

ФИЗИКА

PHYSICS

УДК 536.424

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-268-273>

Поступило в редакцию 14.03.2018

Received 14.03.2018

Член-корреспондент И. О. Троянчук¹, М. В. Бушинский¹, Н. В. Терешко¹, А. Н. Чобот¹,
О. С. Мانتыцкая¹, Г. М. Чобот², В. М. Добрянский², С. Н. Пастушонок³

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

³Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

ПРИЧИНА МЕТАМАГНИТНОГО ПЕРЕХОДА В $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$

Аннотация. Исследованы магнитные свойства перовскита $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$, полученного при различных условиях синтеза. Показано, что образец, полученный при 1500 °С, проявляет метамгнитный переход, тогда как у образца, полученного при 1200 °С, наблюдалась полевая зависимость намагниченности, характерная для ферромагнетиков. Оба образца имеют температуру Кюри $T_C = 123$ К и приблизительно равную намагниченность в больших магнитных полях. Метамгнетизм связан с переходом из неколлинеарной в коллинеарную магнитную фазу, тогда как наличие кластеров с упорядочением ионов Co^{2+} и Mn^{4+} ведет к ферромагнетизму. Неколлинеарная фаза образуется вследствие конкуренции положительных Co^{2+} – Mn^{4+} и отрицательных Mn^{4+} – Mn^{4+} , Co^{2+} – Co^{2+} взаимодействий, а также наличия большой магнитной анизотропии.

Ключевые слова: обменное взаимодействие, намагниченность, фазовые превращения, магнитные материалы

Для цитирования: Причина метамгнитного перехода в $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / И. О. Троянчук [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 268–273. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-268-273>

Corresponding Member Igor O. Troyanchuk¹, Maxim V. Bushinsky¹, Nina V. Tereshko¹, Aleksandra N. Chobot¹,
Olga S. Mantyskaya¹, Gennadii M. Chobot², Valerij M. Dobraynsky², Sofija N. Pastushonok³

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

³Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

REASON FOR A METAMAGNETIC TRANSITION IN $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$

Abstract. The magnetic properties of perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$, obtained under different synthesis conditions, have been studied. It is shown that the sample obtained at 1500 °C exhibits a metamagnetic transition, whereas in the sample obtained at 1200 °C, the field dependence of magnetization as in a ferromagnet was observed. The both samples have $T_C = 123$ K and approximately equal to magnetization in large magnetic fields. Metamagnetism is associated with a transition from a noncollinear to a collinear magnetic phase, whereas the presence of clusters with the ordering of Co^{2+} and Mn^{4+} ions leads to ferromagnetism. The noncollinear phase is formed due to the competition of positive Co^{2+} – Mn^{4+} and negative Mn^{4+} – Mn^{4+} , Co^{2+} – Co^{2+} interactions and due to large magnetic anisotropy.

Keywords: exchange interactions, magnetization, phase transitions, magnetic materials

For citation: Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Tereshko N. V., Chobot A. N., Mantyskaya O. S., Chobot G. M., Dobraynsky V. M., Pastushonok S. N. Reason for a metamagnetic transition in $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 268–273 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-268-273>

Введение. Редкоземельные манганиты RMnO_3 (R – редкоземельный ион) со структурой перовскита вызывают повышенный интерес у исследователей благодаря колоссальному магнито-резистивному эффекту, обнаруженному в этих соединениях [1]. Магнитное состояние этих соединений можно изменить с антиферромагнитного на ферромагнитное либо путем замещения

трехвалентных редкоземельных ионов двухвалентными ионами Ca, Sr, Ba [2], либо замещением ионов марганца ионами переходных металлов, например, Co или Ni [3].

