



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-5-13>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 538.9: 539.2: 548.4

## МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ НА ОБРАЗЦАХ $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВЕРХСТРУКТУРНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ КАТИОНОВ Fe/Mo

ГУРСКИЙ Л.И.<sup>1</sup>, КАЛАНДА Н.А.<sup>2</sup>, ЯРМОЛИЧ М.В.<sup>2</sup>, БОБРИКОВ И.А.<sup>3</sup>, ЖЕЛУДКЕВИЧ А.Л.<sup>2</sup>,  
КИРЯЕВ П.Н.<sup>4</sup>, КРИВЧЕНЯ Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
(г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup> ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>3</sup> Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,  
(г. Дубна, Россия)

<sup>4</sup> Институт порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19 декабря 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** Однофазные образцы  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  с различной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo ( $P$ , 76, 86 и 93 %) были получены твердофазным методом. На основании результатов измерения магнитных характеристик в образцах установлено, что увеличение величин намагниченности (26,41, 32,36 и 42,66  $\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ), магнитного момента (1,33, 3,07 и 3,58  $\mu\text{B}/\text{f.e.}$ ) и температур Кюри (422, 428 и 437 K) с ростом параметра  $P$  (76, 86 и 93 %) можно объяснить присутствием антиструктурных дефектов, а также антиферромагнитных включений. Наличие таковых обуславливает перераспределение электронной плотности, что сопровождается изменением электронной конфигурации части катионов Fe/Mo. На основании данных температурных зависимостей магнитного момента образцов, измеренных в ZFC и FC режимах, и малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов (МУРН) установлено, что образцы находятся в магнитно-неоднородном состоянии. Важным результатом является обнаруженное различие между наклоном кривых МУРН образцов с различным содержанием кислорода, что свидетельствует о разной микроструктуре неоднородностей. Основными неоднородностями, на которых происходит рассеяние, являются магнитные включения с характерными размерами, зависящими от сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. Показано, что согласно закону Порода при значениях волнового вектора  $0,1 > q > 0,002 \text{ \AA}^{-1}$  образцы  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  содержат полидисперсные зерна с гладкой и шероховатой поверхностью, а при  $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$  наблюдается отклонение от закона Порода, что указывает на наличие в зернах магнитных неоднородностей диаметром менее 6 нм.

**Ключевые слова:** ферромolibдат стронция, сверхструктурное упорядочение, кислородная нестехиометрия, намагниченность, малоугловое нейтронное рассеяние.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках программы ЕС «Горизонт-2020» (H2020-MSCA-RISE-2018-823942 – FUNCOAT) и задания 1.02 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Материаловедение и технологии материалов», а также проекта БРФФИ № Ф18Д-009.

**Для цитирования.** Гурский Л.И., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Бобриков И.А., Желудкевич А.Л., Киреев П.Н., Кривченя Д.А. Малоугловое рассеяние нейтронов на образцах  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  с разной степенью сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. Доклады БГУИР. 2020; 18(2): 5-13.

## SMALL-ANGLE SCATTERING OF NEUTRONS ON $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ SAMPLES WITH DIFFERENT-DEGREE SUPERSTRUCTURAL ORDERING OF Fe/Mo CATIONS

LEONID I. HURSKI<sup>1</sup>, NIKOLAY A. KALANDA<sup>2</sup>, MARTA V. YARMOLICH<sup>2</sup>,  
IVAN A. BOBRIKOV<sup>3</sup>, ALIAKSANDR L. ZHALUDKEVICH<sup>2</sup>, PETR N. KIREEV<sup>4</sup>,  
DMITRY A. KRIVCHENYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup> *Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>3</sup> *Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia)*

<sup>4</sup> *Powder Metallurgy Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 19 December 2018*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** Single-phase  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  samples with different-degreesuperstructural ordering Fe/Mo cations superstructural ordering ( $P$ , 76, 86 and 93 %) were obtained by the solid-phase technique. Based on the results of measuring the magnetic characteristics in the samples, we found that an increase in magnetization (26.41, 32.36 and 42.66  $\text{A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ), magnetic moment (1.33, 3.07 and 3.58  $\mu_{\text{B}}/\text{f.u.}$ ) and Curie temperatures (422, 428 and 437 K) with parameter  $P$  (76, 86 and 93 %) can be explained by the presence of antistructural defects, as well as antiferromagnetic inclusions. This determines the redistribution of electron density, which is accompanied by the change in electronic configuration of a part of Fe/Mo cations. Based on the temperature dependences of the magnetic moment of the samples measured in ZFC and FC modes, and on small-angle polarized neutron scattering (SANS), we found that the samples are in a magnetically inhomogeneous state. An important result to mention is that we detected the difference between the slope of the SANS curves of samples with different oxygen content, which demonstrates a different microstructure of inhomogeneities. The main inhomogeneities are magnetic inclusions with the dimensions depending on the superstructural ordering of Fe/Mo cations. According to the Porod law, it was shown that the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  samples with wave vector values  $0.1 > q > 0.002 \text{ \AA}^{-1}$  contain polydisperse grains with a smooth surface. For  $q > 0.1 \text{ \AA}^{-1}$  a deviation from the Porod law is observed, confirming the presence of magnetic inhomogeneities with a diameter  $< 6 \text{ nm}$  in the grains.

