

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 536.424

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-2-224-231>

Поступила в редакцию 04.03.2020

Received 04.03.2020

**М. В. Бушинский¹, Н. В. Терешко¹, А. Н. Чобот¹, О. С. Мантыцкая¹, В. В. Федотова¹,
Г. М. Чобот², С. Н. Пастушок³**

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

²*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь*

³*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь*

УПРУГИЕ, МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОБАЛЬТИТОВ $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ В ОБЛАСТИ СОСТАВОВ $0,2 \leq y \leq 0,3$

Аннотация. Особое внимание ученых, занимающихся изучением природы фазовых превращений в перовскитоподобных кобальтитах, направлено на исследование аниондефицитных слоистых кобальтитов $\text{Sr}_{0,75}\text{Ln}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ (Ln – лантаноид). Это связано с тем, что до сих пор причины аномального температурного поведения намагниченности этих материалов являются предметом научной дискуссии. Цель настоящей работы – изучение закономерностей изменения упругих, магнитных и электрических свойств слоистых кобальтитов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ в области составов $0,2 \leq y \leq 0,3$ в широком интервале температур. Исследуемые поликристаллические образцы получены на воздухе по известной керамической технологии. Электронно-микроскопические исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе LEO 1455 PV. Температурная зависимость модуля Юнга изучалась методом резонансных колебаний в области частот 1000–6000 Гц в интервале температур 100–450 К. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре ДРОН-3М в CuK_α -излучении. Магнитные измерения проведены на универсальной установке Cryogenic Ltd в интервале температур 5–325 К.

В результате установлено, что в интервале температур 25–300 К твердые растворы $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ ($0,2 \leq y \leq 0,3$) имеют полупроводниковый характер проводимости. Существенного магниторезистивного эффекта в этом интервале температур для исследуемых составов не наблюдалось. Показано, что твердый раствор $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ ($y = 0,25$) проявляет два магнитных фазовых превращения: низкотемпературное вблизи 220 К и высокотемпературное при 350 К. Близлежащие составы концентрационного интервала $0,2 \leq y \leq 0,3$ проявляют магнитные фазовые превращения при температурах выше комнатной. Низкотемпературные фазовые переходы в них не обнаружены. Установлено, что магнитные фазовые превращения сопровождаются структурными переходами при соответствующих температурах.

Ключевые слова: фазовые превращения, магнитные материалы, слоистые кобальтиты, намагниченность, удельное сопротивление, микроструктура

Для цитирования. Упругие, магнитные и электрические свойства кобальтитов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ в области составов $0,2 \leq y \leq 0,3$ / М. В. Бушинский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 224–231. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-2-224-231>

**Maxim V. Bushinsky¹, Nina V. Tereshko¹, Alexandra N. Chobot¹, Olga S. Mantytskaya¹, Vera V. Fedotova¹,
Gennadii M. Chobot², Sofija N. Pastushonok³**

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

²*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus*

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

THE ELASTIC, MAGNETIC, AND ELECTRICAL PROPERTIES OF $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ COBALTITES IN THE COMPOSITION RANGE $0.2 \leq y \leq 0.3$

Abstract. Anion-deficient layered cobaltites $\text{Sr}_{0,75}\text{Ln}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ (Ln is a lanthanide) have attracted the special attention of the scientists who study the nature of phase transformations in perovskite-like cobaltites, the anomalous behavior of the temperature magnetization of which is still the subject of scientific discussion. The purpose of this work is to investigate the regularity of changes in the elastic, magnetic, and electrical properties of layered cobaltites $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ in the composition range $0.2 \leq y \leq 0.3$ over a wide temperature range. The studied polycrystalline samples were obtained by the known ceramic technology in the air. Electron microscopic studies were performed on a LEO 1455 PV scanning electron microscope. The temperature dependence of the Young's modulus was studied by the method of resonance vibrations in the frequency range 1000–6000 Hz and in the temperature range 100–450 K. X-ray phase analysis was performed on a DRON-3M diffractometer under CuK_α radiation. Magnetic measurements were performed using a physical property measurement system (Cryogenic Ltd.) in the temperature range 5–325 K.

