



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-14-21>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 538.9: 539.264: 548.4

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КИСЛОРОДНОЙ НЕСТЕХИОМЕТРИИ И СВЕРХСТРУКТУРНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ КАТИОНОВ Fe/Mo В ФЕРРОМОЛИБДАТЕ СТРОНЦИЯ

Л.И. ГУРСКИЙ<sup>1</sup>, Н.А. КАЛАНДА<sup>2</sup>, М.В. ЯРМОЛИЧ<sup>2</sup>, А.В. ПЕТРОВ<sup>2</sup>, Д.А. ГОЛОСОВ<sup>1</sup>,  
М.В. КИРОСИРОВА<sup>3</sup>, О.В. ИГНАТЕНКО<sup>2</sup>, А.Л. ЖЕЛУДКЕВИЧ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (г. Минск,  
Республика Беларусь)

<sup>3</sup>Государственный центр «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** Однофазные образцы  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  без сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена ( $P$ ) с температурой Кюри 407 К были получены твердофазным методом. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, динамика роста степени параметра  $P$  носит нелинейный характер. При этом процесс достижения максимальных значений параметра  $P$  ( $P_{\text{макс}}$ ) длителен и его скорость в несколько раз ниже, чем скорость изменения кислородного индекса  $6-\delta$ . Обнаружено, что с увеличением температуры изотермического отжига величина  $P$  растет и достигает максимальных значений 88 % при  $T = 1320$  К в течение 120 ч,  $P_{\text{макс}} = 92$  % при  $T = 1420$  К в течение 100 ч, тогда как  $P_{\text{макс}} = 90$  % при  $T = 1470$  К в течение 45 ч. Можно предположить, что более низкие значения  $P_{\text{макс}}$  при  $T = 1470$  К, чем при  $T = 1420$  К, обусловлены влиянием тепловой энергии на разрушение цепочечного упорядочения катионов Fe и Mo, расположенных в шахматном порядке. На основании анализа временных зависимостей параметра  $P$  можно обнаружить два релаксационных процесса, и зависимость  $dP/dt = f(t)$  можно условно разделить на две области – I и II. В области I время релаксации меньше, чем в II. Это связано с тем, что для упорядочения катионов в цепочках  $-\text{O}-\text{Fe}-\text{O}-\text{Mo}-\text{O}$  в области I нужны перемещения атомов примерно на одно межатомное расстояние, тогда как в области II перемещения катионов осуществляются на большие расстояния с образованием длинноцепочечного упорядочения дальнего порядка.

**Ключевые слова:** ферромоллибдат стронция, сверхструктурное упорядочение катионов, кислородная нестехиометрия.

**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» подпрограммы «Материаловедение и технологии материалов».

**Для цитирования.** Гурский Л.И., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Петров А.В., Голосов Д.А., Киросирова М.В., Игнатенко О.В., Желудкевич А.Л. Сравнительный анализ изменения кислородной нестехиометрии и сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в ферромоллибдате стронция. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 14–21.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CHANGE OF OXYGEN NONSTOICHIOMETRY AND SUPERSTRUCTURAL ORDERING OF Fe/Mo CATIONS IN THE STRONTIUM FERROMOLYBDATE

LEONID I. HURSKI<sup>1</sup>, NIKOLAY A. KALANDA<sup>2</sup>, MARTA V. YARMOLICH<sup>2</sup>,  
ALEXANDER V. PETROV<sup>2</sup>, DMITRY A. GOLOSOV<sup>1</sup>, MARIA V. KIROSIROVA<sup>3</sup>,  
OLEG V. IGNATENKO<sup>2</sup>, ALIAKSANDR L. ZHALUDKEVICH<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>The State Centre “Belmikroanaliz” of the “Integral” (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> single-phase samples without Fe/Mo cations superstructural ordering ( $P$ ) and with Curie temperature 407 K were obtained by the solid-phase technique. According to the XRD data, the growth dynamics of the parameter  $P$  is nonlinear. In this case, the process of reaching maximum values of  $P$  ( $P_{\max}$ ) is long and its rate is several times lower than the change of the oxygen index  $6-\delta$ . It was found that with increasing temperature of isothermal annealing,  $P$  increases and reaches maximal values 88 % at  $T = 1320$  K for 120 h,  $P_{\max} = 92$  % at  $T = 1420$  K for 100 h, while  $P_{\max} = 90$  % at  $T = 1470$  K for 45 h. One can assume that the lower values of  $P_{\max}$  at  $T = 1470$  K than at  $T = 1420$  K are due to the influence of thermal energy on the destruction of chain ordering of Fe and Mo cations placed in staggered order. Based on the analysis of  $P$  time dependences, two relaxation processes can be found and the  $dP/dt = f(t)$  can be divided into two regions – I and II. In the region I the relaxation time is shorter than that in the region II. The point is that the ordering of cations in the –O–Fe–O–Mo–O chains in the region I requires atomic displacements by approximately one interatomic distance, whereas in the region II cation displacements occur over long distances with the formation of long-chain long-range ordering.