**Keywords:** strontium ferromolybdate, superstructural ordering, oxygen non-stoichiometry, magnetization, small-angle neutron scattering.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** This work was carried out as part of the European project H2020-MSCA-RISE-2018-823942 – FUNCOAT and the Assignment No. 1.02 of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus “Physical Materials Science, New Materials and Technologies” subprogram “Materials Science and Technologies”.

**For citation.** Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Bobrikov I.A., Zhaludkevich A.L., Kireev P.N., Krivchenya D.A. Small-angle scattering of neutrons on  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  samples with different-degree superstructural ordering of Fe/Mo cations. Doklady BGUIR. 2020; 18(2): 5-13.

## Введение

Исследования материалов со структурой двойного перовскита широко распространены в последнее время. Особый интерес исследователей вызывают металлооксидные ферромагнетики  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  (SFMO) ввиду их уникальных свойств – существенное отрицательное магнитосопротивление в относительно слабых магнитных полях ( $MR \sim 38\%$  в поле 1,0 Тл при  $T = 50$  К), высокие значения степени спиновой поляризации электронов проводимости ( $\sim 100\%$ ) и температуры Кюри ( $T_C \sim 420$  К) [1–3]. Эти особенности данных материалов делают их уникальными и важными ввиду потенциального применения в спинтронике (в датчиках слабых магнитных полей, устройствах для записи и обработки информации и т. д.) [4–6].

Одним из условий существования высокой степени спиновой поляризации в SFMO является наличие сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo ( $P$ ), расположенных в центрах октаэдров, в вершинах которых находятся анионы кислорода [7, 8]. В идеальной структуре SFMO катионы железа и молибдена находятся в высокоспиновом состоянии и имеют валентность  $\text{Fe}^{3+}(3d^5)$  и  $\text{Mo}^{5+}(4d^1)$ . В реальной структуре присутствуют антиструктурные точечные дефекты и анионные вакансии, что приводит к перераспределению электронной плотности и разрушает сверхструктурное упорядочение. Это обуславливает реализацию смешанных магнитных состояний в SFMO, что приводит к различным магнитным и гальваномагнитным характеристикам.

Прямыми способами изучения эволюции выделяющихся фаз и различного рода кластеров, формирующихся при термической обработке в объеме материала, являются нейтронные методы. Главным образом это относится к методу малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), поскольку нейтроны оказывают влияние не только на кристаллическую решетку, но и на магнитные моменты SFMO. Методом МУРН регистрировалось наличие антиферромагнитных кластеров в SFMO со средними размерами 20–30 нм [9]. Кроме этого, согласно результатам измерений магнитной восприимчивости на переменном токе и температурных зависимостей намагниченности, измеренных в FC (охлаждение в магнитном поле) и ZFC (охлаждение в нулевом магнитном поле) режимах в интервале температур от 4,2 до 300 К, также установлено наличие антиферромагнитных включений в ферромагнитной матрице. Особый интерес представляет изучение динамики формирования антиферромагнитных включений, изменения их размеров, фрактальной размерности и структурной организации в зависимости от концентрации антиструктурных точечных дефектов и анионных вакансий. Такая информация в настоящее время в литературе отсутствует ввиду того, что такие методы исследования, как рентгеновская и нейтронная дифракции, электронная микроскопия и др., неприменимы для решения поставленной задачи.

На основании вышеизложенного в данной работе главной целью является изучение влияния кислородной нестехиометрии и степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo на динамику формирования, фрактальную размерность и структурную организацию антиферромагнитных вкраплений в SFMO.

