



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-73-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 538.9: 539.2: 548.4

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТВЕРДОГО РАСТВОРА СТРОНЦИЙ-ЗАМЕЩЕННОГО ДВОЙНОГО ПЕРОВСКИТА

ГУРСКИЙ А.Л.¹, КАЛАНДА Н.А.², ЯРМОЛИЧ М.В.², БОБРИКОВ И.А.³,
СУМНИКОВ С.В.³, ПЕТРОВ А.В.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

²НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь

³Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна, Российская Федерация

Поступила в редакцию 18 июня 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Изучена кинетика модификации фазового состава твердого раствора в процессе кристаллизации $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ твердофазным методом из стехиометрической смеси простых оксидов $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$. В температурном диапазоне 300–1200 °С выявлен ряд эндотермических эффектов, при этом первый (с максимумом в районе 552 °С) и третий (с максимумом в районе 743 °С) из них сопровождаются существенным уменьшением массы образцов. В интервале температур 946–1200 °С изменение массы образца не наблюдается, в то время как тепловой эффект не исчезает и образец остается неоднородным. Это указывает на затрудненное протекание реакций с образованием соединения ферромолибдата бария–стронция в твердой фазе. Анализ фазового состава шихты, состоящей из смеси исходных реагентов стехиометрического состава $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$, показал, что при возрастании температуры вначале практически одновременно появляется ряд соединений BaMoO_4 , SrFeO_3 , а затем и $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$. Таким образом, соединения BaMoO_4 и SrFeO_3 можно считать структурообразующими для твердого раствора ферромолибдата бария–стронция. С последующим увеличением температуры до 770 °С возникает новое соединение BaFeO_3 и исчезает SrFeO_3 . При этом скорость возрастания количества двойного перовскита выше, чем молибдата бария. Основные сопутствующие соединения при кристаллизации твердого раствора двойного перовскита $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ – это BaMoO_4 и BaFeO_3 . Установлено, что в процессе синтеза твердого раствора ферромолибдата бария–стронция его состав, как и в случае использования других исходных соединений, изменяется от избытка железа в сторону преобладания содержания молибдена.

Ключевые слова: ферромолибдат бария–стронция, рентгено-фазовый анализ, термогравиметрический анализ, дифференциально-термический анализ, фазовый состав.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Ф18Д-009.

Для цитирования. Гурский А.Л., Каланда Н.А., Ярмолич М.В., Бобриков И.А., Сумников С.В., Петров А.В. Фазовые превращения при кристаллизации твердого раствора стронций-замещенного двойного перовскита. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 73–80.

PHASE TRANSFORMATIONS DURING CRYSTALLIZATION OF A SOLID SOLUTION OF STRONTIUM-SUBSTITUTED DOUBLE PEROVSKITE

ALEXANDER L. GURSKII¹, NIKOLAY A. KALANDA², MARTA V. YARMOLICH²,
IVAN A. BOBRIKOV³, SERGEY V. SUMNIKOV³, ALEXANDER V. PETROV²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

²Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

³I.M. Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russian Federation

Submitted 18 June 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The kinetics of phase contents modification in the process of SrBaFeMoO_{6-δ} crystallization from a stoichiometric mixture of SrCO₃ + BaCO₃ + 0,5Fe₂O₃ + MoO₃ simple oxides using the solid phase method has been investigated. In the temperature region of 300–1200 °C, a number of endothermic effects have been detected. Herewith, the first one (with maximum around 552 °C) and the third one (with maximum around 743 °C) are accompanying by the significant decrease of the mass of specimen. In the temperature range of 946–1200 °C, the mass change of specimen is practically not observable, while the thermal effect is still present, and the specimen remains not single-phase one. This indicates the difficulty of the flow of solid phase reactions with the formation of solid solution of barium-strontium ferromolybdate. During analysis of the change of the phase composition consisting of a mixture of initial reagents of stoichiometric relation SrCO₃ + BaCO₃ + 0,5Fe₂O₃ + MoO₃, it has been observed that with increasing temperature, complex compounds BaMoO₄, SrFeO₃ appear almost simultaneously, then SrBaFeMoO_{6-δ} appears consequently. Thus, the compounds BaMoO₄ и SrFeO₃, are structure forming for the solid solution of barium-strontium ferromolybdate. With further temperature increase up to 770 °C the formation of new compound BaFeO₃ with disappearing SrFeO₃ was detected. In this case, the amount of double perovskite increases faster than that of barium molybdate. The main accompanying compounds at the crystallization of the SrBaFeMoO_{6-δ} double perovskite solid solution are BaMoO₄ and SrFeO₃. It was established that at the initial stage of the interaction, the resulting solid solution of barium-strontium ferromolybdate is enriched with iron and its composition changes during the reaction in the direction of an increase of the molybdenum content, as in the case of other precursor combinations.

Keywords: barium-strontium ferromolybdate, X-ray phase analysis, thermogravimetric analysis, differential thermal analysis, phase composition.

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

Gratitude. This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, Project ФФ18D-009.

For citation. Gurskii A.L., Kalanda N.A., Yarmolich M.V., Bobrikov I.A., Sumnikov S.V., Petrov A.V. Phase transformations during crystallization of a solid solution of strontium-substituted double perovskite. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 73-80.

Введение

Перспективными материалами для применения в области спинтроники являются твердые растворы двойных перовскитов с общей формулой Sr_{2-x}Ba_xFeMoO_{6-δ}. Их отличительные свойства – высокая химическая стабильность в восстановительной атмосфере, большие (380–420 К) значения температуры Кюри, высокая (~100 %) степень спиновой поляризации электронов проводимости, низкие величины управляющих магнитных полей (B < 0,5 Тл) [1–3]. Интерес к исследованиям подобных материалов вызван рядом их магнитных и магнитотранспортных свойств. При этом значения важных для использования в микроэлектронике физических характеристик этих материалов, полученные разными

авторами, довольно сильно отличаются, что, по-видимому, связано с особенностями методик подготовки образцов [4–7].

Анализ литературных данных, полученных рядом авторов, выявил наличие нескольких стадий процесса кристаллизации $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$, что объясняется сложностью фазовых превращений, вялой кинетикой фазообразования и слабой подвижностью катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} [8–9]. Сообщалось о получении $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ механохимическим методом с последующим высокотемпературным синтезом в восстановительной газовой среде [10–12]. В то же время строгие корреляции, связывающие функциональные характеристики материалов с условиями их получения, не выявлены. Это означает, что синтез однофазного соединения $\text{Sr}_{2-x}\text{Ba}_x\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с воспроизводимыми физико-химическими свойствами требует детального анализа фазовых превращений, протекающих в шихте, в зависимости от ее состава, и изучения кинетики изменения фазового состава двойного перовскита при его кристаллизации. Поэтому в последнее время интенсивно изучаются последовательности фазовых превращений при кристаллизации двойных перовскитов [7, 11]. Особый интерес представляет изучение высокотемпературных фазовых превращений и определение состава промежуточных кристаллических фаз при синтезе $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$. Цель настоящей статьи – выявление корреляций между температурой фазовых превращений и фазовым составом ферромолибдата бария-стронция при его синтезе из соединений SrCO_3 , BaCO_3 , Fe_2O_3 , MoO_3 , что важно для осуществления управляемого изменения фазового состава синтезируемой керамики с воспроизводимыми физико-химическими свойствами.

