

УДК 541.1+621.785.36+621.78.011

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОЛЮМИНОФОРОВ НА ОСНОВЕ LaIn_0^3 СО СТРУКТУРОЙ ПЕРОВСКИТА, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ Nd^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+}

© 2016 г. Е. К. Юхно*, Л. А. Башкиров*, Л. С. Лобановский**,
С. В. Труханов**, С. В. Слонская***

* Белорусский государственный технологический университет, Минск

**Научно-практический центр по материаловедению Национальной академии наук Беларусь, Минск

***Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск

e-mail: [bashkirov@belstu.by](mailto: bashkirov@belstu.by)

Поступила в редакцию 13.04.2015 г.

Твердофазным методом проведен синтез однофазных керамических образцов твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0^3$ ($0.007 < x < 0.05$), $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$, $\text{La}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{In}_{0.995}\text{Mn}_{0.005}\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Cr}^{3+}$, Mn^{3+}) и исследованы их кристаллическая структура, полевые зависимости намагниченности при 5 и 300 К и температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости. Установлено, что при 300 К увеличение напряженности магнитного поля до 14 Тл приводит к линейному увеличению удельной намагниченности твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0^3$ ($x = 0.02, 0.05$), $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Cr}^{3+}$, Mn^{3+}), $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.007}\text{In}_0^3$, $\text{LaIn}_{0.99}\text{Cr}_{0.01}\text{O}_3$ увеличивается линейно, но их намагниченность является диамагнитной. При температуре 5 К намагниченность всех исследованных индатов при увеличении напряженности магнитного поля увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое, однако, в поле 14 Тл не достигается. Для интервала температур выполнения закона Кюри–Вейса (5–30 К) полученные значения эффективных магнитных моментов ионов Nd^{3+} (ц. н^{3+}) для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0^3$ с $\text{Jc} = 0.007, 0.02, 0.05$ равны 2.95, 3.09, 2.75 х^6 соответственно, что значительно меньше теоретической величины ц. $\text{н}^{3+} = 3.62 \text{ рв}$. Установлено, что эффективные магнитные моменты ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} в твердых растворах $\text{LaIn}_{0.99}\text{Cr}_{0.01}\text{O}_3$, $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$ равны 3.87 х^6 и 5.11 х^6 соответственно и отличаются незначительно от теоретических значений ц. $\text{н}^{3+} = 3.87 \text{ и}^6$, и. $\text{н}^{3+} = 4.9 \text{ Цв}$.

DOI: 10.7868/S0002337X16010152

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие значительно повысился интерес к исследованиям спектров возбуждения люминесценции, спектров фотолюминесценции и магнитных свойств твердых растворов на основе LaIn_0^3 с кристаллической структурой перовскита, легированного ионами редкоземельных элементов Pr^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} , излучающих свет в видимой области [1–4]. В меньшей степени исследованы магнитные и фотолюминесцентные свойства твердых растворов на основе LaIn_0^3 , легированного ионами Nd^{3+} , излучающих свет в ИК-области спектра [5, 6]. Фотолюминофоры на основе LaIn_0^3 , содержащие незначительные количества парамагнитных ионов (менее 5 мол. %), являются в магнитном отношении сильно разбавленными твердыми растворами, однако их магнитные свойства практически не исследованы. Такие сильно разбавленные в магнитном отношении парамагнитные твердые растворы с темпера-

турой Нееля ниже 1 К являются перспективными материалами для получения сверхнизких температур путем их адиабатического размагничивания [7].

В связи с этим в настоящей работе впервые твердофазным методом проведен синтез твердых растворов на основе индата лантана со структурой перовскита $\text{La}^t\text{Nd}_x\text{In}_0^3$ ($\text{Jc} = 0.007, 0.02, 0.05$), $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$, $\text{LaIn}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{In}_{0.995}\text{Mn}_{0.005}\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Cr}^{3+}$, Mn^{3+}), изучены их кристаллическая структура, полевые зависимости намагниченности при 5 и 300 К в магнитных полях до 14 Тл, температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости, по которым рассчитаны эффективные магнитные моменты ионов Nd^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез керамических образцов твердых растворов на основе индата лантана LaIn_0^3 со структурой перовскита $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0^3$ ($x = 0.007, 0.02, 0.05$)

genic Ltd, London, 4IS) в ГО "Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению".