## Методика проведения эксперимента

Порошки  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  синтезировали методом твердофазных реакций из частично восстановленных прекурсоров  $\text{SrFeO}_{2,5}$  и  $\text{SrMoO}_4$ . Прекурсоры получали по керамической технологии из оксидов  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$  марки ОСЧ. При синтезе прекурсоров  $\text{SrFeO}_{2,5}$  и  $\text{SrMoO}_4$  предварительный отжиг осуществлялся на воздухе при 970 и 1070 К в течение 20 и 40 ч соответственно. Помол и перемешивание смеси стехиометрического состава исходных реагентов проводились в вибромельнице в этаноле в течение 3 ч. Полученные смеси сушили при температуре 350 К и затем прессовались в таблетки. Для повышения однородности шихты использовали вторичный помол полученных таблеток. Окончательный синтез при получении прекурсора  $\text{SrFeO}_{2,5}$  осуществлялся при  $T = 1470$  К в течение 20 ч в потоке аргона, а прекурсора  $\text{SrMoO}_4$  – при  $T = 1470$  К в течение 40 ч при  $p_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot 10^5$  Па с последующей закалкой прекурсоров на комнатную температуру. Затем полученные прекурсоры прессовались в таблетки диаметром 10 мм и толщиной 4–5 мм,

которые отжигались в потоке газовой смеси 5 %H<sub>2</sub>/Ar при 1420 К в течение 5 ч и закачивались на комнатную температуру.

Содержание кислорода в образцах определялось путем взвешивания до и после их полного восстановления до оксида SrO и металлов Fe и Mo в потоке смеси газов (30 % водорода и 70 % аргона) при 1473 К в течение 20 ч. Установлено, что образцы имели однофазный состав Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>5,99</sub> без сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo ( $P = 0$ ). Получение образцов с различным содержанием кислорода реализовывалось путем их отжига при 1420 К различной длительности в потоке газовой смеси 5%H<sub>2</sub>/Ar: *A-1* (Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>5,97</sub>,  $P = 76$  %) в течение 20 ч, *A-2* (Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>5,94</sub>,  $P = 86$  %) – 50 ч и *A-3* (Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>5,94</sub>,  $P = 93$  %) – 90 ч.

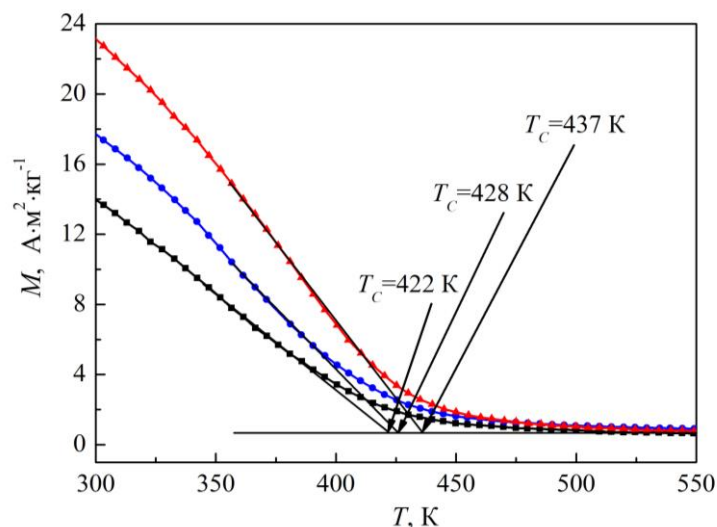
Параметры кристаллической решетки определялись с использованием базы данных ICSD–PDF2 (Release 2000) и программного комплекса PowderCell, FullProf методом Ритвельда по данным рентгеновской дифракции на установке ДРОН-3 в CuK<sub>α</sub>-излучении. Степень сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo рассчитывалась по формуле  $P = (2SOF - 1)100$  %, где SOF – фактор заселенности позиций (Seat Occupancy Factor). Температура Кюри всех образцов определялась пондеромоторным методом в ходе измерений их удельной намагниченности в интервале температур 77–800 К во внешнем магнитном поле 0,86 Тл.

Исследования сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в ферримагнетиках состава SFMO проводились с использованием малоуглового рассеяния неполяризованных и поляризованных нейтронов (режим пропускания при плоской геометрии) в г. Гестхатт (Германия) на установке SANS-1. Поляризация пучка осуществлялась методом зеркального отражения от намагниченных оптических зеркал, в процессе которого при разности в сечениях рассеяния нейтронов для спиновых состояний  $\pm 1/2h$  достигается уровень поляризации  $0,9 < P < 1$ . Дифференциальное сечение рассеяния на единицу объема (интенсивность рассеяния  $I$ ) получалось как функция вектора рассеяния с модулем  $q = (4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$ , где  $\lambda = 0,81$  нм – длина волны нейтронов (немонохроматичность 10 %), а  $\theta$  – отклонение нейтронов при рассеянии от направления пучка, определяемое на позиционно-чувствительном детекторе за образцом. Измеряемый диапазон составлял  $q = 0,005 \div 0,25 \text{ \AA}^{-1}$ . Эксперименты проводились как в отсутствие, так и в присутствии магнитного поля ( $B = 1,5$  Тл). В случае поляризованных нейтронов измерялись два вида рассеяния, соответствующие разной поляризации пучка: вдоль поля ( $I^-$ ) и противоположно полю ( $I^+$ ).