Методика проведения эксперимента

В качестве исходных реагентов для синтеза $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ использовались реактивы SrCO_3 , BaCO_3 , Fe_2O_3 , MoO_3 . Вначале стехиометрическая смесь исходных реагентов перемешивалась и измельчалась в течение 15 ч в шаровой мельнице с добавлением этилового спирта. Полученный порошок затем был спрессован в таблетки диаметром 10 мм, толщиной 4–5 мм. Отжиг проводился в политермическом режиме в интервале температур от 300 до 1200 °С в потоке аргона, скорости нагрева составляли 0,7, 1,4 и 2,5 град/мин, после чего следовала закалка при комнатной температуре.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на установке ДРОН–3 с применением CuK_α -излучения при комнатной температуре, с угловой скоростью съемки 60 град/ч. Количественный фазовый анализ продуктов твердофазного синтеза осуществлялся по данным РФА с использованием программного комплекса PowderCell, FullProf методом Ритвельда.

Дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический (ТГА) анализы образцов проводились на установке Setaram Labsys TG–DSC16 в вышеуказанном интервале температур при нагреве образцов в потоке аргона со скоростью 1,4 град/мин.

Результаты и их обсуждение

Согласно данным дифференциально-термического анализа установлено, что при нагреве образца, состоящего из исходных реагентов в стехиометрическом соотношении $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$, от 30 до 180 °С практически не происходит никаких изменений на кривых ДТА (рис. 1, а). Тем не менее, согласно данным ТГА, наблюдается незначительное уменьшение его массы ($\Delta m/m_0 < 2\%$), что объясняется наличием химических процессов в шихте, связанных с выделением газообразных продуктов реакции. При нагреве до более высоких температур тепловые процессы интенсифицируются, и в температурном диапазоне 300–1200 °С можно выделить пять эндотермических эффектов (рис. 1, а). Первый эндотермический эффект, с минимумом производной при $T = 552$ °С, вызван, как показывают данные ТГА (рис. 1, б), существенным ($\Delta m/m_0 \sim 8\%$) уменьшением массы образца, наиболее вероятной причиной чего является выделение газообразных продуктов реакции CO_2 и O_2 на данной стадии процесса.

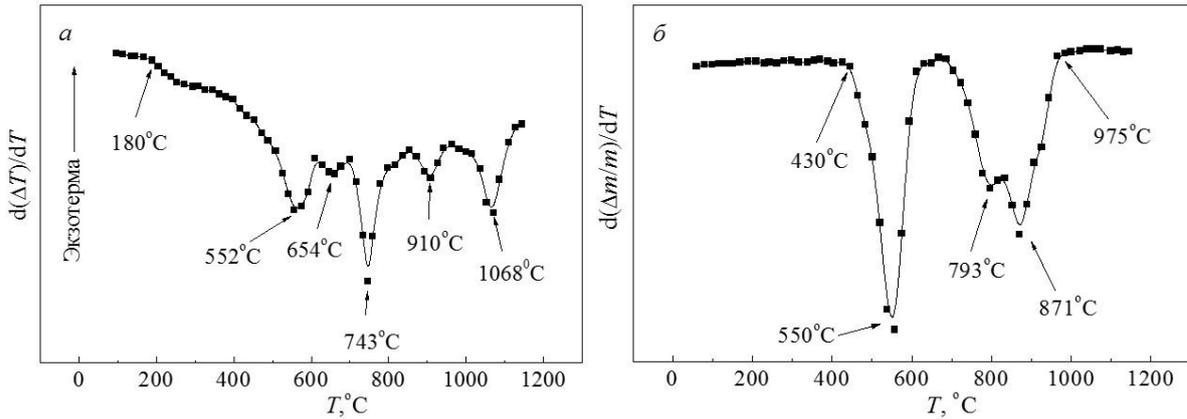


Рис. 1. Температурные зависимости производной тепловых эффектов (а) и скорости изменения нормированной массы (б) смеси порошка $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$, отожженного в непрерывном потоке аргона при скорости нагрева 1,4 град/мин

Fig. 1. Temperature dependencies of the derivative of thermal effects (a) and of the rate of change of the normalized mass (b) of the mixture of $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$ powder annealed in a continuous argon flow at the heating rate of 1.4 deg/min