Согласно работам [3; 4], ферромагнитное упорядочение в системе $\text{LaMn}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}$) наблюдается в диапазоне $0,2 \leq x \leq 0,5$. Обнаружено, что составы с $x = 0,5$ имеют наибольшую температуру Кюри, которая для составов $\text{LaMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ и $\text{LaMn}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_3$ может достигать 240 и 280 К соответственно. Гуденаф предположил, что ионы Mn, Co и Ni в этих соединениях находятся в одинаковом окислительном состоянии 3^+ [3]. Поскольку ионы трехвалентного кобальта в низкоспиновом состоянии являются диамагнитными, то ферромагнетизм в этом случае обусловлен сверхобменными взаимодействиями $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$ [3]. Исследование перовскитов $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}(\text{Mn}_{1-x}\text{M}_x)\text{O}_3$ (M – металл), содержащих ионы Mn^{3+} и немагнитные ионы Ti^{4+} или Nb^{5+} , показало, что сверхобменные взаимодействия $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$ могут быть положительными [4]. Кроме того, ферромагнетизм составов $\text{RMn}_{1-x}\text{M}_x\text{O}_3$ рассматривался в рамках концепции двойных обменных взаимодействий $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{4+}$ [5; 6], а также сверхобменных взаимодействий $\text{Mn}^{4+}-\text{O}-\text{Mn}^{2+}$ [7–9]. Так, в [7] было предположено, что ферромагнетизм $\text{LaMn}_{0,5}(\text{Co},\text{Ni})_{0,5}\text{O}_3$ обусловлен сверхобменными магнитными взаимодействиями $\text{Mn}^{4+}-\text{O}-\text{Co}^{2+}(\text{Ni}^{2+})$, поскольку разновалентное состояние ионов $\text{Co}^{2+}(\text{Ni}^{2+})$ и Mn^{4+} является более стабильным, чем состояние только из трехвалентных ионов $\text{Co}^{3+}(\text{Ni}^{3+})$ и Mn^{3+} .

В [10–12] было показано, что система $\text{LaMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ в зависимости от условий получения может иметь разные кристаллоструктурные искажения и проявлять различные магнитные свойства. Согласно результатам, полученным в этих работах, в составе $\text{LaMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ существует две ферромагнитные фазы с различными температурами Кюри из-за различных окислительных состояний ионов и типов сверхобменных взаимодействий, характерных для этих фаз. Было предположено, что в фазе с более высокой температурой Кюри ионы Co находятся в трехвалентном низкоспиновом состоянии и ферромагнетизм возникает за счет положительных сверхобменных взаимодействий $\text{Mn}^{3+}-\text{O}-\text{Mn}^{3+}$. В другой фазе, которая имеет более низкую температуру Кюри, ферромагнитное упорядочение возникает благодаря $\text{Mn}^{4+}-\text{O}-\text{Co}^{2+}$ сверхобменным взаимодействиям [10; 11]. Подобное магнитное фазовое расслоение было обнаружено также в составах $\text{RMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$) [12; 13].

Близким аналогом системы $\text{LaMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ является менее изученная система $\text{EuMn}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$, содержащая немагнитные ионы Eu^{3+} . Температура ферромагнитного упорядочения в этой системе возрастает с увеличением концентрации ионов Co, может достигать максимального значения $T_C = 140$ К в составе $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$, а затем падает в составах с большой концентрацией ионов Co [14]. Исследование валентных состояний методом рентгеновской спектроскопии и магнитных свойств разупорядоченного перовскита $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ выявило, что ионы Co и Mn находятся в окислительном состоянии 2^+ и 4^+ соответственно, а содержание ионов с другой валентностью очень мало [15]. Из измерений магнитной восприимчивости и удельной теплоемкости было обнаружено формирование магнитоупорядоченного состояния при $T_C \sim 120$ К, которое проявляет как ферромагнитные, так и спин-стекольные магнитные свойства [15]. Предположено, что во внешнем магнитном поле антиферромагнитные кластеры вызывают метамагнитный фазовый переход первого рода [15]. Однако метамагнитный переход проявляет черты кооперативного явления [14], что не согласуется с этой гипотезой. Для выяснения причины данного метамагнитного перехода нами были изучены магнитные свойства образцов состава $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$, полученных при различных температурах синтеза.