As a result of the studies, it was found that in the temperature range 25–300 K, $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ solid solutions ($0.2 \leq y \leq 0.3$) are characterized by the semiconductor-like conductivity. No significant magnetoresistive effect was observed in this temperature range for the studied compositions. It was shown that the $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ solid solution ($y = 0.25$) exhibits two magnetic phase transformations: low-temperature near 220 K and high-temperature at 350 K. The nearby compositions of the concentration range $0.2 \leq y \leq 0.3$ exhibit magnetic phase transformations at temperatures above room temperature. No low-temperature phase transitions were detected in them. It has been established that magnetic phase transformations are accompanied by structural transitions at corresponding temperatures.

Keywords: phase transitions, magnetic materials, layered cobaltites, magnetization, resistivity, microstructure

For citation: Bushinsky M. V., Tereshko N. V., Chobot A. N., Mantytskaya O. S., Fedotova V. V., Chobot G. M., Pastushonok S. N. The elastic, magnetic, and electrical properties of $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ cobaltites in the composition range $0.2 \leq y \leq 0.3$. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 224–231 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2020-56-2-224-231>

Введение. Интерес к перовскитоподобным кобальтитами связан не только с широким применением этих материалов в технике, но и с возможностью изучения фазовых превращений различной природы, по количеству которых кобальтиты являются уникальными модельными объектами. Природа процессов, происходящих в кобальтитах при фазовых превращениях, является предметом самого широкого обсуждения благодаря реализации в них различных спиновых состояний иона кобальта, а также наличию связи между кристаллической структурой, магнитными и электрическими свойствами.

В настоящее время особое внимание материаловедов направлено на исследование аниондефицитных слоистых кобальтитов $\text{Sr}_3\text{LnCo}_4\text{O}_{10,5+x}$ (приведенная формула на один ион кобальта – $\text{Sr}_{0,75}\text{Ln}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$, Ln – лантаноид) [1–3]. Кристаллическая структура этого класса соединений состоит из слоев октаэдров CoO_6 , соприкасающихся вершинами, и аниондефицитных слоев CoO_{4+x} . Исследование магнитных свойств этих материалов позволило обнаружить аномальное температурное поведение намагниченности. Ниже температуры Нееля в соединениях этого класса появляется спонтанная намагниченность, достигающая максимума вблизи комнатной температуры, а затем плавно уменьшающаяся вплоть до гелиевых температур [3, 4]. В работе [4] было высказано предположение, что при понижении температуры часть ионов Co^{3+} переходит из высокоспинового состояния ($t_{2g}^4 e_g^2$, $S = 2$) в низкоспиновое (t_{2g}^6 , $S = 0$). Однако в работах [5, 6] авторы пришли к выводу, что такое аномальное поведение намагниченности обусловлено фазовым переходом из магнитного состояния со спонтанной намагниченностью в чисто антиферромагнитное (АФ) состояние. Такое заключение было сделано на основании того, что нейтронографические исследования этих материалов не выявили аномального уменьшения магнитного момента при понижении температуры. Иная интерпретация перехода предложена в [7]. В ней аномальное поведение намагниченности связывается с наличием слабой магнитной подрешетки в магнитной структуре коллинеарного ферримагнетика. В данном случае спонтанная намагниченность обусловлена упорядочением ионов кобальта в слое CoO_{4+x} , в то время как слой CoO_6 является чисто антиферромагнитным.

Причины появления аномального температурного поведения намагниченности слоистых кобальтитов до сих пор являются предметом дискуссии [4–7]. Цель настоящей работы – исследование закономерностей изменения упругих, магнитных и электрических свойств слоистых кобальтитов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ в области составов $0,2 \leq x \leq 0,3$ в широком интервале температур.

Материалы и методы эксперимента. Исследуемые поликристаллические образцы $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$, $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ и $\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ получены на воздухе по известной керамической технологии. Исходные реактивы Y_2O_3 , Co_3O_4 и SrCO_3 чистоты не менее 99,9 %, взятые в стехиометрическом соотношении, смешивались в течение 30 мин в шаровой мельнице со скоростью 250 об/мин с добавлением небольшого количества этилового спирта. С целью удаления влаги оксид Y_2O_3 перед взвешиванием отжигался при температуре 1273 К.

