

М. В. Бушинский¹, Н. В. Терешко¹, А. Н. Чобот¹, О. С. Мантыцкая¹,
Г. М. Чобот², С. Н. Пастушонок³

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

³Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА, МАГНИТНЫЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$

(Представлено членом-корреспондентом Ф. П. Коршуновым)

Аннотация. Проведено комплексное исследование кристаллической структуры, магнитных и упругих свойств слоистого кобальтита $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ со структурой типа перовскита. Установлено, что магнитное упорядочение в этом составе сопровождается структурным переходом. Температура Нееля (T_N) равна 375 К. Увеличение объема элементарной ячейки при данной температуре происходит в результате орбитального упорядочения в пирамидах CoO_5 , сочлененных вершинами в анион-дефицитных слоях. Основная магнитная структура является антиферромагнитной структурой G-типа с небольшой ферромагнитной компонентой. Неколлинеарная магнитная структура стабилизируется за счет ферромагнитных связей между ионами кобальта в пирамидах CoO_5 . Ионы Co^{3+} в обоих слоях находятся в смешанном низкоспиновом (LS)/высокоспиновом (HS) состоянии. Зависимость удельного электросопротивления от температуры носит полупроводниковый характер. Большое значение удельного электросопротивления и малая величина магнитосопротивления указывают на хорошую стабильность полупроводникового антиферромагнитного состояния данного состава.

Ключевые слова: магнитные материалы, слоистые кобальтиты, фазовые превращения, намагниченность

Для цитирования: Кристаллическая структура, магнитные и упругие свойства $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ / М. В. Бушинский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 000–000. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-000-000>

Maxim V. Bushinsky¹, Nina V. Tereshko¹, Alexandra N. Chobot¹, Olga S. Mantyskaya¹,
Gennadii M. Chobot², 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

CRYSTAL STRUCTURE, MAGNETIC AND ELASTIC PROPERTIES OF $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$

(Communicated by Corresponding Member Fedor P. Korshunov)

Abstract. A comprehensive study of the crystal structure, magnetic and elastic properties of layered cobaltite $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ with a perovskite-type structure has been carried out. It is established that the magnetic ordering in this composition is accompanied by a structural transition. The Neel temperature (T_N) is 375 K. The increase of the unit cell volume at T_N occurs as a result of the orbital ordering in the CoO_5 pyramids connected by the vertices in the anion-deficient layers. The main magnetic structure is an antiferromagnetic G-type structure with a small ferromagnetic component. The non-collinear magnetic structure is stabilized by the ferromagnetic bonds between the cobalt ions in the CoO_5 pyramids. Co^{3+} ions in both layers are in the mixed low-spin (LS)/high-spin (HS) state. The dependence of the electrical resistivity on temperature has a semiconductor character. The large value of the resistivity and the small magnitude of the magnetoresistance indicate a good stability of the semiconductor antiferromagnetic state of this composition.

Keywords: magnetic materials, layer cobaltite, phase transitions, magnetization

For citation: Bushinsky M. V., Tereshko N. V., Chobot A. N., Mantyskaya O. S., Chobot G. M., Pastushonok S. N. Crystal structure, magnetic and elastic properties of $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 000–000 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-000-000>

Введение. Как известно из литературных источников, состояние соединения LaCoO_3 при температурах ниже 30 К близко к диамагнитному диэлектрику. При повышении температуры происходит переход части ионов кобальта из низкоспинового (LS) в высокоспиновое (HS) парамагнитное состояние [1; 2].

При легировании базового соединения LaCoO_3 ионами стронция Sr^{2+} до 18 % возникает дальний ферромагнитный порядок. Дальнейшее замещение лантана ионами Sr приводит к увеличению намагниченности и повышению температуры Кюри (T_c) от 180 К до $T_c \sim 305$ К для стехиометрического соединения $\text{SrCo}^{4+}\text{O}_3$ [3; 4]. В кобальтатах отклонение в стехиометрии по кислороду ведет к антиферромагнитному упорядочению с температурой Нееля (T_N) значительно выше комнатной [5]. Небольшие добавки иттрия ведут к стабилизации $\text{Sr}_{1-x}\text{Y}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ со слоистой структурой типа перовскита [6; 7]. Происходит это в результате сильного отклонения от стехиометрии по кислороду. В [7; 8] показано, что стехиометрические по кислороду слои CoO_6 чередуются с анион-дефицитными $\text{CoO}_{4+\gamma}$, а базисное антиферромагнитное упорядочение G-типа сопровождается появлением небольшой ферромагнитной компоненты и возникает существенно выше комнатной температуры.