**Keywords:** strontium ferromolybdate, superstructural ordering of cations, oxygen non-stoichiometry.

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

**Gratitude.** This work was carried out in frames of the European project H2020–MSCA–RISE–2018–823942 – FUNCOAT and the Task 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 materials technologies”.

**For citation.** Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Petrov A.V., Golosov D.A., Kiroshirova M.V., Ignatenko O.V., Zhaludkevich A.L. Comparative analysis of the change of oxygen nonstoichiometry and superstructural ordering of Fe/Mo cations in the strontium ferromolybdate. Doklady BGUIR. 2021; 19(2): 14-21.

### Введение

Изучение соединений со структурой двойного перовскита привлекает все большее внимание исследователей. Среди таких материалов особенно выделяются металлооксидные ферромагнетики Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> (SFMO), поскольку они обладают такими свойствами, как высокие величины отрицательного магниторезистивного эффекта ( $MR \sim 38$  % в поле 1,0 Тл при  $T = 50$  К), практически 100 % значения степени спиновой поляризации электронов проводимости и высокие значения температуры Кюри ( $T_C \sim 420$  К) [1–3].

Вышеуказанные особенности делают эти материалы перспективными для их дальнейшего применения в спинтронных устройствах [4–6]. Одной из причин, почему эти материалы не используются широко, является плохая воспроизводимость свойств материалов, полученных в аналогичных условиях. Существенное влияние на содержание кислорода в SFMO

оказывают температура и время отжига, тип и поток газа. Это подтверждает сильную чувствительность материала соединения к условиям синтеза, от которых в существенной степени зависит кислородная стехиометрия составов [7–9].

Ключевой задачей в области спинтроники является совершенствование технологии получения высококачественных образцов SFMO с воспроизводимыми магнитными и гальваномангнитными свойствами. Одним из главных условий существования спиновой поляризации в ферромолибдате стронция является наличие сверхструктурного упорядочения катионов Fe и Mo [1, 2]. В реальной структуре по причине возникновения различного рода дефектов и, в частности, антиструктурных, обусловленных наличием анионных вакансий, появляются ионы железа  $Fe^{2+}(3d^6)$  и молибдена  $Mo^{6+}(4d^0)$ .

Поскольку в обменных взаимодействиях диамагнитный катион молибдена не участвует, и между ионами  $Fe^{2+}(3d^6)$  или  $Fe^{3+}(3d^5)$  возможны только отрицательные обменные взаимодействия, это приводит к формированию антиферромагнитного упорядочения. Поэтому любые искажения кристаллической решетки, обусловленные кислородной дефектностью, оказывают сильное воздействие на электротранспортные и магнитные свойства ферромолибдата стронция [10, 11]. Поэтому, чтобы получить SFMO с оптимальными магнитными и гальваномангнитными свойствами и, исходя из этого, продлить срок службы устройств на их основе, требуется знание и контроль анионного состава материалов и динамики сверхструктурного упорядочения Fe/Mo по катионной подрешетке соединения.

Данное обстоятельство обуславливает необходимость установления корреляций между кислородной нестехиометрией и степенью сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена, что позволит получать ферромолибдат стронция с воспроизводимыми физико-химическими характеристиками.

### Методика проведения эксперимента

Порошки  $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$  синтезировались методом твердофазных реакций из частично восстановленных прекурсоров  $SrFeO_{2,5}$  и  $SrMoO_4$ . Прекурсоры были получены по керамической технологии из оксидов  $MoO_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SrCO_3$  марки «ОСЧ». При синтезе прекурсоров  $SrFeO_{2,5}$  и  $SrMoO_4$  предварительный отжиг осуществлялся на воздухе при 970 К 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 сушились при температуре 350 К и затем прессовались в таблетки. Для повышения однородности шихты использовался вторичный помол полученных таблеток. Окончательный синтез при получении прекурсора  $SrFeO_{2,5}$  осуществлялся при  $T = 1470$  К в течение 20 ч в потоке аргона, а прекурсора  $SrMoO_4$  – при  $T = 1470$  К в течение 40 ч при  $p_{O_2} = 0,21 \cdot 10^5$  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 %  $H_2/Ar$  при 1420 К в течение 5 ч и закаливались 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  $Sr_2FeMoO_{5,99}$  без сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo ( $P = 0$ ).