### Результаты и их обсуждение

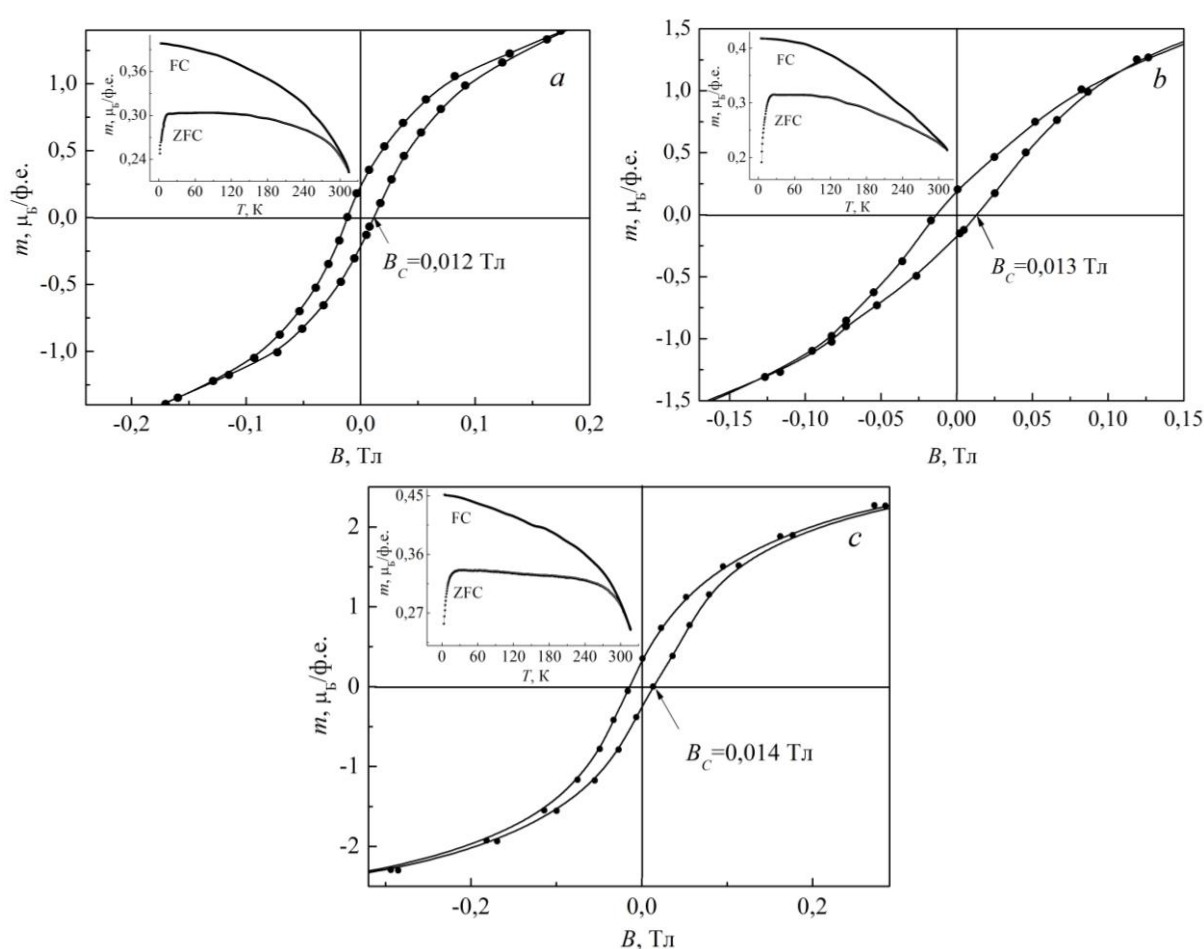
На основании результатов рентгенофазового анализа образцы *A-1*, *A-2* и *A-3* с различным содержанием кислорода и различным сверхструктурным упорядочением катионов Fe/Mo являются однофазными. Установлено, что при увеличении параметра  $P$  наблюдается рост значений намагниченности  $M(T)$  в интервале температур 77–550 К, и при 77 К они составляют  $M_{77K} = 26,41; 32,36; 42,66 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  для *A-1*, *A-2* и *A-3* соответственно. Обнаружено, что образцы имеют различные температуры перехода из парамагнитного в ферримагнитное состояние со значениями температуры Кюри  $T_C \approx 422; 428; 437 \text{ K}$  для  $P = 76; 86; 93$  % соответственно (рис. 1).