Предварительный синтез проводился при температуре 1273 К в течение 2 ч, окончательный – при температуре 1473 К в течение 8 ч. Охлаждение образцов до температуры 573 К происходило вместе с печкой со скоростью 120 К/ч, а затем они доставались и охлаждались на воздухе.

Контроль температуры в печи осуществлялся с использованием программного прецизионного терморегулятора термопарой платина-платина-родий.

Для исследования магнитных свойств были изготовлены образцы в виде таблеток диаметром 10 мм и высотой 4–6 мм, для исследования упругих модулей – образцы цилиндрической формы диаметром 8 мм и длиной 100 мм.

Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе LEO 1455 PV, предназначенном для исследования топографии поверхности и элементного состава. Увеличение – до 300 тыс. раз. Разрешающая способность в вакуумном режиме – 3,5 нм, низковакуумном – 5 нм.

Температурная зависимость модуля Юнга исследовалась методом резонансных колебаний в области частот 1000–6000 Гц в интервале температур 100–450 К. Для возбуждения и регистрации изгибных колебаний образец с помощью тонких никелиновых нитей диаметром 0,1 мм свободно подвешивался вблизи узлов колебаний к двум пьезокристаллам, один из которых служил возбудителем, а другой – приемником колебаний. Момент резонанса фиксировался по максимальной амплитуде колебаний на экране осциллографа. Температура образца измерялась с помощью хромель-копелевой термопары, расположенной вблизи середины образца. Градиент температур по длине образца не превышал 1–2 К. Скорость нагрева не превышала 1 К/мин. Кроме основной резонансной частоты наблюдались и более высокие моды колебаний. Для правильной расшифровки мод изгибных колебаний использовались теоретически выведенные соотношения между соответствующими резонансными частотами: $\nu_2/\nu_1 = 2,76$; $\nu_3/\nu_1 = 5,41$.

Магнитные измерения проведены на универсальной установке Cryogenic Ltd в интервале температур 5–320 К.

Результаты и их обсуждение. Исследование морфологии поверхности синтезированных поликристаллических образцов твердых растворов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ ($0,2 \leq y \leq 0,3$) свидетельствует о том, что их микроструктура является однородной и состоит из хорошо сформировавшихся зерен с размерами 3–5 мкм (рис. 1).

Рентгенофазовый анализ, выполненный на дифрактометре ДРОН-3М в CuK_α -излучении при комнатной температуре, не выявил посторонних фаз. Установлено, что все синтезированные твердые растворы являются однофазными перовскитами. На рис. 2 приведен пример уточнения

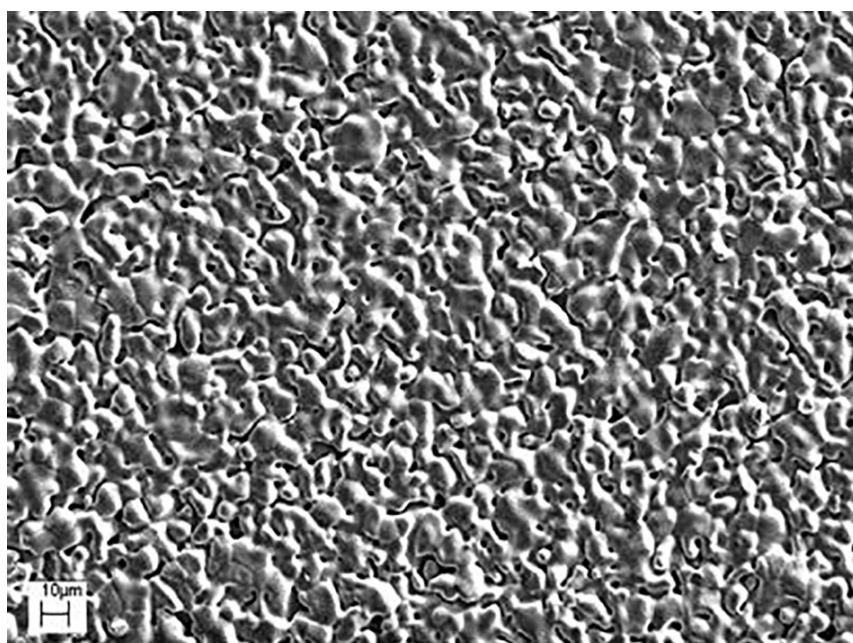


Рис. 1. Морфология поверхности слоистого кобальтита $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$