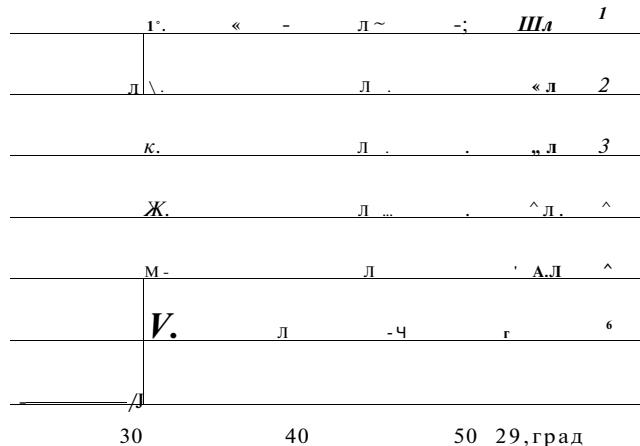


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы индатов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0\text{O}_3$ ($x = 0.007$ (1), 0.02 (2), 0.05 (3), $\text{LaIn}^{0.99}\text{Cr}^{0.01}\text{O}_3$ (4), $\text{LaIn}^{0.99}\text{Mn}^{0.01}\text{O}_3$ (5), $\text{La}^{0.95}\text{Nd}^{0.05}\text{In}^{0.995}\text{Cr}^{0.0053}$ (6), $\text{La}^{0.95}\text{Nd}^{0.05}\text{In}^{0.995}\text{Mn}^{0.0053}$ (7))

И $\text{UIn}_{0.99}\text{Mo}_{0.01}\text{O}_3$, $\text{Uo}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{In}_{0.995}\text{M}_{0.00503}$ ($\text{M} = \text{Cr}^{3+}$, Mn^{3+}), являющихся перспективными фотолюминофорами, излучающими в ИК-области света, проведен твердофазным методом из смесей оксидов лантана (U_{2}O_3), неодима (Nd_{2}O_3), индия (In_{2}O_3), хрома (Cr_{2}O_3), марганца (Mn^{2}O_3). Все реагенты имели квалификацию "х. ч.". Оксиды лантана и неодима были предварительно обожжены на воздухе при температуре 1273 К в течение 1 ч. Исходные оксиды, взятые в заданном молярном соотношении, смешивали и мололи в планетарной мельнице *Pulverizette* фирмы *Fritsch* с добавлением этанола в стаканчиках с шарами из диоксида циркония. Полученную шихту прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 и высотой 5–7 мм и затем обжигали на воздухе при температуре 1523 К в течение 6 ч. После предварительного обжига таблетки дробили, перемалывали, прессовали в бруски длиной 30 мм и сечением 5 × 5 mm^2 и снова обжигали в том же режиме. Рентгеновские дифрактограммы образцов индатов получены на дифрактометре *Bruker D8Advance* (излучение СиА_α) при комнатной температуре. 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 (140 кЭ, 11140.8 кА/м) и магнитная восприимчивость в интервале температур 5–300 К в магнитном поле 0.86 Тл (8.6 кЭ, 684.4 кА/м) полученных твердофазных растворов индатов измерены вибрационным методом на универсальной высокополевой измерительной системе *Cryo*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рентгеновских дифрактограмм (рис. 1) показывает, что полученные образцы $\text{U}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0\text{O}_3$ ($\text{JC} = 0.007$, 0.02, 0.05, дифрактограммы 1–3), $\text{LaIn}^{0.99}\text{Mn}^{0.01}\text{O}_3$ (дифрактограммы 4, 5) и $\text{La}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{In}_{0.995}\text{Cr}^{0.0053}$ (дифрактограммы 6, 7) являются однофазными. Значения параметров a , b , c кристаллической решетки полученных образцов индатов согласуются с данными работы [8], показавшими, что в системе LaIn_0O_3 – NdIn_0O_3 образуется непрерывный ряд твердофазных растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0\text{O}_3$.

Полученные при температурах 5 и 300 К зависимости удельной намагниченности (од) от напряженности магнитного поля Я до 14 Тл (140 кЭ) для твердофазных растворов $\text{U}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0\text{O}_3$ ($\text{JC} = 0.007$, 0.02, 0.05) (рис. 2) и $\text{UIn}_{0.99}\text{Mn}^{0.01}\text{O}_3$, $\text{Uo}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{In}_{0.995}\text{Mn}^{0.00503}$ ($\text{M} = \text{Cr}^{3+}$, Mn^{3+}) (рис. 3) показывают, что рост их намагниченности при 300 К при увеличении напряженности магнитного поля является линейным (рис. 2б, 3б), а при температуре 5 К наблюдается постепенный подход к состоянию магнитного насыщения (рис. 2а, 3а). При этом, как и следовало ожидать, увеличение содержания парамагнитных ионов Nd^{3+} в твердофазных растворах $\text{U}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0\text{O}_3$ приводит при температуре 5 К при одинаковых значениях напряженности магнитного поля к увеличению удельной намагниченности (рис. 2а). Так как при повышении температуры парамагнитная составляющая намагниченности уменьшается, а диамагнитная составляющая от температуры не зависит, то при температурах выше =150 К парамагнитная составляющая удельной намагниченности исследованных твердофазных растворов $\text{U}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_0\text{O}_3$ ($0.02 < x < 0.05$) лишь незначительно больше диамагнитной составляющей. При температурах выше =185 К (рис. 2б, вставка) диамагнитная составляющая удельной намагниченности твердофазного раствора с $x = 0.007$ больше величины парамагнитной составляющей и удельная намагниченность этого твердофазного раствора при температуре 300 К имеет отрицательный знак (рис. 2б, кривая 1). По этой же причине при температуре 300 К удельная намагниченность твердофазного раствора $\text{LaIn}^{0.99}\text{Cr}^{0.01}\text{O}_3$ также имеет отрицательный знак (рис. 3б, кривая 7), т.к. в нем диамагнитная составляющая намагниченности при температурах выше 250 К (рис. 3б, вставка) по абсолютной величине больше парамагнитной составляющей, обусловленной ионами Cr^{3+} . Однако удельная намагниченность твердофазного раствора $\text{LaIn}^{0.99}\text{Mn}^{0.01}\text{O}_3$, в котором также 1 мол. % диамагнитных ионов In^{3+} замещено парамагнитными