Так как вопрос о том, сопровождается ли магнитное упорядочение структурным переходом и какова его роль для реализации ферромагнитной компоненты остается открытым, нами проведено комплексное исследование кристаллической структуры, магнитных и упругих свойств состава $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$. Известно, что упругие модули проявляют аномалии даже в том случае, когда другие методы не позволяют обнаружить фазовых превращений.

Материалы и методы эксперимента. Поликристаллический образец состава $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ получен по обычной керамической технологии на воздухе. Для удаления влаги оксид Y_2O_3 перед взвешиванием предварительно отжигался при температуре 1000 °С. Исходные реактивы (Y_2O_3 , Co_3O_4 и SrCO_3 высокой чистоты), взятые в стехиометрическом соотношении, перемешаны в планетарной шаровой мельнице фирмы «RETSCH» PM-100 в течение 30 мин со скоростью 250 об/мин. Синтез образцов был проведен в два этапа. Предварительный обжиг проведен при температуре 1000 °С, окончательный – при температуре 1185 °С в течение 8 ч. Затем образец охлаждался до температуры 300 °С в течение 12 ч. Содержание кислорода определялось по потере массы после разложения образца до простых оксидов и металлического кобальта, а также из данных нейтронографических исследований.

Измерения модуля Юнга E проведены методом резонансных колебаний в области частот 100–10000 Гц в интервале температур 100–450 К.

Рентгеноструктурные исследования проводились на источнике синхротронного излучения в исследовательском центре Института Пауля Шеррера (Виллиген, Швейцария) в интервале температур 95–420 К.

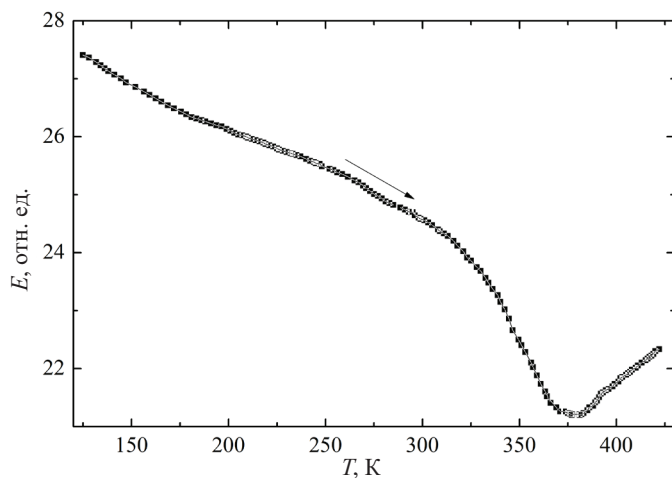


Рис. 1. Температурная зависимость модуля Юнга состава $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$

Fig. 1. Temperature dependence of the Young's modulus for composition $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$

Нейтроннографические исследования в интервале температур 10–400 К выполнены на дифрактометре высокого разрешения D2В в институте Лауэ-Ланжевена (Гренобль, Франция). Уточнение кристаллической и магнитной структуры выполнено по методу Ритвельда с использованием программного пакета FullProf [9].

Магнитные и магнитотранспортные измерения проведены на установке измерения физических свойств (Cryogenic Ltd.) в магнитных полях до 14 Тл в диапазоне температур 5–315 К. Измерения электропроводности выполнены четырехконтактным методом. Индиевые контакты наносились с помощью ультразвука.