При изучении температурных зависимостей магнитного момента образцов SFMO, измеренных в ZFC и FC режимах, в них были обнаружены магнитно-неоднородные состояния. При включении слабого внешнего магнитного поля 0,01 Тл (меньше коэрцитивной силы  $B_C = 0,012; 0,013; 0,014$  Тл для *A-1*, *A-2* и *A-3* соответственно) с последующим увеличением температуры в интервале 4,2–22 К наблюдается резкий рост магнитного момента образцов (рис. 2). Это обусловлено когерентным перемагничиванием суперпарамагнитных частиц. Все спины поворачиваются таким образом, что остаются ориентированными параллельно друг другу все время, в то время как величины магнитного поля недостаточно для перемагничивания не суперпарамагнитных зерен. С дальнейшим увеличением температуры намагниченность образцов уменьшается. Суперпарамагнитные свойства в ферримагнетике SFMO, согласно данным температурных зависимостей магнитного момента, наблюдались также и другими исследователями [10, 11].



**Рис. 1.** Температурная зависимость намагниченности ферримагнетиков, измеренная в магнитном поле с индукцией  $B = 0,86$  Тл

**Fig. 1.** Temperature dependence of the magnetization of ferrimagnetics, measured in a magnetic field with induction  $B = 0.86$  T

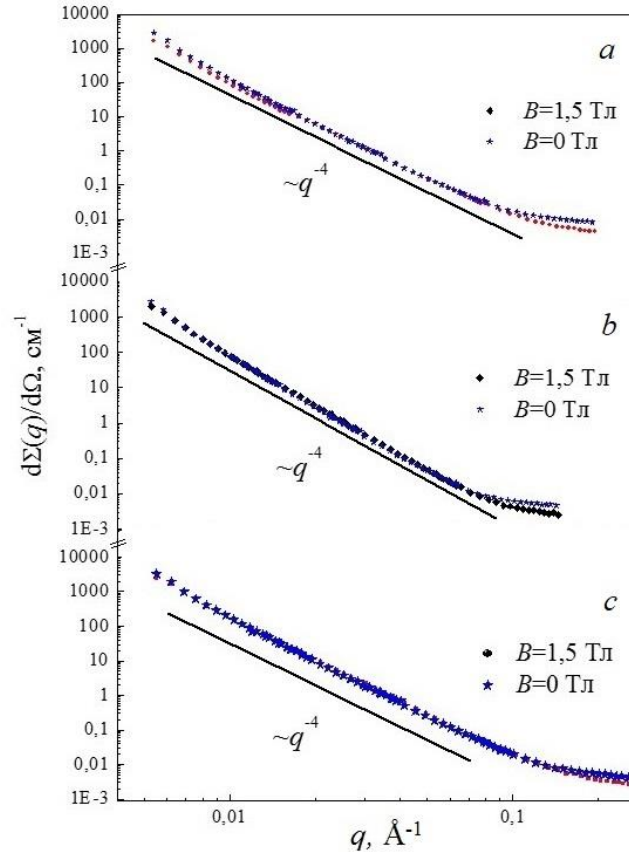


**Рис. 2.** Полевые зависимости магнитного момента образцов А-1 (а), А-2 (б), А-3 (с), измеренные в ZFC и FC режимах. На вставке представлены температурные зависимости магнитного момента образцов, измеренные в поле 0,01 Тл

**Fig. 2.** The field dependences of the magnetic moment of samples A-1 (a), A-2 (b), A-3 (c), measured in ZFC and FC modes. The inset shows the temperature dependences of the magnetic moment of the samples, measured in the field 0.01 T

Дальнейшее увеличение температуры влечет за собой плавное уменьшение  $M$ , что связано с вкладом тепловых флуктуаций с энергией  $E_{\text{тепл}} = k_B T$  в размагничивание суперпарамагнитных зерен. В этом случае рост значений  $P$  также сказывается и на величинах магнитного момента, которые составляют  $m_{A-1} = 1,33 \mu_B/\text{ф.е.}$ ,  $m_{A-2} = 3,07 \mu_B/\text{ф.е.}$  и  $m_{A-3} = 3,58 \mu_B/\text{ф.е.}$  при  $T = 77 \text{ K}$ , что хорошо коррелирует со значением параметра  $P$  образцов:  $P_{A-1} = 76 \%$ ,  $P_{A-2} = 86 \%$ ,  $P_{A-3} = 93 \%$ .

На наличие магнитно-неоднородного состояния в образцах с присутствием магнитных областей, имеющих другую магнитную природу, указывают данные малоуглового рассеяния нейтронов (рис. 3).