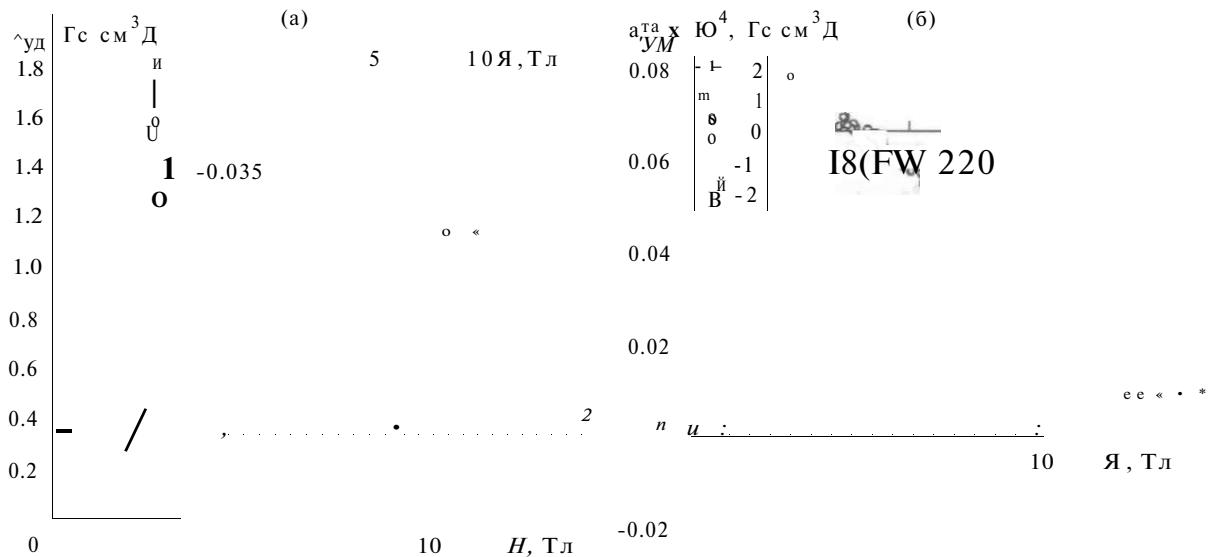


Рис. 2. Полевые зависимости удельной намагниченности твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{NdJ}_x\text{In}03$ с $x = 0.007$ (1), 0.02 (2), 0.05 (3) и $\text{La}0.993\text{Mn}0.007\text{InO}3$ в поле 0.86 Тл (б, вставка Γ).