Fig. 1. Surface morphology of the layered cobaltite $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$

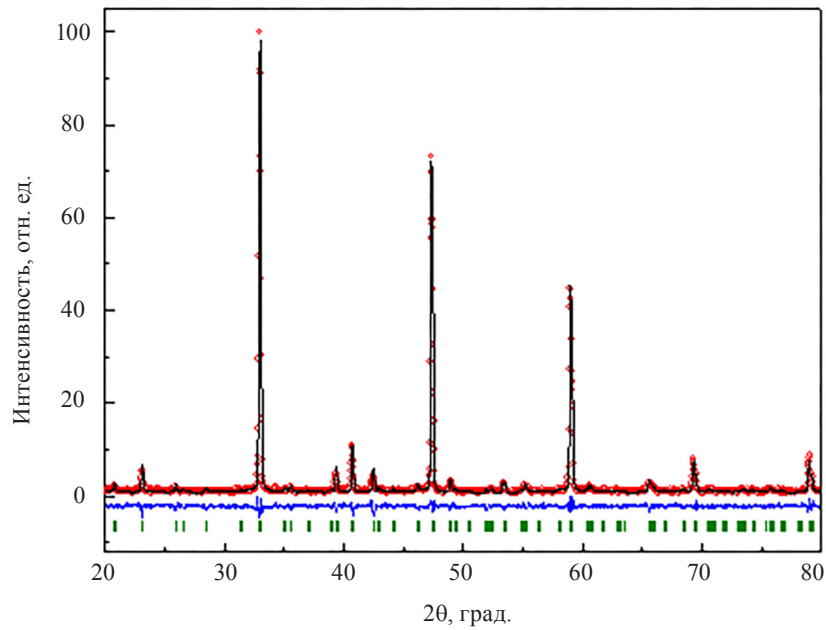


Рис. 2. Рентгенограмма образца $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of sample $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$

структуры однофазного образца $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ методом Ритвельда в тетрагональной пространственной группе $I4/mmm$. Хорошее согласие между экспериментальным и расчетным спектрами свидетельствует об однофазности образца.

Исследование температурных зависимостей модуля Юнга слоистых кобальтитов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ ($0,2 \leq y \leq 0,3$) в интервале температур 100–450 К позволило обнаружить для состава $y = 0,25$ два достаточно четко выраженных минимума: при температуре выше комнатной ($T = 350$ К), а также при температуре ниже комнатной (вблизи 220 К) (рис. 3). Как известно, аномальное поведение

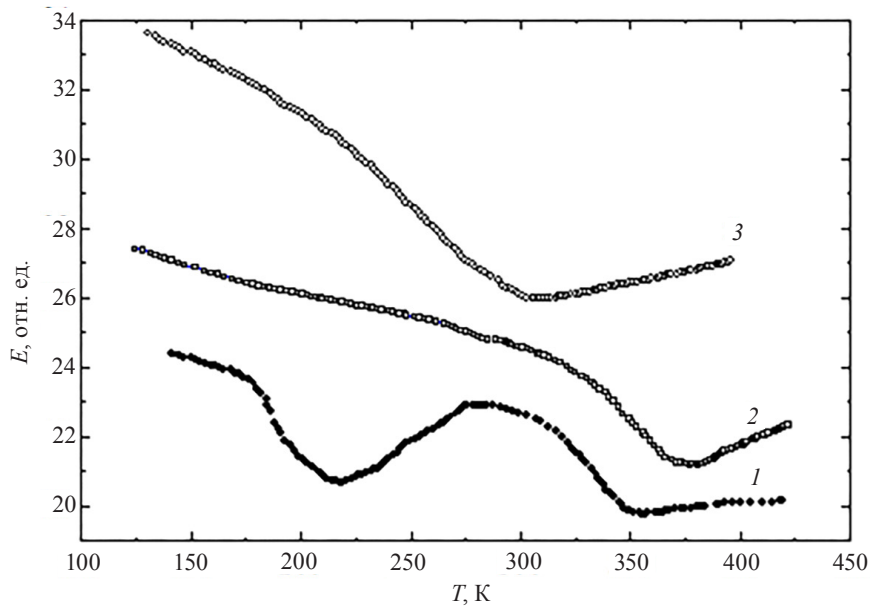


Рис. 3. Температурные зависимости модуля Юнга слоистых кобальтитов $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ (1), $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ (2) и $\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ (3)