На справедливость данного предположения указывают данные РФА (рис. 2). Так, в области проявления первого эндотермического эффекта происходит кристаллизация соединения BaMoO_4 в системе $\text{BaCO}_3\text{--MoO}_3$, протекающая с выделением углекислого газа согласно уравнению реакции



Резкое увеличение скорости уменьшения массы образца в интервале температур 480–600 °С (рис. 1, б) указывает на протекание параллельных химических процессов, имеющих различное количество выделяемых и поглощаемых газообразных продуктов реакции. Анализ фазового состава образца показал появление феррита стронция в интервале температур $180 < T \leq 470$ °С и твердого раствора $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ в интервале температур $470 < T \leq 590$ °С (рис. 2, а, б). При этом феррит стронция образуется в соответствии с уравнением реакции (2). Образование твердого раствора ферромолибдата бария стронция реализуется согласно уравнению реакции (3):



Обычно в тройной смеси в реакцию с карбонатом бария оксид молибдена вступает несколько быстрее, чем оксид железа. Исключением является область температур в районе 590 °С, где появление рентгеновских рефлексов соединений SrFeO_3 и $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ наблюдается практически одновременно (рис. 2, б).

Второй незначительный эндотермический эффект в смеси исходных реагентов $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$ с минимумом при $T = 654$ °С практически не сопровождается изменением массы шихты и, соответственно, выделением газообразных продуктов реакций (рис. 1, б). Согласно данным РФА существенных изменений фазового состава образцов не обнаружено (рис. 2, б, в). В температурном интервале существования третьего эндотермического эффекта в смеси исходных реагентов $\text{SrCO}_3 + \text{BaCO}_3 + 0,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MoO}_3$ с минимумом при $T = 770$ °С наблюдается резкое увеличение потери массы образцом (рис. 1, б). При этом количество двойного перовскита возрастает быстрее, чем молибдата бария.

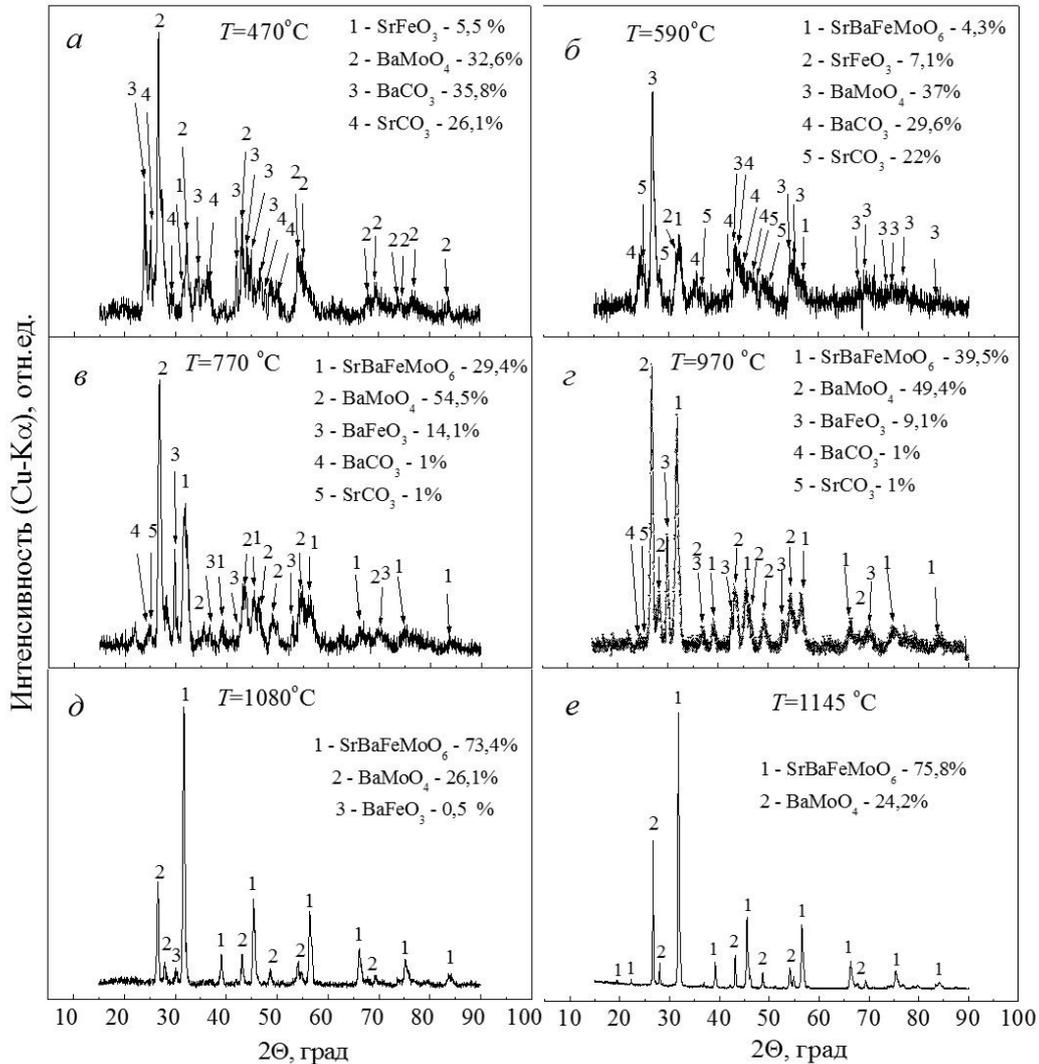
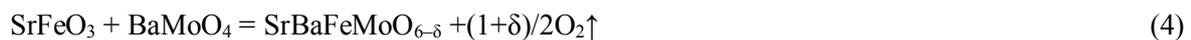