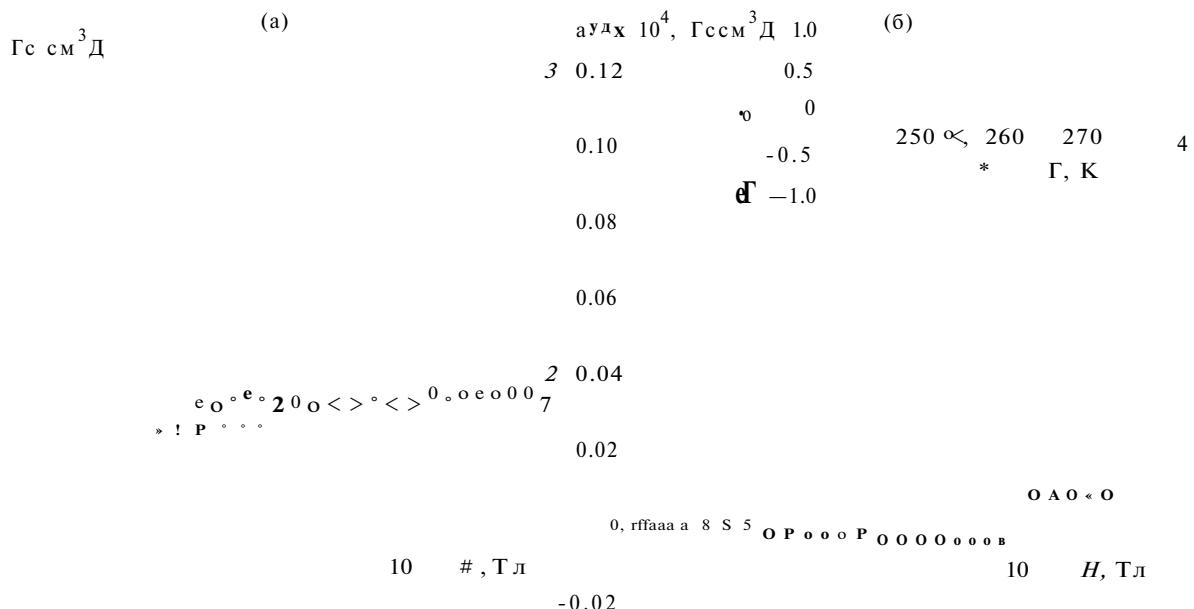


Рис. 3. Полевые зависимости удельной намагниченности твердых растворов $\text{LaIn}0.99\text{Cr}0.01\text{O}3$ (1), $\text{LaIn}0.99\text{Mn}0.007\text{O}3$ (2), $\text{La}0.95\text{NiCl}0.05\text{In}0.995\text{Cr}0.005\text{O}3$ (3), $\text{La}0.95\text{NdQ}0.05\text{In}0.995\text{Mn}0.005\text{O}3$ (4) при 5 (а), 300 К (б) и температурная зависимость удельной намагниченности твердого раствора $\text{LaIn}0.99\text{Cr}0.01\text{O}3$ в поле 0.86 Тл (б, вставка Γ).

ионами Mn^{3+} , при 300 К остается парамагнитной (рис. 3б, кривая 2).

Магнитные моменты ионов Nd^{3+} ($\text{n}^{\text{Nd}}\text{J}^{\text{3}}$) в твердых растворах $\text{La}^{1-x}\text{NdIn}^{\text{3}}$ рассчитывали по экспериментально полученным значениям удельной намагниченности этих индатов ($\text{a}_{\text{уд}} \text{ и } \text{jojo}_i$) измеренных при 5 К в магнитном поле 14 Тл, с учетом

величины диамагнитной удельной намагниченности $\text{LaIn}0.99\text{O}$ ($\text{o}_{\text{уд}} \text{ LaInO}$)

, равной $-0.03169 \text{ Гс см}^3/\text{г}$, определенной в магнитном поле 14 Тл при 5 К (рис. 2а, вставка). Расчет $\text{c}_{\text{уд}}$ в единицах магнетона Бора (c^{B}) проведен по формуле

$$\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{InO} - (1 - x)a_{\text{уд}} \text{ LaInO}^{-*}$$

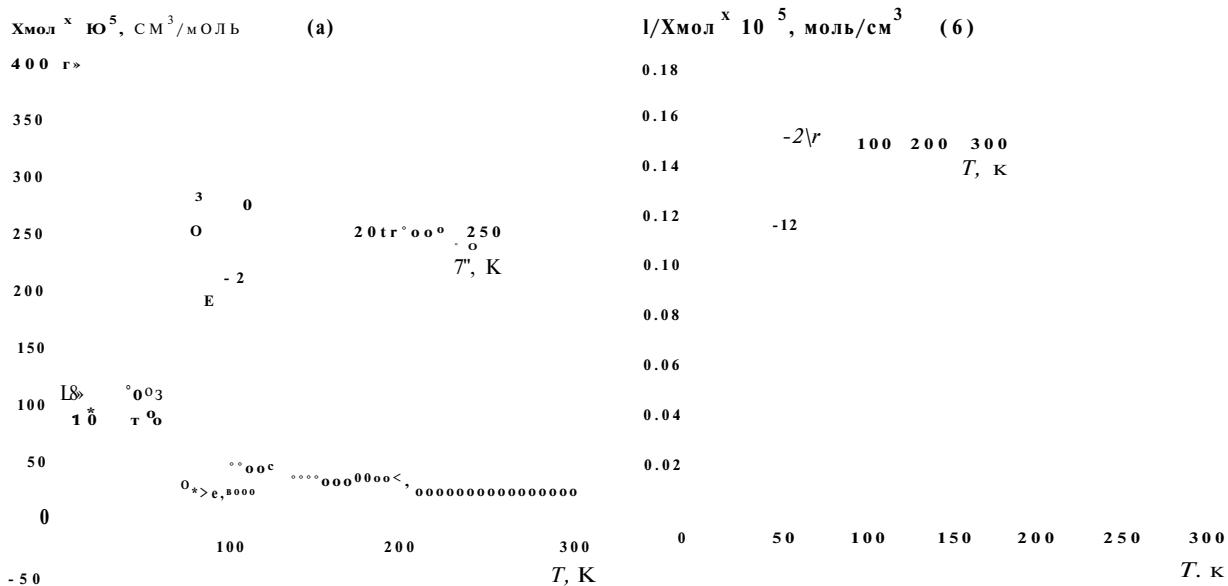


Рис. 4. Температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости (а) и обратной величины молярной магнитной восприимчивости с учетом поправки на диамагнетизм $\text{LaIn}0^3$ (б) твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{NdJn}0^3$ с $x = 0.007$ (1, вставка Г), 0.02 (2), 0.05(3), $\text{LaIn}0^3$ (б, вставка).