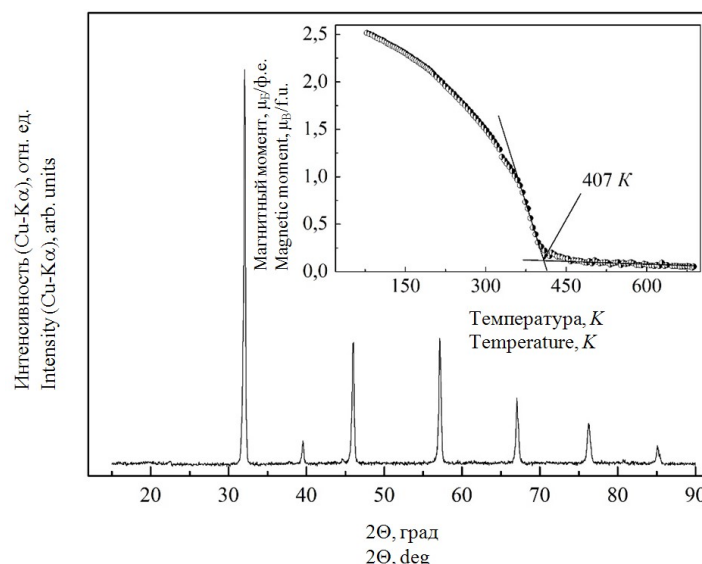
Параметры кристаллической решетки определялись с использованием базы данных ICSD–PDF2 (Release 2000) и программного комплекса PowderCell [12] методом Ритвельда по данным рентгеновской дифракции на установке ДРОН-3 в  $CuK_{\alpha}$ -излучении. Степень сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo рассчитывалась по формуле:  $P = (2 \cdot SOF - 1) \cdot 100$  %, где SOF – фактор заселенности позиций (Seat Occupancy Factor).

Микроструктура и состав порошков SFMO исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на установке Hitachi S-4800 с приставкой рентгеноспектрального микроанализатора Bruker Quantex 200.

Температура Кюри образцов определялась пондеромоторным методом в ходе измерений их магнитного момента в интервале температур 77–800 К во внешнем магнитном поле 0,86 Тл.

### Результаты и их обсуждение

Полученные образцы  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  были однофазными, с температурой Кюри  $T_C = 407$  К, без сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена (рис. 1).



**Рис. 1.** Рентгеновская дифрактограмма образца  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$ . На вставке представлена температурная зависимость магнитного момента образца  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$

**Fig. 1.** X-ray diffraction pattern of  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  sample. The inset shows the temperature dependence of the magnetic moment of the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  sample

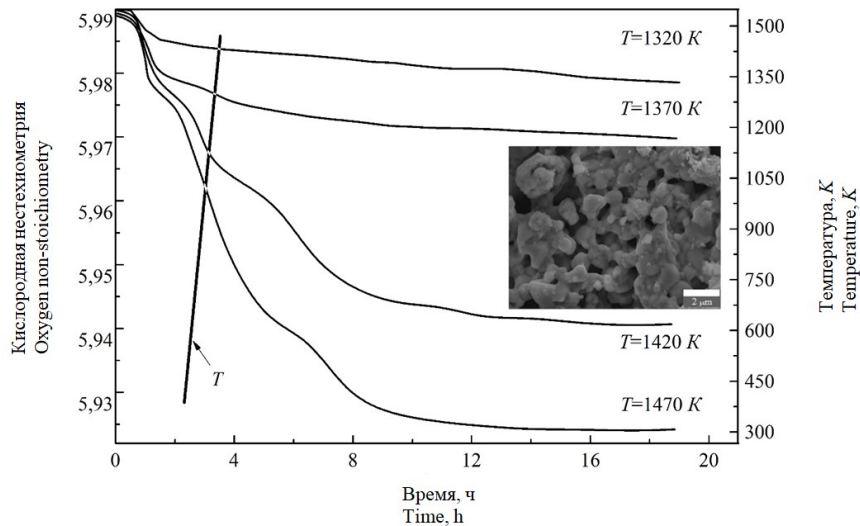
Для проведения сравнительного анализа скоростей выхода на насыщение кислородного индекса и степени сверхструктурного упорядочения образцов  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  строились изотермические зависимости вида:  $(6-\delta) = f(t)$  и  $P = f(t)$ .