Результаты и их обсуждение. Исследование поведения модулей упругости является наиболее простым и чувствительным методом, позволяющим обнаружить фазовые превращения различной природы. Модули упругости служат мерой прочности межатомных связей и очень тонко реагируют на любые изменения, происходящие в кристаллической решетке на атомистическом уровне. Проведенное исследование температурной зависимости модуля Юнга поликристаллического образца состава $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ методом резонансных колебаний в интервале частот 1000–10000 Гц позволило обнаружить четко выраженный минимум при температуре 375 К (рис. 1). Проявление таких аномалий, как минимум на температурной зависимости свидетельствует о наличии кристаллоструктурного фазового превращения. Следовательно, можно сделать вывод о том, что в данном образце при температуре 375 К происходит изменение типа кристаллической структуры.

Проведено уточнение кристаллической структуры $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ с использованием дифракции синхротронного рентгеновского излучения в пространственных группах $I4/mmm$, $Cmma$ и $A2/m$. Рентгеновские дифракционные пики удалось проиндексировать в моноклинной пространственной группе $A2/m$ со сверхструктурой $2\sqrt{2}a_p \times 2\sqrt{2}a_p \times 4a_p$ (400 К) и с $4\sqrt{2}a_p \times 2\sqrt{2}a_p \times 4a_p$ (350 К), где a_p – параметр примитивной ячейки. Между 400 и 350 К происходит кристаллоструктурное фазовое превращение с удвоением элементарной ячейки вдоль оси a . Определены параметры элементарной ячейки. При 10 К $a = 21,704 \text{ \AA}$, $b = 10,667 \text{ \AA}$, $c = 15,343 \text{ \AA}$, $\gamma = 90,61^\circ$; при 300 К $a = 21,723 \text{ \AA}$, $b = 10,651 \text{ \AA}$, $c = 15,358 \text{ \AA}$, $\gamma = 90,57^\circ$; при 400 К $a = 10,829 \text{ \AA}$, $b = 10,821 \text{ \AA}$, $c = 15,378 \text{ \AA}$, $\gamma = 90,17^\circ$.

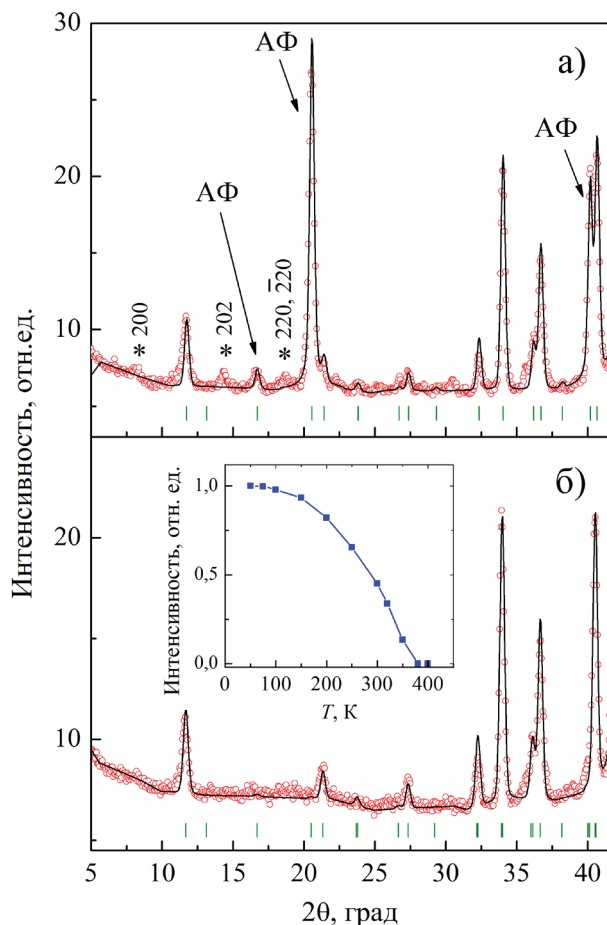


Рис. 2. Нейтронограммы $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$, записанные при 10 и 400 К

Fig. 2. Neutron diffraction patterns for composition $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$, recorded at 10 and 400 К