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов, синтезированных в непрерывном потоке аргона при скорости нагрева 1,4 град/мин до температур: 470 °С (а), 590 °С (б), 770 °С (в), 970 °С (г), 1080 °С (д), 1145 °С (е) и закаленных при комнатной температуре

Fig. 2. X-ray diffractograms of samples synthesized in a continuous flow of argon at a heating rate of 1.4 deg/min up to the temperatures: 470 °С (а), 590 °С (б), 770 °С (в), 970 °С (г), 1080 °С (д), 1145 °С (е) and hardened at room temperature

Исходя из того, что при $T = 770\text{ °C}$ в составе шихты соединение SrFeO_3 отсутствует, а концентрация твердого раствора $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ возрастает (рис. 2, в), можно заключить, что эндотермический эффект обусловлен протеканием следующей химической реакции с выделением кислорода:



Из уравнения (4) следует, что активным центром появления зародышей новой фазы $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ является поверхность стронциевого феррита, на которой происходит процесс диссоциации с исчезновением SrFeO_3 во время роста $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$. Обнаружено, что при данной температуре соединения SrFeO_3 , SrCO_3 и BaCO_3 практически исчезают, а фаза BaFeO_3 появляется (рис. 2, в). При этом количество BaMoO_4 увеличивается и достигает 54,5 % от общего фазового состава образца, что указывает на дальнейшее протекание химических процессов согласно уравнению (1). На основании вышеизложенного, образование феррита бария можно представить в следующем виде:



Наиболее вероятно, что образующийся согласно уравнению (5) оксид стронция растворяется в матрице ферромolibдата бария-стронция, поскольку никаких других соединений при температурах $T \geq 770$ °С не образуется (рис. 2, в).

При дальнейшем росте температуры наблюдается незначительный четвертый эндотермический эффект с минимумом при $T = 910$ °С. В этом случае в закаленном образце при $T = 970$ °С установлено небольшое увеличение фазы $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ и уменьшение содержания фаз BaMoO_4 и BaFeO_3 , что указывает на отсутствие протекания химических процессов согласно уравнениям (1), (4) и (5) (рис. 1, б, 2, з).