Fig. 3. Temperature dependences of the Young's modulus of the layered cobaltites $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ (1), $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ (2), and $\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ (3)

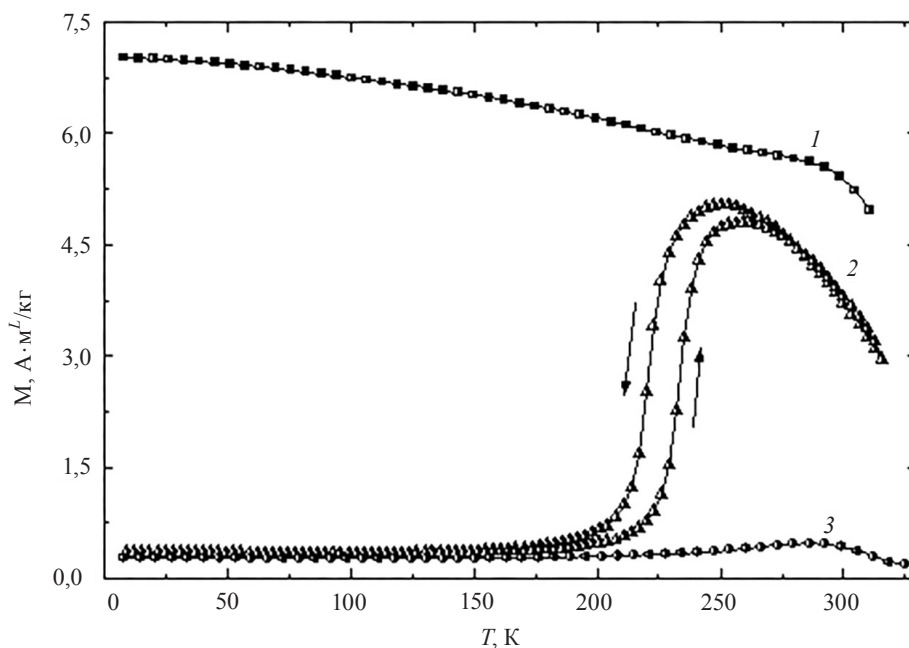


Рис. 4. Температурные зависимости намагниченности составов $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ (1), $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ (2) и $\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ (3) в поле $H = 1$ Тл

Fig. 4. Temperature dependences of the magnetization for the compositions $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ (1), $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ (2), and $\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ (3) in the field $H = 1$ T

упругих модулей, проявляющееся в виде четко выраженного минимума на температурной зависимости, свидетельствует о наличии в исследуемом образце при соответствующей температуре структурного фазового перехода [8–10]. О наличии структурных переходов при указанных температурах свидетельствует также максимальное поглощение упругой энергии, которое проявлялось в уменьшении амплитуды резонансных колебаний вблизи этих температур. Минимум, наблюдаемый при 350 К, соответствует температуре магнитного разупорядочения. Это фазовое превращение достаточно хорошо согласуется с подобными высокотемпературными переходами в образцах данной системы [6, 7, 11]. В то же время, как видно из рис. 3, для составов данной системы, ближайших к $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ ($\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ и $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$), аномальное поведение модуля Юнга проявляется лишь при высоких температурах. При температурах ниже комнатной в этих твердых растворах наблюдается классическое уменьшение модуля Юнга с повышением температуры, что указывает на отсутствие в данном температурном интервале структурных фазовых превращений.

Исследование температурной зависимости намагниченности образца $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$ в поле 1 Тл при нагреве и охлаждении позволило обнаружить вблизи температуры 220 К хорошо выраженную аномалию в виде резкого увеличения (уменьшения) намагниченности с температурным гистерезисом 12 К (рис. 4). Такое температурное поведение намагниченности характерно для магнитного фазового перехода I рода типа порядок – другой порядок.