где M — молярная масса соответствующего твердого раствора, 5585 — число, равное произведению величины магнетона Бора на число Авогадро.

Проведенные по формуле (1) расчеты показали, что магнитные моменты ионов Nd^{3+} для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{NdJn}0^3$ с $x = 0.007, 0.02, 0.05$ при температуре 5 К в магнитном поле 14 Тл равны 1.48, 1.34, 1.34 χ^g соответственно, что значительно меньше теоретического значения спин-орбитального магнитного момента иона Nd^{3+} ($\mu_{\text{Nd}}^+ = 3.62 \chi^g$ [9]), но отличается незначительно от величины χ^g = 1.19 χ^g , полученной в работе [5] также по удельной намагниченности в магнитном поле 14 Тл и при температуре 5 К для твердого раствора $\text{La}0^9\text{Nd}^0$ $\text{La}0^3$.

По значениям удельной намагниченности твердых растворов $\text{LaIn}0^9\text{Cr}0^0\text{O}^3$, $\text{LaIn}0^9\text{Mn}0^0\text{O}^3$, измеренной при 5 К в магнитном поле 14 Тл (рис. 3а), с учетом поправки на диамагнетизм индата $\text{LaIn}0^3$ (рис. 2а, вставка), методом, аналогичным использованному при расчете магнитного момента ионов Nd^{3+} , были рассчитаны магнитные моменты ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} ($\mu_{\text{Cr}}^+, \mu_{\text{Mn}}^+$) в твердых растворах на основе $\text{LaIn}0^3$, в котором 1 мол. % ионов In^{3+} замещен ионами Cr^{3+} или Mn^{3+} . Установлено, что спиновой магнитный момент ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} в твердых растворах $\text{LaIn}0^9\text{Cr}0^0\text{O}^3$, $\text{LaIn}0^9\text{Mn}0^0\text{O}^3$ при 5 К равен 2.47 и 2.87 χ^g соответственно, что значительно меньше теоретических значений спинового магнитного момента ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} , равных 3 и 4 χ^g соответственно.

Это показывает, что магнитное поле в 14 Тл не приводит эти твердые растворы к полному магнитному насыщению.

Температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости в интервале температур 5–300 К (χ_{mol}) исследованных твердых растворов на основе индата лантана $\text{La}^{1-x}\text{NdJn}0^3$ ($x = 0.007, 0.02, 0.05$) приведены на рис. 4а, а твердых растворов $\text{LaIn}0.99\text{Mo}0.01\text{O}^3$, $\text{La}0.95\text{Nd}0.05\text{In}0.995\text{Mo}0.0050^3$ ($M = \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{3+}$) — на рис. 5. Следует отметить, что температурная зависимость молярной магнитной восприимчивости для твердого раствора $\text{La}0.993\text{Nd}0.007\text{In}0^3$ при температуре = 185 К меняет знак и при $T > 185$ К она становится отрицательной (рис. 4а, вставка Г'). Это показывает, что для твердого раствора $\text{La}_{1-x}\text{NdJn}0^3$ с $x = 0.007$ вклады в магнитную восприимчивость парамагнитных ионов Nd^{3+} и диамагнитной матрицы $\text{LaIn}0^3$ различаются незначительно. По этой причине температурные зависимости величин обратной молярной магнитной восприимчивости ($1/\chi_{\text{mol}}$) исследованных твердых растворов $\text{La}^{1-x}\text{NdJn}0^3$ ($x = 0.007, 0.02, 0.05$) (рис. 4б) получены с учетом величин и знака молярной магнитной восприимчивости при определенной температуре для $\text{LaIn}0^3$ (рис. 4б, вставка). Их анализ показывает, что для всего исследованного интервала температур (5–300 К) закон Кюри–Вейса (линейная зависимость $1/\chi_{\text{mol}}^{\text{от}} T$) не выполняется. Однако в интервале температур 5–30 К зависимость $1/\chi_{\text{mol}}^{\text{от}} T$ является линейной (рис. 6).

Для интервалов температур выполнения закона Кюри–Вейса методом наименьших квадратов

