of a new red-emitting phosphor based on LaInO₃ for LED. *Optoelec. Adv. Mater.*, 2011, vol. 5, no. 10, pp. 1031–1034.
4. Van Steensel L. I., Bokhove S. G., Van de Craats A. M. The luminescence of Bi³⁺ in LaInO₃, and some other perovskites. *Mater. Res. Bull.*, 1995, vol. 30, issue 11, pp. 1359–1362.
5. Bashkirov L. A., Kandidatova I. N., Pershukevich P. P. Chromium (III) ion as a sensitizer of photoluminescence of ion-activated praseodymium of phosphor based on lanthanum indate. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi* [Reports of the National academy of sciences of Belarus], 2014, vol. 58, no. 1, pp. 81–84 (In Russian).
6. Kandidatova I. N., Bashkirov L. A., Petrov G. S. [Magnetic susceptibility and effective magnetic moment of praseodymium ions in Pr_{1-x}La_xInO₃ indates as perspective laser materials]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. («Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie, ekologicheskii bezopasnye tekhnologii»)* [Materials of the International scientific and engineering conference (“Resource- and energy-saving technologies and equipment, ecology safely technologies”)]. Minsk, 2010, pp. 286–289 (In Russian).
7. Powder Diffraction File. Swarthmore: *Joint Committee on Powder Diffraction Standart*: Card no. 00–047–0067.
8. Kandidatova I. N., Bashkirov L. A., Petrov G. S. Thermal analysis, thermal expansion of praseodymium-lanthanum indates Pr_{1-x}La_xInO₃. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and Technology of Inorganic Substances, 2012, pp. 29–31 (In Russian).
9. Krinchik G. S. *Fizika magnitnykh yavleniy* [Physics of magnetic Phenomena]. Moscow, MGU Publ., 1976. 367 p.

Информация об авторах

Юшно Елена Казимировна – аспирант кафедры физической и коллоидной химии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Palma-2010@yandex.by

Башкиров Леонид Андреевич – доктор химических наук, профессор, профессор кафедры физической и коллоидной химии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Bashkirov@belstu.by

Лобановский Леонид Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Научно-практический центр по материаловедению Национальной академии наук Беларуси. (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 19, Республика Беларусь). E-mail: Lobanov@physics.by

Труханов Сергей Валентинович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Научно-практический центр по материаловедению Национальной академии наук Беларуси. (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 19, Республика Беларусь). E-mail: VSM@physics.by

Латушко Сергей Игоревич – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Smer444@mail.ru

Information about the authors

Yukhno Elena Kazimirovna – PhD student, the Department of Physical and Colloid Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Palma-2010@yandex.by

Bashkirov Leonid Andreevich – DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Physical and Colloid Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Bashkirov@belstu.by

Lobanovskiy Leonid Sergeevich – PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of The National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Lobanov@physics.by

Trukhanov Sergey Valentinovich – PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of The National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: VSM@physics.by

Latushko Sergey Igorevich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Smer444@mail.ru

Поступила 03.03.2016