**Рис. 3.** Интенсивность малоуглового рассеяния неполяризованных ( $B = 0 \text{ Тл}$ ) и поляризованных ( $B = 1,5 \text{ Тл}$ ) нейтронов для образцов  $A-1$  (a),  $A-2$  (b),  $A-3$  (c). Сплошные линии показывают изменения интенсивностей согласно закону Порода:  $I \sim q^{-4}$

**Fig. 3.** The intensity of small-angle scattering of unpolarized ( $B = 0 \text{ T}$ ) and polarized ( $B = 1.5 \text{ T}$ ) neutrons for samples  $A-1$  (a),  $A-2$  (b),  $A-3$  (c). The solid lines show the changes in intensity according to the Porod law:  $I \sim q^{-4}$

Когда магнитные моменты в образце ориентированы вдоль направления приложенного магнитного поля, интенсивности рассеяния зависят от радиального угла  $\varphi$  между направлениями приложенного магнитного поля и вектора рассеяния  $q$ . При этом интенсивность рассеяния нейтронного пучка, поляризованного параллельно (–) и антипараллельно (+) направлению магнитного поля имеет вид:

$$I(q, \varphi, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (F_{\text{M}}^2(q) + 2P\varepsilon F_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q))\sin^2\varphi, \quad (1)$$

$$I^+(q, \varphi, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (F_{\text{M}}^2(q) - 2PF_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q))\sin^2\varphi, \quad (2)$$

где  $P$  – степень поляризации нейтронного пучка,  $\varepsilon$  – коэффициент спин-флиппера. Усреднение по  $\varphi$  дает:

$$I(q, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (1/2) (F_{\text{M}}^2(q) + P\varepsilon F_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q)), \quad (3)$$

$$I^+(q, B) = F_{\text{я}}^2(q) + (1/2) (F_{\text{M}}^2(q) - PF_{\text{я}}(q)F_{\text{M}}(q)). \quad (4)$$

Таким образом, интенсивности рассеяния нейтронного пучка содержат вклады ядерного ( $F_{\text{я}}(q)$ ) и магнитного ( $F_{\text{М}}(q)$ ) рассеяния, а также дополнительный перекрестный член  $F_{\text{я}}(q)F_{\text{М}}(q)$ . В общем случае  $\Gamma^+$  и  $\Gamma^-$  различаются знаком скрещивающегося члена, обусловленного интерференцией между ядерным ( $F_{\text{я}}(q)$ ) и магнитным рассеянием ( $F_{\text{М}}(q)$ ) и содержащего произведения амплитуд ядерного и магнитного рассеяния, согласно аналитическим выражениям (3) и (4). Диаграммы интенсивности рассеяния нейтронного пучка, соответствующие противоположным состояниям поляризации нейтронов, являются идентичными. В рамках дальнейшего анализа, для повышения статистической точности, усредненная величина  $(\Gamma^+ + \Gamma^-)/2$  рассматривается как компонента магнитного рассеяния. Для немагнитных образцов данное усреднение дает также компоненту магнитного рассеяния, которая сильно доминирует над ядерным рассеянием.

Для характеристики сформированных структур в качестве аппроксимации зависимостей (МУРН) был применен степенной закон [12]:  $d\Sigma(q)/d\Omega = Aq^{-\alpha} + B$ , где  $\alpha$  является экспонентой степенного закона,  $A = 2\pi\Delta\rho^2S$  – параметр, характеризующий полную площадь поверхности неоднородностей,  $S$  – удельная площадь поверхности между неоднородностью и матрицей,  $B$  – остаточный некогерентный фон,  $\Delta\rho^2 = (\rho - \rho_s)^2$  – контраст. Величина  $\alpha$  указывает на наличие видов структур, которые являются причиной рассеяния в различных интервалах величин вектора рассеяния  $q$ . Для образцов  $A-1$ ,  $A-2$  и  $A-3$  при всех величинах  $B$   $\alpha \cong 4$  при значениях волнового вектора  $0,1 > q > 0,002 \text{ \AA}^{-1}$  (рис. 3). Это указывает на то, что рассеяние на магнитных структурах с большим масштабом длины ( $D > 6$  нм) подчиняется закону Порода ( $\alpha \cong 4$ ) [12], что соответствует объекту с гладкой поверхностью и полидисперсной структурой зерен.