Материалы и методы исследования. Образцы состава $\text{EuMn}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ были получены методом твердофазных реакций по обычной керамической технологии на воздухе. Исходные простые оксиды высокой чистоты Eu_2O_3 , Co_3O_4 и Mn_2O_3 были взяты в стехиометрическом соотношении и тщательно смешаны (260 об/мин, 30 мин) в планетарной шаровой мельнице фирмы RETSCH PM-100. Синтез проводился в два этапа. На первом этапе образцы обжигались при температуре 1120 °С в течение 10 ч и затем охлаждались вместе с печью 10 ч. На втором этапе получено два разных образца, один из которых синтезирован при температуре 1200 °С в течение 4 ч, температура синтеза другого была максимально возможной – 1500 °С, время синтеза – 3 ч для повышения гомогенности. После синтеза образцы обеих серий быстро охлаждались с выключен-

ченной печи. Рентгенофазовый анализ, выполненный на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М, показал, что образцы обеих серий были однофазными и имели орторомбически искаженную элементарную ячейку. Температурные и полевые измерения намагниченности были выполнены на универсальной установке для измерения физических свойств фирмы Cryogenic Ltd.

Результаты и их обсуждение. Согласно рентгеновским исследованиям оба образца, полученные при 1200 и 1500 °С, имеют одинаковую орторомбически искаженную кристаллическую структуру (пространственная группа $Pnma$) с приблизительно одинаковыми параметрами элементарной ячейки: $a = 5,567(6)$ Å, $b = 7,563(8)$ Å, $c = 5,321(5)$ Å и $a = 5,570(5)$ Å, $b = 7,566(7)$ Å, $c = 5,319(4)$ Å соответственно (рис. 1). Признаков упорядочения ионов Co^{2+} и Mn^{4+} в обоих образцах не обнаружено.

Температурные зависимости намагниченности образцов $EuMn_{0,5}Co_{0,5}O_3$, измеренные в почти нулевом поле, показаны на рис. 2. Оба образца ферромагнитно упорядочиваются при 123 К и в малых полях ($H = 2$ Э) их намагниченность очень близка. Однако в малых полях кооперативное ферромагнитное упорядочение происходит по-разному. Спонтанная намагниченность в образце, синтезированном при 1500 °С, возникает резко, тогда как спонтанная намагниченность образца, синтезированного при 1200 °С, возникает на фоне подъема намагниченности, обусловленной присутствием ферромагнитных кластеров со значительно большей силой обменных взаимодействий, чем в фазе с $T_C = 123$ К. Можно предположить, что ферромагнитное состояние в этих кластерах обусловлено упорядочением ионов Co^{2+} и Mn^{4+} , что приводит к минимизации

вклада от антиферромагнитных сверхобменных взаимодействий $Mn^{4+}-O-Mn^{4+}$ и $Co^{2+}-O-Co^{2+}$ и является причиной неустойчивого основного магнитного состояния.

В полях больше 1 кЭ температурная зависимость намагниченности образца, полученного при 1500 °С, становится аномальной и переход в магнитоупорядоченное состояние в режиме охлаждения в поле характеризуется наличием максимума вблизи T_C . Намагниченность становится гораздо меньшей, чем у образца, полученного при 1200 °С, для которого характерно обычное поведение спонтанной намагниченности при охлаждении в поле (рис. 3).