Нейтронографические исследования проведены при температуре 10 и 400 К. Части нейтронограмм в области малых углов, измеренные при 10 и 400 К, представлены на рис. 2. Штрихами показаны брэгговские рефлексы, соответствующие пространственной группе $I4/mmm$. Звездочками отмечены пики, которые невозможно идентифицировать в пространственной группе $I4/mmm$. На вставке представлена температурная зависимость интенсивности магнитного вклада в пик 112. Как видно, при 400 К магнитного вклада в рассеяние нейтронов не наблюдалось. Ряд дополнительных пиков, часть из которых можно идентифицировать в рамках пространственной группы $I4/mmm$, появлялся при понижении температуры. Эти пики отмечены стрелками с обозначением АФ. Звездочками отмечены очень слабые пики, которые можно проиндексировать в рамках пространственной группы $Cmma$ или $A2/m$. Кристаллическая и магнитная структуры рассчитаны в рамках наиболее простой тетрагональной группы $I4/mmm$ ($2a_p \times 2a_p \times 4a_p$). Уточнение магнитной структуры проведено по методу Ритвельда. Установлено, что магнитная структура $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ является антиферромагнитной структурой G-типа. Магнитный момент в стехиометрических слоях CoO_6 имеет величину $1,7 \mu_B/\text{Co}$, в аниондефицитных слоях $\text{CoO}_{4+\gamma}$ – $2,7 \mu_B/\text{Co}$. Как видно из температурной зависимости

интенсивности пика 112 (вставка на рис. 2), температура Нееля составляет около 375 К. Минимум на температурной зависимости модуля Юнга (рис. 1) совпадает с температурой гочки Нееля, что указывает на то, что кристаллоструктурное фазовое превращение происходит при той же температуре, что и магнитное упорядочение.

Согласно уточненному содержанию кислорода ионы кобальта находятся в трехвалентном состоянии, что соответствует химической формуле $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$. Следует отметить, что составу $x = 0,2$ соответствует самая большая спонтанная намагниченность в ряду $\text{Sr}_{1-x}\text{Y}_x\text{CoO}_{3-\delta}$.

Температурная зависимость намагниченности для этого состава имеет классический вид (рис. 3). На вставке представлена полевая зависимость намагниченности $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ при 8 К. Как видно, спонтанная намагниченность имеет величину около $0,27 \mu_B/\text{Co}$.

На рис. 4 представлена температурная зависимость удельного электросопротивления (ρ) для состава $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$, измеренная в режиме охлаждения. Как видно, эта зависимость имеет полупроводниковый характер, при температуре 5 К удельное сопротивление составляет $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Магнитосопротивление $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ мало и составляет $\sim 5\%$ при 25 К в полях 1 и 13 Тл.

Известно, что ферромагнитное взаимодействие для ионов кобальта Co^{3+} в промежуточном спиновом состоянии (IS) ведет к низкому значению температуры Кюри T_C (в эпитаксиальных пленках LaCoO_3 $T_C \approx 90 \text{ К}$) [10], в то время как температура Нееля T_N для составов, где ионы кобальта находятся в высокоспиновом состоянии (HS), имеет достаточно высокое значение ($T_N = 540 \text{ К}$ для $\text{SrCoO}_{2,5}$) [5]. Для промежуточного спинового состояния характерна малая величина электросопротивления и ферромагнитная обменная связь. $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ имеет антиферромагнитную структуру G-типа, в которой магнитные моменты ближайших соседей направлены противоположно друг другу в обоих слоях. Температура Нееля соответствует достаточно высокому значению. Большое удельное электросопротивление и малая величина магнитосопротивления $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ указывают на хорошую стабильность полупроводникового антиферромагнитного состояния. Ион Co^{3+} (HS) в октаэдрах CoO_6 является изотропным ионом, однако, если пирамиды CoO_5 соединяются основой, то появляется выделенная ось. Считается, что такое сочленение пирамид в слоистых перовскитах типа $\text{YBaCo}_2^{3+}\text{O}_{5,5}$ приводит к неколлинеарной магнитной структуре и ферромагнитной компо-