Исследование температурных зависимостей намагниченности в поле 1 Тл составов $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ и $\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$ (рис. 4) показало, что для образца с большим содержанием иттрия ($\text{Sr}_{0,7}\text{Y}_{0,3}\text{CoO}_{3-x}$) характерно чисто антиферромагнитное поведение, в то время как образец с меньшим содержанием иттрия ($\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$) ведет себя подобно ферромагнетику. Известно, что основная магнитная структура слоистого кобальтита $\text{Sr}_{0,8}\text{Y}_{0,2}\text{CoO}_{3-x}$ является антиферромагнитной структурой G-типа с ферромагнитной компонентой [11]. Таким образом, можно предположить, что по мере увеличения содержания иттрия ферромагнитная компонента уменьшается, и составы данной системы переходят в чисто антиферромагнитное состояние через промежуточный состав $\text{Sr}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{CoO}_{3-x}$.

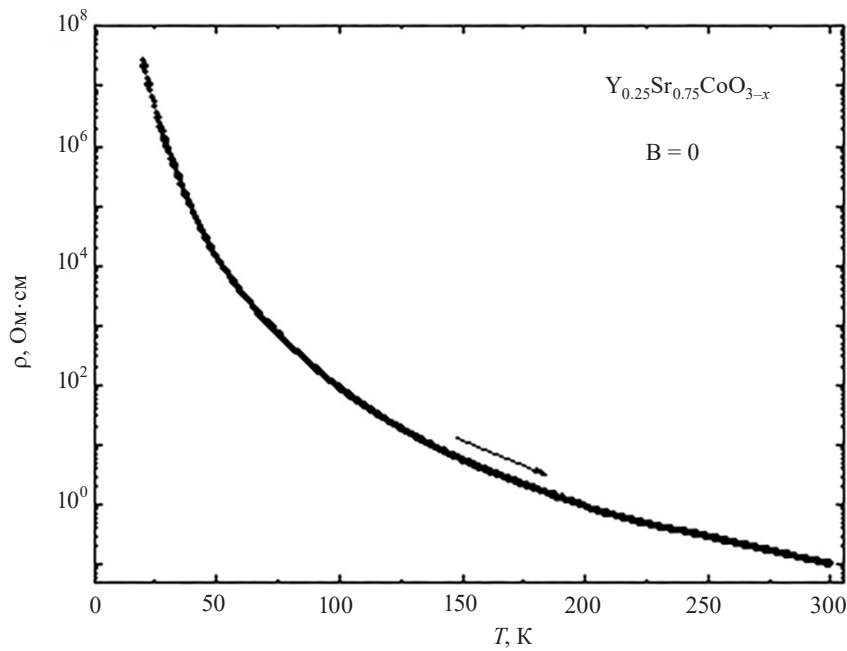


Рис. 5. Температурная зависимость удельного сопротивления состава $\text{Sr}_{0.75}\text{Y}_{0.25}\text{CoO}_{3-x}$

Fig. 5. Temperature dependence of the electrical resistivity for the composition $\text{Sr}_{0.75}\text{Y}_{0.25}\text{CoO}_{3-x}$

При этом магнитное фазовое превращение I рода порядок – другой порядок сопровождается структурным переходом, на что указывает четко выраженный минимум на температурной зависимости модуля Юнга (см. рис. 3).

Исследование температурной зависимости удельного сопротивления твердых растворов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ ($0,2 \leq y \leq 0,3$) показало, что в интервале температур 25–300 К эта зависимость носит полупроводниковый характер (рис. 5). Существенного магниторезистивного эффекта для исследуемых составов в данном интервале температур не наблюдалось.

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что обнаруженная нами низкотемпературная аномалия модуля Юнга в составе $\text{Sr}_{0.75}\text{Y}_{0.25}\text{CoO}_{3-x}$ связана с магнитным фазовым переходом, который сопровождается кристаллоструктурным превращением, совпадающим с ним по температуре. Высокотемпературные аномалии всех исследованных нами твердых растворов, обусловленные магнитным разупорядочением, также сопровождаются кристаллоструктурными фазовыми превращениями, что свидетельствует о сильной связи между магнитной и решеточной подсистемами.