Полевые зависимости намагниченности, полученные при 5 и 50 К после охлаждения в поле 500 Э, принципиально разные для обоих образцов (рис. 4). Образец, полученный при 1200 °С, проявляет обычное поведение намагниченности с очень большой коэрцитивной силой ($H_C = 24$ кЭ, $T = 5$ К) и отсутствием насыщения в поле до 140 кЭ. Это указывает на магнитную негетомогенность ферромагнитного состояния, обусловленную наличием антиферромагнитных нанокластеров. Образец, полученный при 1500 °С, имеет в два раза меньшую остаточную намагниченность. Зависимость намагниченности от поля носит линейный характер вплоть до $H \sim 40$ кЭ, при котором начинается переход в другое магнитное состояние. Этот переход является необратимым при температуре 5 К, так как петля гистерезиса становится обычной и не меняется при по-

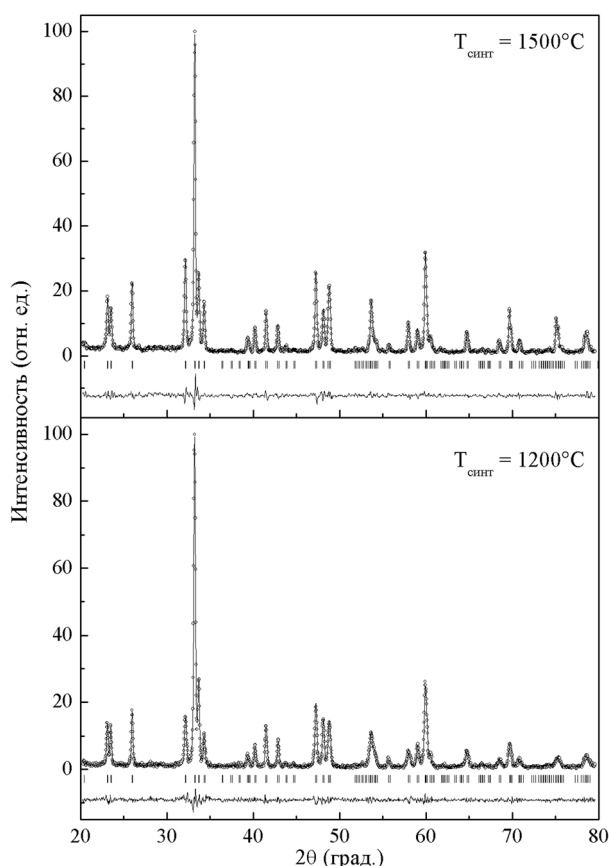


Рис. 1. Рентгенограммы образцов, полученных при 1500 и 1200 °С. Экспериментальные данные изображены кружками, рассчитанные – сплошной линией. Внизу показана разность между измеренными и рассчитанными данными

Fig. 1. X-ray patterns of the samples obtained at 1500 and 1200 °С. The experimental data are represented by circles, calculated by a solid line. The difference between the measured and calculated data is shown below

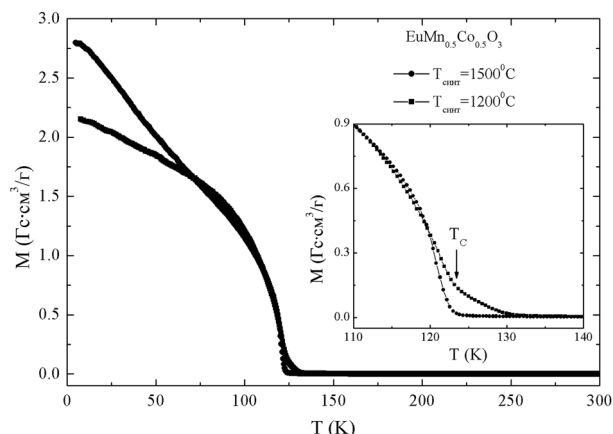


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности, измеренные в магнитном поле 2 Э

Fig. 2. Temperature dependences of magnetization measured in a magnetic field of 2 Oe