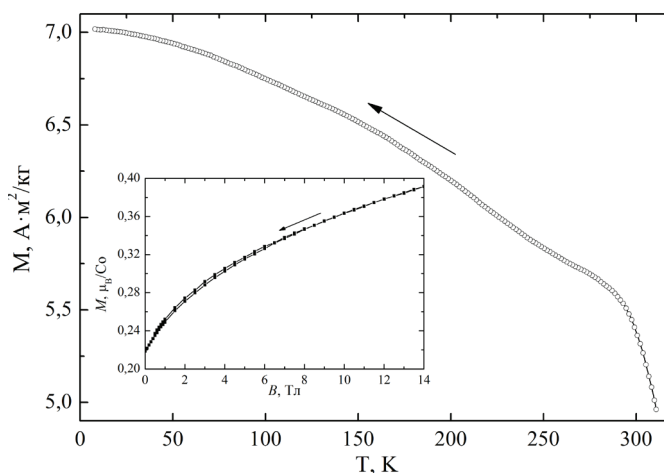


Рис. 3. Температурная зависимость намагниченности $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ в магнитном поле 1 Тл (на вставке представлена полевая зависимость намагниченности $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ при 8 К)

Fig. 3. Temperature dependence of the magnetization for $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ in a magnetic field of 1 T (the inset shows field dependence of the magnetization for $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ at 8 K)

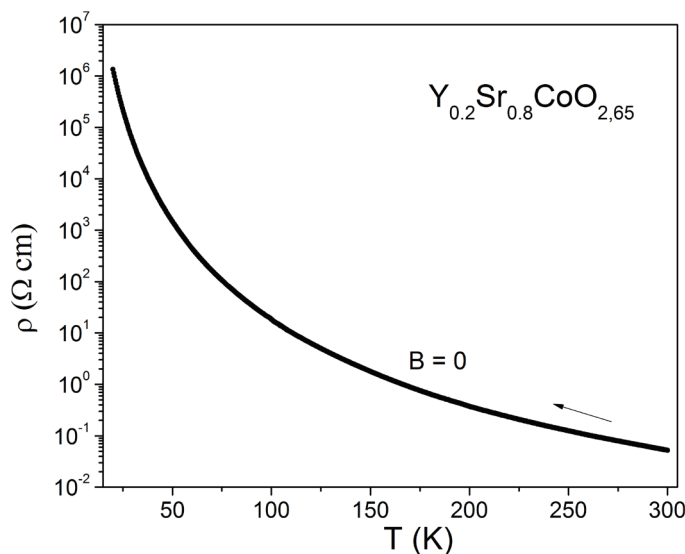


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры состава $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$

Fig. 4. Temperature dependence of the electrical resistivity for composition $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$

ненте, которая по величине ($0,25 \mu_B/\text{Co}$) совпадает в обоих классах соединений [11; 12]. Неколлинеарная магнитная структура стабилизируется за счет ферромагнитных связей между ионами кобальта в пирамидах CoO_5 . Известно, что небольшое замещение ионов кобальта на ионы железа в составе $\text{Sr}_{0,78}\text{Y}_{0,22}\text{CoO}_{2,65}$ разрушает орбитальное упорядочение, а вместе с ним и ферромагнитную компоненту [7].

Таким образом, можно предположить, что ионы Co^{3+} в обоих слоях находятся в смешанном LS/HS состоянии.

Закключение. В результате исследования кристаллической структуры, магнитных и упругих свойств слоистого кобальтита $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ со структурой типа перовскита установлено, что при температуре 375 К в нем происходит структурное и магнитное фазовое превращение. Кристаллическую структуру $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{2,65}$ при температурах выше 375 К можно описать в моноклинной пространственной группе $A2/m$ с ячейкой $2\sqrt{2}a_p \times 2\sqrt{2}a_p \times 4a_p$, при температурах ниже 375 К – с ячейкой $4\sqrt{2}a_p \times 2\sqrt{2}a_p \times 4a_p$. При температуре Нееля увеличение элементарной ячейки происходит в результате орбитального упорядочения в пирамидах CoO_5 . Зависимость удельного электросопротивления от температуры носит полупроводниковый характер. Большое значение удельного электросопротивления и малая величина магнитосопротивления указывают на хорошую стабильность полупроводникового антиферромагнитного состояния данного состава.