Заключение. В результате исследования упругих, магнитных и транспортных свойств слоистых кобальтитов $\text{Sr}_{1-y}\text{Y}_y\text{CoO}_{3-x}$ со структурой типа перовскита в концентрационном интервале $0,2 \leq y \leq 0,3$ показано, что в твердом растворе $y = 0,25$ происходят два магнитных фазовых превращения: низкотемпературное вблизи $T = 220$ К и высокотемпературное при $T = 350$ К. Оба перехода сопровождаются структурными фазовыми превращениями при тех же температурах. Близлежащие к нему составы ($y = 0,2$ и $y = 0,3$) проявляют магнитные и структурные фазовые превращения, совпадающие по температуре, при температурах выше комнатной. Низкотемпературные фазовые переходы в этих составах не обнаружены.

Показано, что в интервале температур 25–300 К исследуемые составы характеризуются полупроводниковым характером проводимости. Существенного магниторезистивного эффекта в данном интервале температур для них не наблюдалось.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф18Р-159).

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Withers, R. L. Atomic ordering in the doped rare earth cobaltites $\text{Ln}_{0.33}\text{Sr}_{0.67}\text{CoO}_{3-\delta}$ ($\text{Ln} = \text{Y}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ and Dy^{3+}) / R. L. Withers, M. James, D. J. Goossens // *J. Solid State Chem.* – 2003. – Vol. 174, № 1. – P. 198–208. [https://doi.org/10.1016/s0022-4596\(03\)00227-5](https://doi.org/10.1016/s0022-4596(03)00227-5)
2. Structural and magnetic properties of $\text{Y}_{0.33}\text{Sr}_{0.67}\text{CoO}_{2.79}$ / D. J. Goossens [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2004. – Vol. 69, № 13. – P. 134411-1–134411-6. <https://doi.org/10.1103/physrevb.69.134411>
3. Structure-property relationship in the ordered-perovskite-related oxide $\text{Sr}_{3.12}\text{Er}_{0.88}\text{Co}_4\text{O}_{10.5}$ / S. Ishiwata [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2007. – Vol. 75, № 22. – P. 220406-1–220406-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.75.220406>
4. Field-induced spin-state transition in the perovskite cobalt oxide $\text{Sr}_{1-x}\text{Y}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ / S. Kimura [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2008. – Vol. 78, № 18. – P. 180403-1–180403-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.180403>
5. 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, № 9. – P. 024409-1–024409-8. <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.099902>
6. Troyanchuk, I. O. Effect of iron doping on magnetic properties of $\text{Sr}_{0.78}\text{Y}_{0.22}\text{O}_{2.65+\delta}$ -layered perovskite / I. O. Troyanchuk, D. V. Karpinsky, A. P. Sazonov // *J. Mater. Sci.* – 2009. – Vol. 44, № 21. – P. 5900–5908. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3835-7>
7. Complex room-temperature ferrimagnetism induced by zigzag stripes of oxygen vacancies in $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10+\delta}$ / D. D. Khalyavin [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 83, № 14. – P. 140403-1–140403-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.83.140403>
8. Троянчук, И. О. Фазовый переход в $\text{CaMn}_3(\text{Mn}^{3+}\text{Mn}^{4+})\text{O}_{12}$ со структурой перовскита / И. О. Троянчук, А. Н. Чобот // *Кристаллография.* – 1997. – Т. 42, № 6. – С. 1058–1065.
9. Magnetic and structural phase transitions in some orthocobaltites doped by Ba or Sr ions / I. O. Troyanchuk [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 1998. – Vol. 10, № 28. – P. 6381–6389. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/28/017>
10. Фазовые превращения в перовскитах $\text{TbBaCo}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\gamma}$ / И. О. Троянчук [и др.] // *ЖЭТФ.* – 2002. – Т. 122, вып. 4 (10). – С. 863–868.
11. Кристаллическая структура, магнитные и упругие свойства $\text{Sr}_{0.8}\text{Yr}_{0.2}\text{CoO}_{2.65}$ / М. В. Бушинский [и др.] // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 542–547. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-542-547>