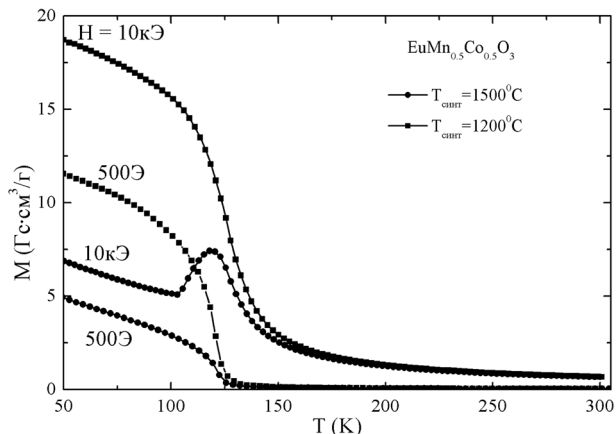


Рис. 3. Температурные зависимости FC-намагниченности в различных полях

Fig. 3. Temperature dependences of FC-magnetization in different fields

вторном цикле переключения поля. Иное поведение полевой зависимости намагниченности при 50 К проявляет образец, синтезированный при 1500 °С. При этой температуре метамагнитный переход становится обратимым, так как намагниченность после частичного снятия поля равна намагниченности, измеренной на линейном участке после повышения поля. Гистерезис обусловлен тем, что происходит фазовый переход первого рода со сменой типа магнитного упорядочения. После перехода остаточная намагниченность увеличивается более чем в 2 раза: с $0,3\mu_B/\text{ф.е.}$ до $0,65\mu_B/\text{ф.е.}$ при $T = 5$ К. Критическое поле $H_{кр}$, при котором начинается переход, уменьшается с ростом температуры от 60 кЭ ($T = 5$ К) до $\sim 1,5$ кЭ ($T = 120$ К). Низкополевая фаза в метамагнитном образце не может быть обусловлена антипараллельным упорядочением магнитных моментов ионов Co^{2+} и Mn^{4+} , так как эти ионы в основном статистически распределены. Кроме того, обменное взаимодействие $\text{Co}^{2+}-\text{Mn}^{4+}$ является ферромагнитным. Эта фаза также не может быть обусловлена антиферромагнитными кластерами, так как метамагнетизм обнаруживает черты кооперативного явления с хорошо выраженным критическим полем $H_{кр}$ (рис. 4). Поэтому можно предположить, что метамагнитное фазовое превращение обусловлено переходом из неколлинеарного магнитного состояния в коллинеарное ферромагнитное. Антиферромагнитная компонента обусловлена конкуренцией отрицательных магнитных взаимодействий $\text{Mn}^{4+}-\text{Mn}^{4+}$, $\text{Co}^{2+}-\text{Co}^{2+}$ и положительных $\text{Co}^{2+}-\text{Mn}^{4+}$. Очень большая магнитная анизотропия приводит к устойчивому типу магнитного состояния. Действительно, в $\text{RNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_3$ с малой величиной магнитной анизотропии метамагнетизма не наблюдалось. Ферромагнитные нанокластеры дестабилизируют неколлинеарную магнитную структуру, переводя ее в коллинеарную.

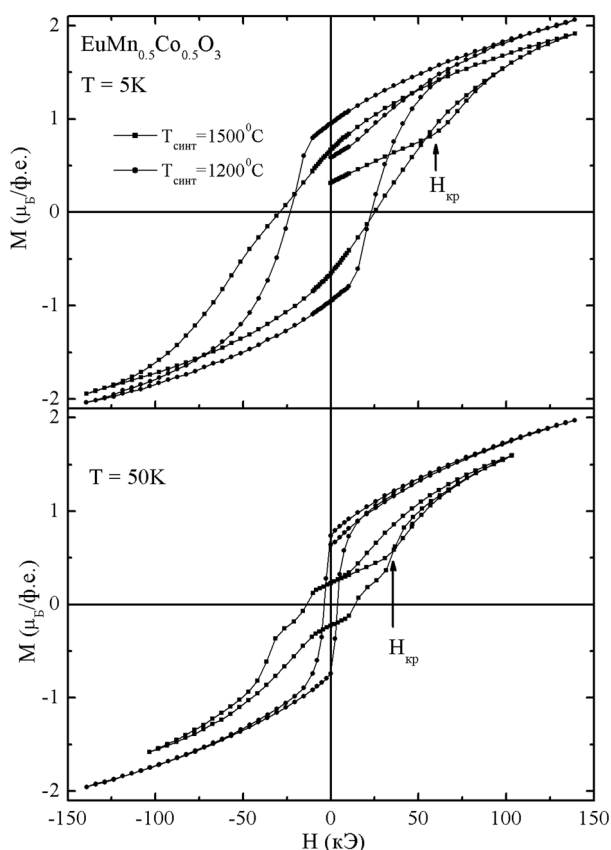


Рис. 4. Петли гистерезиса образцов, полученных при 1200 и 1500 °С, снятые при 5 и 50 К