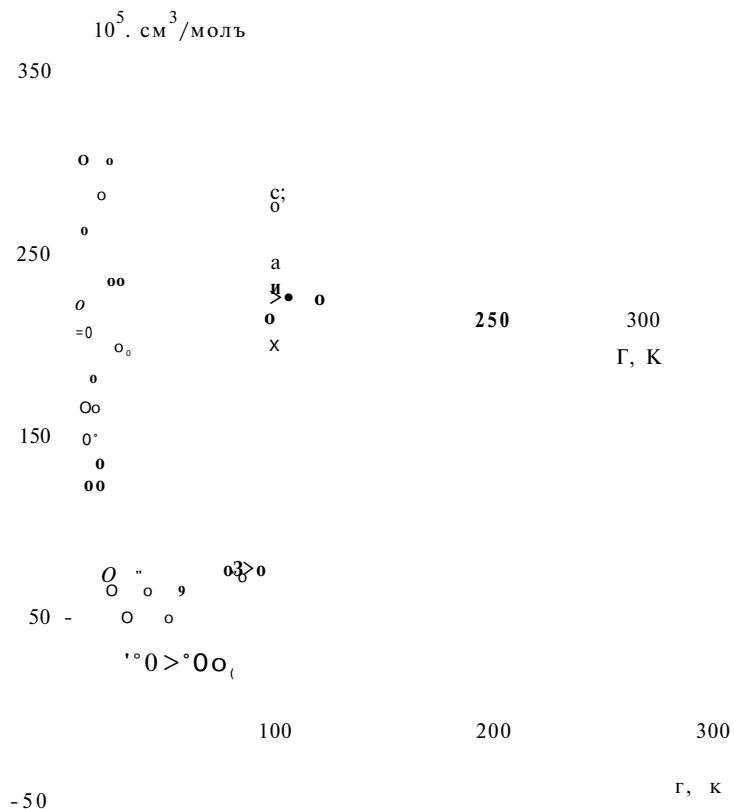


Рис. 5. Температурные зависимости молярной магнитной восприимчивости твердых растворов $\text{LaIn}^{99}\text{Cr}0.01\text{O}_3$ (1, вставка), $\text{LaIn}^{99}\text{Mn}^0\text{O}_3$ (2), $\text{La}^{0.95}\text{Nd}^0.05\text{In}^{0.95}\text{Cr}^0.005\text{O}_3$ (J), $\text{La}0.95\text{Nd}^0.05\text{In}^{0.95}\text{O}_3$ (3)

определенены уравнения линейной зависимости $1/X \text{ моль}^{-1} \text{ см}^3/\text{моль} = a + bT$. По коэффициентам a и b этих уравнений рассчитаны молярные постоянные Кюри ($C_m = 1/b$) и постоянные Вейса ($0 = -a/b$) (таблица). Эффективный магнитный момент ионов Nd^{3+} ($\mu_{\text{шз.}}$) для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ рассчитывали по формуле (см. таблицу):

$$U \cdot W = 2.828^8. \quad (2)$$

Полученные значения $\mu_{\text{шз.}}$ для разбавленных в магнитном отношении твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ с $x = 0.007, 0.02, 0.05$ равны 2.95, 3.09, 2.75 μ_B соответственно, что значительно меньше теоретической величины $\mu_{\text{шз.}} = 3.62 \mu_B$ для свободных ионов Nd^{3+} [9], но согласуется с величиной $\mu_{\text{шз.}} = 3.12 \mu_B$ для твердого раствора $\text{La}^{0.9}\text{Nd}^{0.1}\text{In}_3$, полученной в работе [5]. Такое уменьшение спин-орбитального магнитного момента ионов Nd^{3+} в твердых растворах $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ с $0.007 < x < 0.05$, вероятно, вызвано частичным "замораживанием" орбитального магнитного момента ионов Nd^{3+} кристаллическим полем орто-ромбически искаженного перовскита [10].

Эффективный магнитный момент ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} для твердых растворов $\text{LaIn}^{99}\text{Cr}0.01\text{O}_3$, $\text{LaIn}^{99}\text{Mn}^0\text{O}_3$ в интервале температур выполнения закона Кюри—Вейсса рассчитывали по формуле (3)

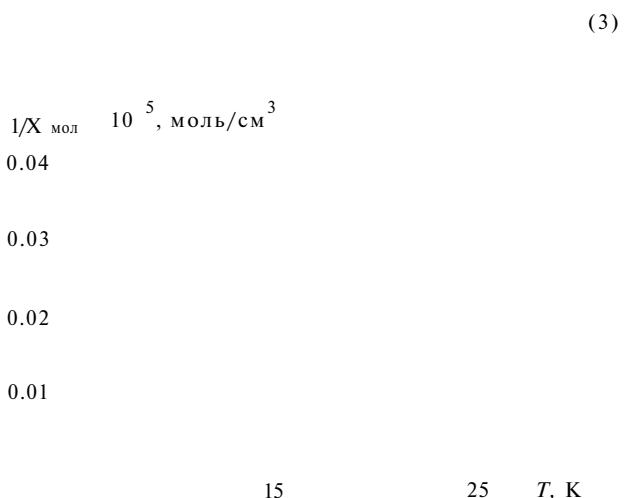


Рис. 6. Температурные зависимости обратной величины молярной магнитной восприимчивости с учетом поправки на диамагнетизм $\text{LaIn}^{99}\text{Cr}0.01\text{O}_3$ твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ с $x = 0.007$ (1), 0.02 (2), 0.05 (3).