References

1. Withers R. L., James M., Goossens D. J. Atomic ordering in the doped rare earth cobaltites $\text{Ln}_{0.33}\text{Sr}_{0.67}\text{CoO}_{3-\delta}$ ($\text{Ln} = \text{Y}^{3+}, \text{Ho}^{3+}$ and Dy^{3+}). *Journal of Solid State Chemistry*, 2003, vol. 174, no. 1, pp. 198–208. [https://doi.org/10.1016/s0022-4596\(03\)00227-5](https://doi.org/10.1016/s0022-4596(03)00227-5)
2. Goossens D. J., Wilson K. F., James M., Studer A. J., Wang X. L. Structural and magnetic properties of $\text{Y}_{0.33}\text{Sr}_{0.67}\text{CoO}_{2.79}$. *Physical Review B*, 2004, vol. 69, no. 13, pp. 134411-1–134411-6. <https://doi.org/10.1103/physrevb.69.134411>
3. Ishiwata S., Kobayashi W., Terasaki I., Kato K., Takata M. Structure-property relationship in the ordered-perovskite-related oxide $\text{Sr}_{3.12}\text{Er}_{0.88}\text{Co}_4\text{O}_{10.5}$. *Physical Review B*, 2007, vol. 75, no. 22, pp. 220406-1–220406-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.75.220406>
4. Kimura S., Maeda Y., Kashiwagi T., Yamaguchi H., Hagiwara M., Yoshida S., Terasaki I., Kindo K. Field-induced spin-state transition in the perovskite cobalt oxide $\text{Sr}_{1-x}\text{Y}_x\text{CoO}_{3-\delta}$. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 18, pp. 180403-1–180403-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.180403>
5. Sheptyakov D. V., Pomjakushin Yu. V., 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. 9, pp. 024409-1–024409-8. <https://doi.org/10.1103/physrevb.80.099902>
6. Troyanchuk I. O., Karpinsky D. V., Sazonov A. P. Effect of iron doping on magnetic properties of $\text{Sr}_{0.78}\text{Y}_{0.22}\text{O}_{2.65+\delta}$ -layered perovskite. *Journal of Materials Science*, 2009, vol. 44, no. 21, pp. 5900–5908. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3835-7>
7. Khalyavin D. D., Chapon L. C., Suard E., Parker J. E., Thompson S. P., Yaremchenko A. A., Kharton V. V. Complex room-temperature ferrimagnetism induced by zigzag stripes of oxygen vacancies in $\text{Sr}_3\text{YCo}_4\text{O}_{10+\delta}$. *Physical Review B*, 2011, vol. 83, no. 14, pp. 140403-1–140403-4. <https://doi.org/10.1103/physrevb.83.140403>
8. Troyanchuk I. O., Chobot A. N. Phase transition in $\text{CaMn}_3(\text{Mn}^{3+}\text{Mn}^{4+})\text{O}_{12}$ with perovskite structure. *Kristallografiya = Crystallography*, 1997, vol. 42, no. 6, pp. 105–1065 (in Russian).
9. Troyanchuk I. O., Kasper N. V., Khalyavin D. D., Chobot A. N., Chobot G. M., Szymczak H. Magnetic and structural phase transitions in some orthocobaltites doped by Ba or Sr ions. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1998, vol. 10, no. 28, pp. 6381–6389. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/10/28/017>
10. Troyanchuk I. O., Chobot A. N., Khalyavin D. D., Szymczak R., Szymczak H. Fazovyie prevrashcheniya v perovskitakh $\text{TbBaCo}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\gamma}$. Phase transformations in perovskites $\text{TbBaCo}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{5+\gamma}$. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2002, vol. 95, no. 4, pp. 748–752. <https://doi.org/10.1134/1.1520607>
11. Bushinsky M. V., Tereshko N. V., Chobot A. N., Mantyskaya O. S., Chobot G. M., Dobryansky V. M., Pastushonok S. N. Crystal structure, magnetic and elastic properties of $\text{Sr}_{0.8}\text{Yr}_{0.2}\text{CoO}_{2.65}$. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 542–547 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-542-547>

Информация об авторах

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

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

Чобот Александра Николаевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.n.chobot@tut.by

Мантыцкая Ольга Станиславовна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mantytskaja@physics.by

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

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

Пастушонок Софья Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sn195333@gmail.com

Information about the authors

Maxim V. Bushinsky – 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

Nina V. Tereshko – 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: tereshko@physics.by

Aleksandra N. Chobot – 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: a.n.chobot@tut.by

Mantytskaya Olga Stanislavovna – 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: mantytskaja@physics.by

Vera V. Fedotova – 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: fedotova@physics.by

Gennadii M. Chobot – 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

Sofija N. Pastushonok – 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