Fig. 4. Hysteresis loops of the samples obtained at 1200 and 1500 °C, measured at 5 and 50 K

Заклучение. Проведено исследование магнитных свойств двух образцов $\text{EuCo}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$, полученных при температурах 1200 и 1500 °С. Рентгеноструктурные исследования показали, что образцы имеют орторомбическую структуру перовскита (пространственная группа $Pnma$). Признаков упорядочения ионов Co^{2+} и Mn^{4+} не выявлено. Согласно магнитным измерениям, оба образца проявляют спонтанную намагниченность, температура Кюри $T_C = 123$ К. Однако образец, полученный при 1200 °С, при температуре выше 123 К обладал большой магнитной восприимчивостью вследствие наличия ферромагнитных кластеров с упорядочением ионов Co^{2+} и Mn^{4+} . При температуре ниже 123 К он находился в ферромагнитном состоянии. В образце, полученном при 1500 °С, был обнаружен метамгнитный переход, который становился необратимым при низкой температуре. Магнитные свойства указывают на то, что этот переход обусловлен переходом из неколлинеарной в коллинеарную ферромагнитную фазу. Неколлинеарная магнитная фаза образуется вследствие конкуренции антиферромагнитных $\text{Mn}^{4+}\text{--Mn}^{4+}$, $\text{Co}^{2+}\text{--Co}^{2+}$ и ферромагнитных $\text{Co}^{2+}\text{--Mn}^{4+}$ обменных взаимодействий, а также наличия сильной магнитной анизотропии.

Благодарности. Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проекты Ф17Д-007 и Ф16К-066).

Acknowledgements. The work is supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Projects Ф17Д-007 and Ф16К-066).