Важным результатом является обнаруженное различие между наклоном кривых МУРН образцов  $A-1$ ,  $A-2$  и  $A-3$ , что свидетельствует о разной микроструктуре неоднородностей. Основными неоднородностями, на которых происходит рассеяние, являются магнитные включения с характерными размерами, зависящими от сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo. Для больших  $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$  полученные кривые рассеяния от образцов  $A-1$ ,  $A-2$  и  $A-3$  в магнитных полях до 1,5 Тл показывают, что воздействие магнитного поля приводит к анизотропии двумерного рассеяния. Это указывает на некоторый магнитный вклад от неоднородностей (примесей) малого масштаба с  $D < 6$  нм, которые не разрушаются магнитным полем даже при  $B = 1,5$  Тл. Данные малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов показывают динамику изменения магнитных неоднородностей размерами  $D < 6$  нм в образцах  $A-1$ ,  $A-2$  и  $A-3$ . Установлено, что магнитное поле влияет на изменение рассеяния только в областях с большими значениями векторов рассеяния  $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$ .

### Заключение

На основании результатов измерения магнитных характеристик в образцах  $A-1$ ,  $A-2$  и  $A-3$  установлено, что увеличение величин намагниченности ( $26,41 \text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$   $A-1$ ,  $32,36 \text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$   $A-2$  и  $42,66 \text{ A}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$   $A-3$ ), магнитного момента ( $m(A-3) = 1,33 \text{ мБ/ф.е.}$ ,  $m(A-2) = 3,07 \text{ мБ/ф.е.}$  и  $m(A-3) = 3,58 \text{ мБ/ф.е.}$ ) и температур Кюри (422, 428 и 437 К) с ростом сверхструктурного упорядочения  $P$  (76, 86 и 93 %) можно объяснить присутствием антиструктурных дефектов, а также антиферромагнитных включений. На основании данных изучения температурных зависимостей магнитного момента образцов, измеренных в ZFC и FC режимах, в них обнаружено магнитно-неоднородное состояние. На наличие магнитно-неоднородного состояния в образцах с присутствием магнитных областей, имеющих другую магнитную природу, также указывают данные малоуглового рассеяния нейтронов. Для образцов  $A-1$ ,  $A-2$  и  $A-3$  при всех величинах и направленности  $B$  величина  $\alpha$  примерно равна 4 при значениях волнового вектора  $0,1 > q > 0,002 \text{ \AA}^{-1}$ . Это означает, что рассеяние на магнитных структурах с большим масштабом длины ( $D > 6$  нм) подчиняется закону Порода, что соответствует объекту с гладкой поверхностью и полидисперсной структурой зерен. Отклонения в области  $q > 0,1 \text{ \AA}^{-1}$  от закона Порода можно связать с магнитными неоднородностями размером менее 10 нм, которые не могут быть разрушены магнитным полем даже при  $B = 1,5$  Тл. Обнаружено, что с увеличением сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo магнитная однородность ферромагнетика  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  повышается.

### Список литературы / References

1. Serrate D., De Teresa J. M., Ibarra M. R. Double perovskites with ferromagnetism above room temperature. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2007;19:1-86. DOI: 10.1088/0953-8984/19/2/023201.
2. Kalanda N., Demyanov S., Masselink W., Mogilatenko A., Chashnikova M., Sobolev N., Fedosenko O. Interplay between phase formation mechanisms and magnetism in the Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub> metal–oxide compound. *Crystal Research and Technology*. 2011;46(5):463–469. DOI: 10.1002/crat.201000213.
3. Kalanda N.A., Demyanov S.E., Petrov A.V., Karpinsky D.V., Yarmolich M.V., Oh S.K., Yu S.C., Kim D.H. Interrelation between the structural, magnetic and magnetoresistive properties of double-perovskite Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> thin films. *Journal of Electronic Materials*. 2016;45(7):3466-3472. DOI: 10.1007/s11664-016-4478-5.
4. Cibert J., Bobo J.F., Lüders U. Development of new materials for spintronics. *Comptes Rendus Physique*. 2005;6(9):977-996. DOI: 10.1016/j.crhy.2005.10.008.
5. Kalanda N., Kim, D.H., Demyanov S., Yu S.C., Yarmolich M., Petrov A., Oh S.K. Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub> nanosized compound with dielectric sheaths for magnetically sensitive spintronic devices. *Current Applied Physics*. 2018;18(1):27–33. DOI: 10.1016/j.cap.2017.10.018.
6. Kovalev L.V., Yarmolich M.V., Petrova M.L., Ustarroz J., Terryn H.A., Kalanda N.A., Zheludkevich M.L. Double Perovskite Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub> Films Prepared by Electrophoretic Deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014; 6(21):9201-19206. DOI: 10.1021/am5052125.
7. Hurski L.L., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Turchenko V.A., Karpinsky D.V., Chumak V.A., Petrov A.V., Zheludkevich A.L. Interrelation between oxygen non-stoichiometry and Fe/Mo superstructural ordering in Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-d</sub>. *Doklady BGUIR*. 2017;(8):54-59. (In Russ.).
8. Rager J., Zipperle M., Sharma A., MacManus-Driscoll J.L. Oxygen Stoichiometry in Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub>, the Determination of Fe and Mo Valence States, and the Chemical Phase Diagram of SrO – Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> – MoO<sub>3</sub>. *Journal of the American Ceramic Society*. 2004;87:1330-1335. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2004.tb07730.x.
9. Kanchana V., Vaitheeswaran G., Alouani M., Delin A. Electronic structure and x-ray magnetic circular dichroism of Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub>:Ab initio calculations. *Physical Review B*. 2007;75(22):220404(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.220404.
10. Li X.H., Sun Y.P., Lu W.J., Ang R., Zhang S.B., Zhu X.B., Song W.H., Dai J.M. Size dependence of electronic and magnetic properties of double-perovskite Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub>. *Solid State Communications*. 2008;145(3):98-102. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.10.021.
11. Suominen T., Raittila J., Salminen T., Schlesier K., Linden J., Paturi P. Magnetic properties of fine SFMO particles: Superparamagnetism. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;309(2):278-284. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.07.016.
12. Sui Y., Wang X.J., Qian Z.N., Liu Z.G., Miao J.P., Cheng J.G., Huang X.Q., Lu Z., Su W.H., Ong C.K. Influence of doping Al on the magnetoresistance of polycrystalline Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub>. *Journal of magnetism and magnetic materials*. 2005;290:1089-1092. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.07.016.