Исследование поведения зависимостей  $(6-\delta) = f(t)$  осуществлялось в условиях изотермических отжигов образцов  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  при различных температурах в потоке газовой смеси 5 %  $\text{H}_2/\text{Ar}$ .

Подъем температуры до необходимых значений производился со скоростью 12 град/мин. Установлено, что изменение кислородного индекса выходит на насыщение при  $6-\delta = 5,962$  и  $T = 1370$  К в течение 18,2 ч, а с увеличением температуры до 1470 К кислородный индекс достигает значений  $6-\delta = 5,923$  в течение 13,6 ч.

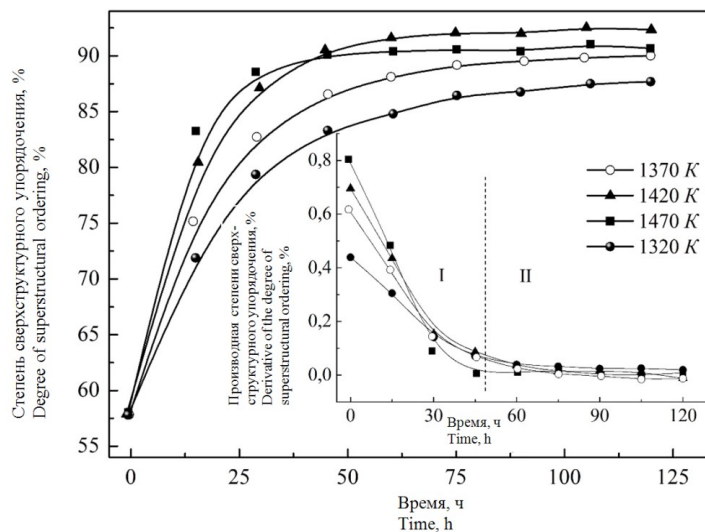
Для изучения динамики сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo путем построения функции вида  $P = f(t)$  проводились изотермические отжиги образцов  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  в течение 120 ч с шагом по 15 ч при различных температурах в потоке газовой смеси 5 %  $\text{H}_2/\text{Ar}$ , после чего образцы закаливались до комнатной температуры в той же газовой среде.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, динамика роста степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo носит нелинейный характер. При этом процесс достижения максимальных значений  $P_{\text{макс}}$  длителен и имеет скорость в несколько раз ниже, чем скорость изменения кислородного индекса  $6-\delta$  (рис. 2, 3).



**Рис. 2.** Изменение кислородной нестехиометрии ( $6-\delta$ ) в ходе отжига образца  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  в потоке смеси инертных газов 5 %  $\text{H}_2/\text{Ar}$  со скоростью нагрева 12 град/мин и последующего изотермического отжига при различных температурах. На вставке показано РЭМ-изображение микроструктуры образца  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$

**Fig. 2.** Change in oxygen non-stoichiometry ( $6-\delta$ ) during annealing of the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  sample in a stream of 5%  $\text{H}_2/\text{Ar}$  inert gas mixture with a heating rate of 12 deg/min and subsequent isothermal annealing at different temperatures. The inset shows the SEM image of the microstructure of the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  sample



**Рис. 3.** Временные зависимости степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Мо, полученной при термообработке образцов  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  в потоке смеси газов 5%  $\text{H}_2/\text{Ar}$  со скоростью нагрева 12 град/мин. На вставке показаны временные зависимости первой производной степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Мо

**Fig. 3.** Time dependences of the degree of superstructural ordering of Fe/Mo cations obtained by heat treatment of  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{5,99}$  samples in a 5%  $\text{H}_2/\text{Ar}$  gas mixture flow with a heating rate of 12 deg/min. The inset shows the time dependences of the first derivative of the degree of superstructural ordering of Fe/Mo cations