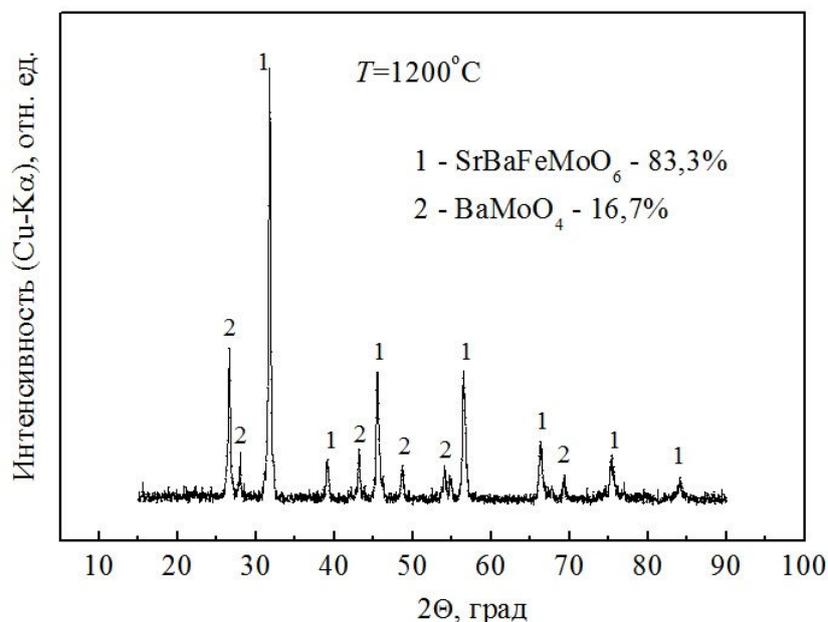


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образцов, синтезированных в непрерывном потоке аргона при скорости нагрева 1,4 град/мин до температуры 1200 °С

Fig. 3. X-ray diffractogram of samples synthesized in a continuous flow of argon at a heating rate of 1.4 deg/min to a temperature of 1200 °С

Дальнейший рост температуры до $T = 1080$ °С в области существования пятого эндотермического эффекта вызывает значительное уменьшение основного рефлекса фазы BaFeO_3 , что соответствует ее содержанию в образце не более 0,5 % (рис. 1, б, 2, д). В этом случае граница раздела твердых фаз, между которыми происходит взаимная диффузия химических элементов, смещается в глубину промежуточной фазы BaMoO_4 . Снижение скорости роста $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ при величинах степени превращения $\alpha \geq 70$ % вызвано ростом толщины границы раздела твердых фаз. Так как образованный слой продукта обладает низкой подвижностью катионов и анионов, то гетерогенная реакция переходит из адсорбционно-химического в диффузионный режим, что соответствует результатам, изложенным выше. Образцы, нагретые до температур 1145 и 1200 °С, согласно данным РФА качественно одинаковы, однако различаются количественно по составу. Так, количественное соотношение фаз образца, нагретого до $T = 1145$ °С, составляет: $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ – 75,8 %, BaMoO_4 – 24,2 % (рис. 2, е). Последующее увеличение температуры до 1200 °С вызывает изменение фазового состава образцов в сторону увеличения содержания $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ до значения 83,3 % и соответственно уменьшения содержания BaMoO_4 до 16,7 % (рис. 3).