Список использованных источников

1. Coe, J. M. D. Mixed-valence manganites / J. M. D. Coe., M. Viret, S. von Molnár // *Advances in Physics*. – 1999. – Vol. 48, N 2. – P. 167–293. <https://doi.org/10.1080/000187399243455>
2. Jonker, G. H. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure / G. H. Jonker, J. H. van Santen // *Physica*. – 1950. – Vol. 16, N 3. – P. 337–349. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(50\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0031-8914(50)90033-4)
3. Relationship between crystal symmetry and magnetic properties of ionic compounds containing Mn^{3+} / J. B. Goodenough [et al.] // *Phys. Rev.* – 1961. – Vol. 124, N 2. – P. 373–384. <https://doi.org/10.1103/physrev.124.373>
4. Magnetic interaction in Mg, Ti, Nb doped manganites / I. O. Troyanchuk [et al.] // *Eur. Phys. J. B.* – 2002. – Vol. 28, N 1. – P. 75–80. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2002-00202-2>
5. Park, J.-H. Double-exchange ferromagnetism in $\text{La}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ / J.-H. Park, S.-W. Cheong, C. T. Chen // *Phys. Rev. B.* – 1997. – Vol. 55, N 17. – P. 11072–11075. <https://doi.org/10.1103/physrevb.55.11072>
6. Double-exchange ferromagnetism and magnetoresistance in $\text{LaMn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($x \leq 0.3$) / Y. Sun [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 77, N 17. – P. 2734–2736. <https://doi.org/10.1063/1.1320021>
7. Blasse, G. Ferromagnetic interactions in non-metallic perovskites / G. Blasse // *J. Phys. Chem. Solids*. – 1965. – Vol. 26, N 12. – P. 1969–1971. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90231-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90231-3)
8. Jonker, G. H. Magnetic and semiconducting properties of perovskites containing manganese and cobalt / G. H. Jonker // *J. Appl. Phys.* – 1966. – Vol. 37, N 3. – P. 1424–1430. <https://doi.org/10.1063/1.1708498>
9. Nishimori, N. NMR study on the supertransferred hyperfine magnetic field at ^{55}Mn in ferromagnetic perovskites $\text{La}(\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x)_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ / N. Nishimori, K. Asai, M. Mizoguchi // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1995. – Vol. 64, N 4. – P. 1326–1333. <https://doi.org/10.1143/jpsj.64.1326>
10. Joy, P. A. Spin states of Mn and Co in $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / P. A. Joy, Y. B. Kholam, S. K. Date // *Phys. Rev. B.* – 2000. – Vol. 62, N 13. – P. 8608–8610. <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.8608>
11. The origin of ferromagnetism in the two different phases of $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$: evidence from *x*-ray photoelectron spectroscopic studies / V. L. Joseph Joly [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter*. – 2001. – Vol. 13, N 4. – P. 649–656. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/4/311>
12. Joseph Joly, V. L. Effect of R on the magnetic transition temperature of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / V. L. Joseph Joly, P. A. Joy, S. K. Date // *Solid State Commun.* – 2002. – Vol. 121, N 4. – P. 219–222. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(01\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2)
13. Joseph Joly, V. L. Synthesis of two different ferromagnetic phases of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ (R = Pr, Nd, Sm) by a low-temperature method / V. L. Joseph Joly, P. A. Joy, S. K. Date // *Materials Letters*. – 2001. – Vol. 51, N 2. – P. 172–176. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(01\)00285-3](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(01)00285-3)
14. Magnetic phase diagrams of the $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ (Ln = Eu, Nd, Y) systems / I. O. Troyanchuk [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 88, N 1. – P. 360–367. <https://doi.org/10.1063/1.373668>
15. Valence states and metamagnetic phase transition in partially B-site-disordered perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ / A. N. Vasiliiev [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 77, N 10. – P. 104442-1–104442-5. <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.104442>

References

1. Coe J. M. D., Viret M., von Molnár S. Mixed-valence manganites. *Advances in Physics*, 1999, vol. 48, no. 2, pp. 167–293. <https://doi.org/10.1080/000187399243455>
2. Jonker G. H., Van Santen J. H. Ferromagnetic compounds of manganese with perovskite structure. *Physica*, 1950, vol. 16, no. 3, pp. 337–349. [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(50\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0031-8914(50)90033-4)
3. Goodenough J. B., Wold A., Arnott R. J., Menyuk N. Relationship between crystal symmetry and magnetic properties of ionic compounds containing Mn^{3+} . *Physical Review*, 1961, vol. 124, no. 2, pp. 373–384. <https://doi.org/10.1103/physrev.124.373>
4. Troyanchuk I. O., Bushinsky M. V., Szymczak H., Bärner K., Maignan A. Magnetic interaction in Mg, Ti, Nb doped manganites. *The European Physical Journal B – Condensed Matter*, 2002, vol. 28, no. 1, pp. 75–80. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2002-00202-2>
5. Park J.-H., Cheong S.-W., Chen C. T. Double-exchange ferromagnetism in $\text{La}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$. *Physical Review B*, 1997, vol. 55, no. 17, pp. 11072–11075. <https://doi.org/10.1103/physrevb.55.11072>