Молярная постоянная Кюри (C_m), постоянная Вейсса (0), эффективный магнитный момент ионов Nd^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} ($\mu_{\text{эф}}$) в интервале температур выполнения закона Кюри–Вейса для твердых растворов $La_{1-x}Nd_xJn_3$ ($x = 0.007, 0.02, 0.05$); $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Cr_{0.005}O_3$, $LaIn_{0.99}Mn_{0.01}O_3$ ($M = Cr^{3+}$, Mn^{3+}), $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Mn_{0.005}O_3$

Состав	$C_m \times 10^2$, $\text{см}^3 \text{К/моль}$	$\mu_{\text{эф}} \times 10^3$	0, К	AT , К
$La_{0.993}Nd_{0.007}In_3O_3$	0.7657	2.96 (Nd^{3+})	- 1.9	5-30
$La_{0.98}Nd_{0.02}In_3O_3$	2.3923	3.09 (Nd^{3+})	- 7.9	5-30
$La_{0.95}Nd_{0.05}In_3O_3$	4.7393	2.75 (Nd^{3+})	- 1.2	5-30
$LaIn_{0.99}Cr_3O_3$	1.8762	3.87 (Cr^{3+})	- 2.9	5-300
$La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Cr_{0.005}O_3$	0.6711	3.28 (Cr^{3+})	1.5	5-300
$LaIn_{0.99}Mn_3O_3$	3.2679	5.11 (Mn^{3+})	- 5.5	5-100
$La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Mn_{0.005}O_3$	1.4619	4.84 (Mn^{3+})	4.9	5-300

где C_m — молярная постоянная Кюри соответствующего твердого раствора, содержащего ионы Cr^{3+} или Mn^{3+} , значения которых приведены в таблице.

Исключение при определенной температуре вклада ионов Nd^{3+} в молярную магнитную восприимчивость твердых растворов $La_{1-x}Nd_xIn_3O_3$ ($M = Cr^{3+}$, Mn^{3+}), содержащих одновременно парамагнитные ионы Nd^{3+} , Cr^{3+} или Nd^{3+} , Mn^{3+} , проведено путем отнимания от величин молярной магнитной восприимчивости для этих твердых растворов, величины молярной магнитной восприимчивости для твердого раствора $La_{0.95}Nd_{0.05}In_3O_3$. В результате таких расчетов

$$(XLa_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Cr(Mn)_{0.005}O_3 \sim Xba_{0.5}Nd_{0.05}In_3O_3 = XCr^{3+}(Mn^{31})^{\sim}$$

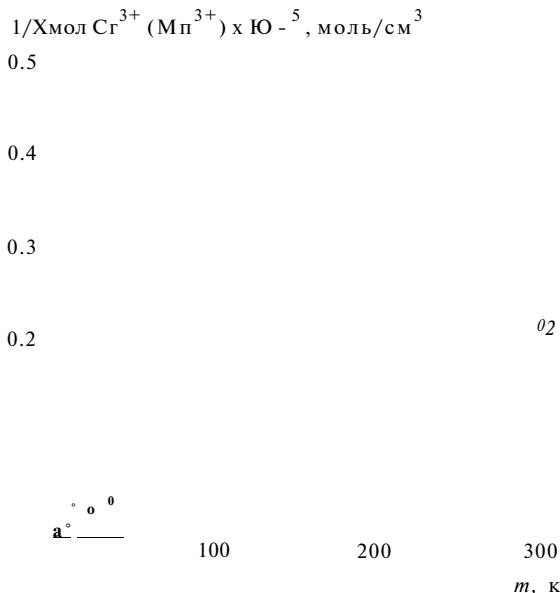


Рис. 7. Температурные зависимости обратной величины молярной магнитной восприимчивости ионов Cr^{3+} (1) и Mn^{3+} (2) в твердых растворах $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Cr_{0.005}O_3$, $LaIn_{0.99}Mn_3O_3$ соответственно.

при различных температурах были получены температурные зависимости вкладов ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} ($X_{Cr^{34}} \times X_{Mn^{31}}$) в молярную магнитную восприимчивость твердых растворов $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Cr_{0.005}O_3$, $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Mn_3O_3$. Температурные зависимости величин обратных значений $\frac{1}{X} \times 10^3$ для этих исследованных твердых растворов приведены на рис. 7, по ним рассчитаны молярные постоянные Кюри (C_m), постоянные Вейса (0) (таблица). Эффективные магнитные моменты ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} ($\mu_{\text{эф},Cr^{3+}}$, $\mu_{\text{эф},Mn^{3+}}$) рассчитаны по формуле:

$$\mu_{\text{эф},Cr^{3+}} = 2.828 \times C_m / 0.005. \quad (4)$$

Данные, приведенные в таблице, показывают, что эффективные магнитные моменты ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} в твердых растворах $LaIn_{0.99}Cr_3O_3$, $LaIn_{0.99}Mn_3O_3$, рассчитанные по формуле (3), равны 3.87 и 5.11 μ_B соответственно, они отличаются незначительно от теоретических значений эффективных магнитных моментов ионов Cr^{3+} ($\mu_{\text{эф},Cr^{3+}} = 3.87 \mu_B$, [9]) и ионов Mn^{3+} ($\mu_{\text{эф},Mn^{3+}} = 4.9 \mu_B$ [9]). Эффективные магнитные моменты ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} для твердых растворов $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Cr_{0.005}O_3$, $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Mn_3O_3$, рассчитанные по формуле (4), равны 3.28 и 4.84 μ_B соответственно. Такие незначительные отличия рассчитанных по формулам (3), (4) значений $\mu_{\text{эф},Cr^{3+}}$ и $\mu_{\text{эф},Mn^{3+}}$ от теоретических величин эффективных магнитных моментов ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} показывает, что степень окисления ионов хрома и марганца в исследованных твердых растворах $LaIn_{0.99}Cr_3O_3$, $La_{0.95}Nd_{0.05}In_{0.995}Mn_3O_3$ ($M = Cr^{3+}$, Mn^{3+}) равна 3+.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при 300 К увеличение напряженности магнитного поля до 14 Тл приводит к линейному увеличению удельной намаг-

ниченности твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ ($x = 0.02, 0.05$), $\text{La}_{0.95}\text{Nd}_{0.05}\text{In}_{0.995}\text{M}_{0.005}\text{O}_3$ ($\text{M} - \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{3+}$), $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$, а абсолютная величина удельной намагнченности твердых растворов $\text{La}_{0.993}\text{Nd}_{0.007}\text{InO}_3$, $\text{LaIn}_{0.99}\text{Cr}_{0.01}\text{O}_3$ увеличивается линейно и она является диамагнитной. При температуре 5 К намагнченность всех исследованных твердых растворов на основе LaIn_3 при увеличении напряженности магнитного поля увеличивается нелинейно с постепенным подходом к магнитному насыщению, которое однако в поле 14 Тл не достигается. Для интервала температур выполнения закона Юри–Вейса (5–30 К) полученные значения эффективных магнитных моментов ионов Nd^{3+} (и Cr^{3+}) для твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ с $x = 0.007, 0.02, 0.05$ равны 2.95, 3.09, 2.75 μB соответственно, что значительно меньше теоретической величины $\mu_{\text{eff}} = 3.62 \mu\text{B}$. Установлено, что эффективные магнитные моменты ионов Cr^{3+} , Mn^{3+} в твердых растворах $\text{LaIn}_{0.99}\text{Cr}_{0.01}\text{O}_3$, $\text{LaIn}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_3$ равны 3.87 и 5.11 μB соответственно и отличаются незначительно от теоретических значений $\mu_{\text{eff}} = 3.87 \mu\text{B}$, и $\mu_{\text{eff}} = 4.9 \mu\text{B}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu X., Lin J. Synthesis and Luminescent Properties of $\text{LaIn}_3:\text{RE}_{3+}$ ($\text{RE} = \text{Sm, Pr and Tb}$) Nanocrystalline Phosphors for Field Emission Displays // Solid State Sci. 2009. V. 11. P. 2030–2036.
2. Laksminarasimhan N., Varadaraju U.V. Luminescent Host Lattices, LaIn_3 and LaGa_3 —A Reinvestigation of Luminescence of d^{10} Metal Ions // Mater. Res. Bull. 2006. V. 41. P. 724–731.
3. Tang An., Zhang D., Yang L., Wang X. Luminescent Properties of a New Red-Emitting Phosphor Based on LaIn_3 for LED // Optoelec. Adv. Mater. 2011. V. 5. № 10. P. 1031–1034.
4. Lee G.-H., Kang S. Solid Solution Red Phosphors for White LED // J. Lumin. 2011. V. 131. P. 2582–2588.
5. Кандидатова И.Н., Башкиров Л.А., Петров Г.С. и др. Магнитная восприимчивость и эффективный магнитный момент ионов неодима индатов $\text{Nd}_{1-x}\text{LaIn}_3$ // Тр. БГТУ. № 3. Химия и технология неорганических веществ. 2011. С. 71–74.
6. Кандидатова И.Н. Спектры люминесценции твердых растворов $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{In}_3$ ($0.0 < x < 0.3$) со структурой первоскита // Современные проблемы химии: сб. тез. докл. 14^{ой} международной конференции студентов и аспирантов. (15–17 мая 2013 г.) Киев: Киевский университет, 2013. С. 149.
7. Карлин Р. Магнетохимия. М.: Мир, 1989. 400 с.
8. Петров Г.С., Башкиров Л.А., Лубинский П.П. и др. Физико-химические свойства индатов неодима, лантана // Тр. БГТУ. Сер. III. Химия и технология неорганических веществ. 2010. Вып. XVIII. С. 103–107.
9. Критик Г.С. Физика магнитных явлений М.: Изд-во МГУ, 1976. 367 с.
10. Звездин А.К., Матвеев В.М., Мухин А.А. и др. Редкоземельные ионы в магнитоупорядоченных кристаллах М.: Наука, 1985. 288 с.