### Вклад авторов

Гурский Л.И. выполнил редактирование и окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Каланда Н.А. определил замысел и дизайн исследования, принял участие в анализе и интерпретации данных, подготовил статью к публикации.

Ярмолич М.В. осуществила синтез образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> с различным содержанием кислорода твердофазным методом, сбор и обработку экспериментальных данных по фазовому составу и намагниченности, приняла участие в анализе и интерпретации данных.

Бобриков И.А. произвел анализ и интерпретацию полученных данных по малоугловому рассеянию неполяризованных и поляризованных нейтронов.

Желудкевич А.Л. выполнил измерение удельной намагниченности образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub>.

Киреев П.Н. осуществил обработку данных, редактирование и оформление статьи для публикации.

Кривченя Д.А. выполнил измерения структурных свойств образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> методом рентгеновской дифракции.



### Authors contribution

Hurski L.I. edited and delivered the final approval of the manuscript for publication, including its critical review in terms of significant intellectual content.

Kalanda N.A. defined the concept and design of research, took part in data analysis and interpretation and prepared the article for publication.

Yarmolich M.V. synthesized  $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$  samples with different oxygen content by the solid-phase technique, collected and processed the experimental findings concerning phase composition and magnetization, and partook in the data analysis and interpretation.

Bobrikov I.A. analyzed and interpreted the obtained data on small-angle scattering of unpolarized and polarized neutrons.

Zhaludkevich A.L. measured specific magnetization of  $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$  samples.

Kireev P.N. processed the obtained experimental results and prepared the article for publication.

Krivchenya D.A. measured the structural properties of  $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$  samples by the X-ray diffraction technique.

### Сведения об авторах

Гурский Л.И., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Центра 9.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Каланда Н.А., к.ф.м.н., ведущий научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Ярмолич М.В., к.ф.м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Бобриков И.А., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия).

Желудкевич А.Л., научный сотрудник лаборатории физики высоких давлений и синтеза сверхтвердых материалов ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

Киреев П.Н., к.т.н., зав. отделением машиностроительных материалов ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси».

Кривченя Д.А., младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению».

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-17- 293-85-17;  
e-mail: lhur@bsuir.by  
Гурский Леонид Ильич

### Information about the authors

Hurski L.I., D.Sci., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D.Sci., Professor, Main Research Fellow of the Centre 9.1 of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalanda N.A., PhD, leading researcher of the Department of cryogenic research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Yarmolich M.V., PhD, senior researcher of the Department of cryogenic research of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Bobrikov I.A., PhD, senior researcher of the Laboratory of neutron physics named after I.M. Frank of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia).

Zhaludkevich A.L., researcher of laboratory of high pressure physics and synthesis of superhard materials of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

Kireev P.N., PhD, Head of the Department of engineering materials of the SSI "Powder Metallurgy Institute of the NAS of Belarus".

Krivchenya D.A., junior researcher of the laboratory of physics of magnetic materials of the SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus".

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-17- 293-85-17;  
e-mail: lhur@bsuir.by  
Hurski Leonid Ilyich