Обнаружено, что с увеличением температуры изотермического отжига величина  $P$  растет и достигает максимальных значений  $P_{\text{макс}} = 88\%$  при  $T = 1320\text{ K}$  в течение  $t = 120\text{ ч}$ ,  $P_{\text{макс}} = 92\%$  при  $T = 1420\text{ K}$  в течение  $t = 100\text{ ч}$ , тогда как  $P_{\text{макс}} = 90\%$  при  $T = 1470\text{ K}$  в течение  $t = 45\text{ ч}$ . Можно предположить, что более низкие значения  $P_{\text{макс}}$  при  $T = 1470\text{ K}$ , чем при  $T = 1420\text{ K}$ , обусловлены влиянием тепловой энергии на разрушение цепочечного упорядочения катионов Fe и Mo, расположенных в шахматном порядке. Зависимость  $(6-\delta) = f(t)$  была аппроксимирована с использованием функции вида  $6-\delta = (6-\delta_0)\exp(-t/\tau_0)$ , где  $\tau_0$  – время релаксации десорбции кислорода,  $(6-\delta_0) = 5,99$  – содержание кислорода в начале измерений (табл. 1).

**Таблица 1.** Время релаксации процессов десорбции кислорода и сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo при термообработке образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>5,99</sub> в потоке смеси газов 5 % H<sub>2</sub>/Ar со скоростью нагрева 12 град/мин

**Table 1.** The relaxation time of oxygen desorption processes and superstructural ordering of Fe/Mo cations during heat treatment of Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>5,99</sub> samples in a 5 % H<sub>2</sub>/Ar gas mixture stream with a heating rate of 12 deg/min

T, K	τ <sub>о</sub> , с	dP <sub>о</sub> /dt	τ <sub>p</sub> , с
1320	5,4320	0,4479	27,1173
1370	5,0235	0,6458	25,8194
1420	4,7411	0,7269	22,2838
1470	2,7961	0,8191	19,7692

На основе результатов анализа данных производных  $dP/dt$  можно обнаружить два релаксационных процесса, характеризующихся как различными постоянными времени, так и степенью воздействия на величину  $P$ . При этом зависимость  $dP/dt = f(t)$  можно условно разделить на две области – I и II (рис. 3).

При аппроксимации  $dP/dt = f(t)$  функцией вида  $dP/dt = (dP_0/dt)\exp(-t/\tau_p)$ , где  $\tau_p$  – время релаксации сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo,  $dP_0/dt$  – производная сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo в начальный момент времени. Обнаружено, что в области I время релаксации меньше, чем в II (табл. 1). Можно предположить, что различие скоростей увеличения  $P$  в областях I и II связано с тем, что для упорядочения катионов в цепочках –O–Fe–O–Mo–O (область I) нужны перемещения атомов примерно на одно межатомное расстояние, тогда как в области II перемещения катионов осуществляются на большие расстояния с образованием длинноцепочечного упорядочения дальнего порядка.

Таким образом, динамика изменения кислородной нестехиометрии и степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo свидетельствует, что скорость десорбции кислорода в несколько раз больше скорости сверхструктурного упорядочения катионов.

### Заключение

Установлено, что динамика роста степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo носит нелинейный характер. При этом процесс достижения максимальных значений  $P_{\text{макс}}$  длителен и его скорость в несколько раз ниже, чем скорость изменения кислородного индекса  $\delta$ . На основании анализа данных производных степени сверхструктурного упорядочения катионов Fe/Mo установлено, что зависимость  $dP/dt = f(t)$  можно условно разделить на две области – I и II, отличающиеся скоростями увеличения  $P$ . Можно предположить, что различие скоростей увеличения  $P$  в областях I и II связано с тем, что для упорядочения катионов в цепочках –O–Fe–O–Mo–O (область I) нужны перемещения атомов примерно на одно межатомное расстояние, тогда как в области II перемещения катионов осуществляются на большие расстояния с образованием длинноцепочечного упорядочения дальнего порядка.

### 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. Topwal D., Sarma D.D., Kato H., Tokura Y., Avignon M. Structural and magnetic properties of Sr<sub>2</sub>Fe<sub>1-x</sub>Mo<sub>1-x</sub>O<sub>6</sub> (–1<x<0,25). *Physical Review B*. 2006;73:0944191-0944195. DOI:10.1103/PhysRevB.73.094419.
3. Chan T.S., Liu R.S., Hu S.F., Lin J.G. Structure and physical properties of double perovskite compounds Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub> (M = Mo, W). *Materials chemistry and physics*. 2005;93(2-3):314-319. DOI:10.1016/j.matchemphys.2005.03.060.
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. 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 Applied Materials & Interfaces*. 2014;6(21):9201-19206. DOI: 10.1021/am5052125.