6. Sun Y., Xu X., Tong W., Zhang Y. Double-exchange ferromagnetism and magnetoresistance in $\text{LaMn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($x \leq 0.3$). *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 77, no. 17, pp. 2734–2736. <https://doi.org/10.1063/1.1320021>
7. Blasse G. Ferromagnetic interactions in non-metallic perovskites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1965, vol. 26, no. 12, pp. 1969–1971. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90231-3](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90231-3)
8. Jonker G. H. Magnetic and semiconducting properties of perovskites containing manganese and cobalt. *Journal of Applied Physics*, 1966, vol. 37, no. 3, pp. 1424–1430. <https://doi.org/10.1063/1.1708498>
9. Nishimori N., Asai K., Mizoguchi M. NMR study on the supertransferred hyperfine magnetic field at ^{55}Mn in ferromagnetic perovskites $\text{La}(\text{Co}_{1-x}\text{Mg}_x)_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1995, vol. 64, no. 4, pp. 1326–1333. <https://doi.org/10.1143/jpsj.64.1326>
10. Joy P. A., Kholam Y. B., Date S. K. Spin states of Mn and Co in $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Physical Review B*, 2000, vol. 62, no. 13, pp. 8608–8610. <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.8608>
11. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K., Gopinath C. S. The origin of ferromagnetism in the two different phases of $\text{LaMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$: evidence from x-ray photoelectron spectroscopic studies. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2001, vol. 13, no. 4, pp. 649–656. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/13/4/311>
12. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K. Effect of R on the magnetic transition temperature of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Solid State Communications*, 2002, vol. 121, no. 4 pp. 219–222. [https://doi.org/10.1016/s0038-1098\(01\)00456-2](https://doi.org/10.1016/s0038-1098(01)00456-2)
13. Joseph Joly V. L., Joy P. A., Date S. K. Synthesis of two different ferromagnetic phases of $\text{RMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$ (R = Pr, Nd, Sm) by a low-temperature method. *Materials Letters*, 2001, vol. 51, no. 2, pp. 172–176. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(01\)00285-3](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(01)00285-3)
14. Troyanchuk I. O., Khalyavin D. D., Lynn J. W., Erwin R. W., Huang Q., Szymczak H., Szymczak R., Baran M. Magnetic phase diagrams of the $\text{Ln}(\text{Mn}_{1-x}\text{Co}_x)\text{O}_3$ (Ln = Eu, Nd, Y) systems. *Journal Applied Physics*, 2000, vol. 88, no. 1, pp. 360–367. <https://doi.org/10.1063/1.373668>
15. Vasiliev A. N., Volkova O. S., Lobanovskii L. S., Troyanchuk I. O., Hu Z., Tjeng L. H., Khomskii D. I., Lin H.-J., Chen C. T., Tristan N., Kretzschmar F., Klingeler R., Büchner B. Valence states and metamagnetic phase transition in partially B-site-disordered perovskite $\text{EuMn}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_3$. *Physical Review B*, 2008, vol. 77, no. 10, pp. 104442-1–104442-5. <https://doi.org/10.1103/physrevb.77.104442>

Информация об авторах

Троянчук Игорь Олегович – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: troyan@physics.by.

Бушинский Максим Владиславович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bushinsky@physics.by.

Терешко Нина Викторовна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tereshko@physics.by.

Чобот Александра Николаевна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.n.chobot@tut.by.

Мантыцкая Ольга Станиславовна – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mantytskaja@physics.by.

Чобот Геннадий Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

Добрянский Валерий Михайлович – д-р техн. наук, профессор. Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dobryanal@mail.ru.

Пастушонко Софья Николаевна – канд. физ.-мат. наук, доцент. Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sn195333@gmail.com.

Information about the authors

Troyanchuk Igor Olegovich – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Laboratory. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: troyan@physics.by.

Bushinsky Maxim Vladislavovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bushinsky@physics.by.

Tereshko Nina Viktorovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tereshko@physics.by.

Chobot Aleksandra Nikolaevna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.n.chobot@tut.by.

Mantytskaya Olga Stanislavovna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mantytskaja@physics.by.

Chobot Gennadii Mihailovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: g.m.chobot@tut.by.

Dobryansky Valerij Mihailovich – D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dobryanal@mail.ru.

Pastushonok Sofija Nikolaevna – Ph. D. (Physics and Mathematics), Assistant Professor. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sn195333@gmail.com.