Основная магнитная структура является антиферромагнитной структурой G -типа с небольшой ферромагнитной компонентой ($0,27 \mu_B/\text{Co}$ при 8 К), обусловленной орбитальным упорядочением в пирамидах CoO_5 при T_N и наличием ферромагнитных обменных связей между пирамидами CoO_5 в анион-дефицитных слоях. Магнитные моменты в кристаллоструктурных слоях CoO_{4+7} и CoO_6 равны $2,7 \mu_B/\text{Co}$ и $1,7 \mu_B/\text{Co}$ соответственно. Ионы Co^{3+} в обоих слоях находятся в смешанном низкоспиновом (LS)/высокоспиновом (HS) состоянии.

Благодарности. Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Ф18Р-159).

Acknowledgements. The work is supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant № Ф18Р-159).

Список использованных источников

1. Spin-State Transition in LaCoO_3 : Direct Neutron Spectroscopic Evidence of Excited Magnetic States / A. Podlesnyak [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 97, N 24. – P. 247208-1–247208-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.247208>
2. Spin State Transition in LaCoO_3 Studied Using Soft X-ray Absorption Spectroscopy and Magnetic Circular Dichroism / M. W. Haverkort [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2006. – Vol. 97, N 17. – P.176405-1–176405-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.176405>
3. Wu, J. Glassy ferromagnetism and magnetic phase separation in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ / J. Wu, C. Leighton // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 67. – P. 174408-1–174408-16. <https://doi.org/10.1103/physrevb.67.174408>
4. Synthesis of cubic SrCoO_3 single crystal and its anisotropic magnetic and transport properties / Y. Long [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2011. – Vol. 23, N 24. – P. 245601-1–245601-6. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/24/245601>
5. Crystallographic and magnetic structure of $\text{SrCoO}_{2,5}$ brownmillerite: Neutron study coupled with band-structure calculations / A. Muñoz [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 78, N 5. – P. 054404-1–054404-8. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.054404>
6. Oxygen vacancy ordering and magnetism in the rare earth stabilised perovskite form of $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ / M. James [et al.] // *Solid State Sciences.* – 2004. – Vol. 6, N 7. – P. 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2003.03.001>
7. Магнитные превращения в системе $\text{Sr}_{0,78}\text{Y}_{0,22}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\gamma}$ со структурой типа перовскита / И. О. Троянчук [и др.] // *ЖЭТФ.* – 2009. – Т. 135, № 3. – С. 490–497.
8. Correlation of chemical coordination and magnetic ordering in $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10,5+\delta}$ ($\delta = 0.02$ and 0.26) / D. V. Sheptyakov [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 80, N 2. – P. 024409-1–024409-10. <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.024409>
9. Roisnel, T. WinPLOTR: A Windows Tool for Powder Diffraction Pattern Analysis / T. Roisnel, J. Rodriguez-Carvajal // *Mater. Sci. Forum.* – 2001. – Vol. 378–381. – P. 118–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.378-381.118>
10. Gupta, K. Strain-driven magnetism in LaCoO_3 thin films / K. Gupta, P. Mahadevan // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 79, N 2. – P. 020406-1–020406-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.79.020406>
11. Local magnetic properties and spin state of $\text{YBaCo}_2\text{O}_{5,5}$: ^{59}Co NMR study / M. Itoh [et al.] // *Physica B: Condens. Matter.* – 2003. – Vol. 329–333. – P. 751–752. [https://doi.org/10.1016/s0921-4526\(02\)02490-0](https://doi.org/10.1016/s0921-4526(02)02490-0)
12. Simultaneous para-ferrimagnetic, metal-insulator, and orthorhombic-monoclinic transitions in $\text{Y}_2\text{BaCoO}_{5,5}$ / J. Padilla-Pantoja [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Vol. 81, N 13. – P. 132405-1–132405-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.81.132405>