- 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.
- 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.
- Allub R., Navarro O., Avignon M., Alascio B. Effect of disorder on the electronic structure of the double perovskite Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6</sub>. *Physica B: Condensed Matter*. 2002;320(1-4):13-17. DOI: 10.1016/S0921-4526(02)00608-7.
- Hurski L.I., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Turchenko V.A., Karpinsky D.V., Chumak V.A., Petrov A.V., Zhaludkevich A.L. Interrelation between oxygen non–stoichiometry and Fe/Mo superstructural ordering in Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub>. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;(8):54-59. (In Russ.).
- 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.
- Zhou J.P., Dass R., Yin H.Q., Zhou J.S., Rabenberg L., Goodenough J.B. Enhancement of room temperature magnetoresistance in double perovskite ferrimagnets. *Journal of Applied Physics*. 2000;87(9):5037-5039. DOI: 10.1063/1.373240.
- Kraus W., Nolze G.W. Powder Cell – a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns. *Journal of Applied Crystallography*. 1996;29(3):301-303. DOI:10.1107/S0021889895014920.

### Вклад авторов

Гурский Л.И. утвердил окончательный вариант рукописи для публикации, провел редактирование и осуществил критический пересмотр материалов статьи в части значимого интеллектуального содержания.

Каланда Н.А. поставил задачи и выполнил дизайн исследования, провел анализ и интерпретацию данных, подготовил статью к публикации.

Ярмолич М.В. провела синтез образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> твердофазным методом, осуществила сбор и обработку экспериментальных данных по фазовому составу, анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

Петров А.В. осуществил обработку данных, редактирование и оформление статьи для публикации.

Голосов Д.А. осуществил проведение измерений структурных свойств образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> методом рентгеновской дифракции.

Киросирова М.В. провела исследования микроструктуры и элементного состава образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> с помощью СЭМ и ЭДРС.

Игнатенко О.В. выполнил анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

Желудкевич А.Л. выполнил исследования микроструктуры и магнитных свойств образцов Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub>.

### Authors' contribution

Hurski L.I. made a final approval of the manuscript for publication, carried out its editing and critical review in terms of significant intellectual content.

Kalanda N.A. realized a research concept and design, data analysis and interpretation, prepared the article for publication.

Yarmolich M.V. carried out a synthesis of the Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> samples by the solid–phase technique, realized the obtaining and treatment of experimental data concerning phase composition, analysis and interpretation of data.

Petrov A.V. realized a treatment of the obtained experimental results and preparation of the article for publication.

Golosov D.A. realized measurements of the structural properties of Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> samples by the X-ray diffraction technique.

Kirosirova M.V. carried out investigations of microstructure and element composition of Sr<sub>2</sub>FeMoO<sub>6-δ</sub> samples by means of SEM and EDX.

Ignatenko O.V. made the analysis and interpretation of the obtained data on the structure of the samples.

Zhaludkevich A.L. carried out investigations of microstructure and magnetic properties of the  $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$  samples.

#### Сведения об авторах

Гурский Л.И., член-кор. НАН Беларуси, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Центра 10.1 Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Каланда Н.А., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела криогенных исследований научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Ярмолич М.В., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Петров А.В., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник отдела криогенных исследований научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Голосов Д.А., к.т.н., доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Киросирова М.В., ведущий инженер государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл».

Игнатенко О.В., к.ф.-м.н., заместитель генерального директора, заведующий лабораторией физики высоких давлений и сверхтвердых материалов научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Желудкевич А.Л., научный сотрудник лаборатории физики высоких давлений и сверхтвердых материалов научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 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., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D.Sc., Professor, Main Researcher at the Centre 10.1 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalanda N.A., PhD, Leading Researcher at the Department of Cryogenic Research of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Yarmolich M.V., PhD, Senior Researcher at the Department of Cryogenic Research of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Petrov A.V., PhD, Senior Researcher at the Department of Cryogenic Research of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Golosov D.A., PhD, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kirosirova M.V., Leading Engineer at the State Centre "Belmikroanaliz" of the "Integral" Joint Stock Company.

Ignatenko O.V., PhD, Deputy General Director, Head of the Laboratory of High Pressure Physics and Superhard Materials of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

Zhaludkevich A.L., Researcher at the Laboratory of High Pressure Physics and Superhard Materials of the Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus.

#### Address for correspondence

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