References

1. Podlesnyak A., Streule S., Mesot J., Medarde M., Pomjakushina E., Conder K., Tanaka A., Haverkort M. W., Khomskii D. I. Spin-State Transition in LaCoO_3 : Direct Neutron Spectroscopic Evidence of Excited Magnetic States. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, no. 24, pp. 247208-1–247208-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.247208>

2. Haverkort M. W., Hu Z., Cezar J. C., Burnus T., Hartmann H., Reuther M., Zobel C., Lorenz T., Tanaka A., Brookes N. B., Hsieh H. H., Lin H.-J., Chen C. T., Tjeng L. H. Spin State Transition in LaCoO_3 Studied Using Soft X-ray Absorption Spectroscopy and Magnetic Circular Dichroism. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 97, no. 17, pp. 176405-1–176405-4. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.97.176405>
3. Wu J., Leighton C. Glassy ferromagnetism and magnetic phase separation in $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$. *Physical Review B*, 2003, vol. 67, no. 17, pp. 174408-1–174408-16. <https://doi.org/10.1103/physrevb.67.174408>
4. Long Y., Kaneko Y., Ishiwata Sh., Taguchi Y., Tokura Y. Synthesis of cubic SrCoO_3 single crystal and its anisotropic magnetic and transport properties. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2011, vol. 23, no. 24, pp. 245601-1–245601-6. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/23/24/245601>
5. Muñoz A., De la Calle C., Alonso J.A., Botta P.M., Pardo V., Baldomir D., Rivas J. Crystallographic and magnetic structure of $\text{SrCoO}_{2.5}$ brownmillerite: Neutron study coupled with band-structure calculations. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 5, pp. 054404-1–054404-8. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.054404>
6. James M., Cassidy D., Wilson K. F., Horvat J., Withers R. L. Oxygen vacancy ordering and magnetism in the rare earth stabilised perovskite form of $\text{SrCoO}_{3-\delta}$. *Solid State Sciences*, 2004, vol. 6, no. 7, pp. 655–662. <https://doi.org/10.1016/j.solid-state-sciences.2003.03.001>
7. Troyanchuk I. O., Karpinsky D. V., Chobot A. N., Dobryanskiĭ V. M., Chobot G. M., Sazonov A. P. Magnetic transformations in the $\text{Sr}_{0.78}\text{Y}_{0.22}\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\gamma}$ system with a perovskite structure. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, vol. 108, no. 3, pp. 428–434. <https://doi.org/10.1134/s1063776109030078>
8. Sheptyakov D. V., Pomjakushin V. Yu., Drozhzhin O. A., Istomin S. Ya., Antipov E. V., Bobrikov I. A., Balagurov A. M. Correlation of chemical coordination and magnetic ordering in $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10.5+\delta}$ ($\delta = 0.02$ and 0.26). *Physical Review B*, 2009, vol. 80, no. 2, pp. 024409-1–024409-10. <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.024409>
9. Roisnel T., Rodríguez-Carvajal J. WinPLOTR: A Windows Tool for Powder Diffraction Pattern Analysis. *Materials Science Forum*, 2001, vol. 378–381, pp. 118–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.378-381.118>
10. Gupta K., Mahadevan P. Strain-driven magnetism in LaCoO_3 thin films. *Physical Review B*, 2009, vol. 79, no. 2, pp. 020406-1–020406-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.79.020406>
11. Itoh M., Nawata Y., Kiyama T., Akahoshi D., Fujiwara N., Ueda Y. Local magnetic properties and spin state of $\text{YBaCo}_2\text{O}_{5.5-\delta}$ ^{59}Co NMR study. *Physica B: Condensed Matter*, 2003, vol. 329–333, pp. 751–752. [https://doi.org/10.1016/s0921-4526\(02\)02490-0](https://doi.org/10.1016/s0921-4526(02)02490-0)
12. Padilla-Pantoja J., Frontera C., Castaño O., García-Muñoz J. L. Simultaneous para-ferrimagnetic, metal-insulator, and orthorhombic-monoclinic transitions in $\text{Y}_2\text{BaCoO}_{5.5}$. *Physical Review B*, 2010, vol. 81, no. 13, pp. 132405-1–132405-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.81.132405>

Информация об авторах

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.

Пастушонок 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

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.

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.