В интервале температур 946–1200 °С изменение массы образца практически не происходит, в то время как присутствует тепловой эффект и образец остается не однофазным (рис. 1–3). Это указывает на затруднение протекания твердофазных реакций с образованием твердого раствора $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования последовательности фазовых превращений в процессе кристаллизации материала состава $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ твердофазным методом из стехиометрической смеси соединений SrCO_3 , BaCO_3 , Fe_2O_3 , MoO_3 установлено, что синтез материала в данном случае протекает с образованием промежуточных соединений BaMoO_4 и SrFeO_3 . При увеличении температуры до 770°C образуется новое соединение BaFeO_3 с одновременным исчезновением SrFeO_3 . Установлено, что на начальном этапе взаимодействия образующийся твердый раствор ферромолибдата бария-стронция обогащен железом и его состав в ходе реакции меняется в сторону увеличения содержания молибдена. Результаты анализа свидетельствуют о затрудненном характере протекания твердофазных реакций при образовании $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$.

Список литературы/References

1. Serrate D., De Teresa J. M., Algarabel P. A., Marquina C., Blasco J., Ibarra M. R., Galibert J. Magnetoelastic coupling in $\text{Sr}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{Cr}_x)\text{ReO}_6$ double perovskites. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2007;19:436226. DOI: 10.1088/0953-8984/19/43/436226.
2. Pandey V., Verma V., Aloysius R. P., Bhalla G. L., Awana V. P. S., Kishan H., Kotnala R. K. Magnetic and magneto-transport properties of double perovskite $\text{Ba}_{2-x}\text{Sr}_x\text{FeMoO}_6$ system. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2009;321(14):2239-2244. DOI: 10.1016/j.jmmm.2009.01.032.
3. Kanchana V., Vaitheeswaran G., Alouani M., Delin A. Electronic structure and x-ray magnetic circular dichroism of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$: Ab initio calculations. *Physical Review B*. 2007;75(22):220404(R). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.220404.
4. Douvalis A.P., Venkatesan M., Velasco P., Fitzgerald C.B., Coey J.M.D. Combustion synthesis of the magnetoresistive double perovskite $(\text{Ba}_{1.6}\text{Sr}_{0.4})\text{FeMoO}_6$. *Journal of Applied Physics*. 2003;93(10):8071-8073. DOI: 10.1063/1.1544452.
5. Serrate D., De Teresa J.M., Algarabel P.A., Ibarra M.R., Galibert J. Intergrain magnetoresistance up to 50 T in the half-metallic $(\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2})_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite: Spin-glass behavior of the grain boundary. *Physical Review B*. 2005;71:104409. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.104409.
6. Hemery E.K., Williams G.V.M., Trodahl H.J. Isoelectronic and electronic doping in $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007;310:1958-1960. DOI: 10.1016/j.jmmm.2006.10.869.
7. Feng X.M., Rao G.H., Liu G.Y., Liu W.F., Ouyang Z.W., Liang, J.K. Enhancement of Curie temperature and room-temperature magnetoresistance in double perovskite $(\text{Sr}_{1.6}\text{Ba}_{0.4})\text{FeMoO}_6$. *Solid State Communications*. 2004;129:753-755. DOI: 10.1016/j.ssc.2003.11.011.
8. Fang T.T., Wu M.S., Ko T.F. On the formation of double perovskite $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$. *Journal of Materials Science Letters*. 2001;20:1609-1610. DOI: 10.1023/A:1017985423563.
9. Kalanda N., Demyanov S., Masselink W., Mogilatenko A., Chashnikova M., Sobolev N., Fedosenko O. Interplay between phase formation mechanisms and magnetism in the $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ metal-oxide compound. *Crystal Research and Technology*. 2011;46(5):463-469. DOI: 10.1002/crat.201000213.
10. Hemery E.K., Williams G.V.M., Trodahl H. J. The effect of the preparation method and grain morphology on the physical properties of A_2FeMoO_6 (A= Sr, Ba). *Current Applied Physics*. 2006;6:312-315. DOI: 10.1016/j.cap.2005.11.007.
11. Fang T.T., Lin J.C. Formation kinetics of $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ double perovskite. *Journal of Materials Science*. 2005; 40:683-686. DOI: 10.1007/s10853-005-6307-8.
12. Kotnala R.K., Pandey V., Arora M., Verma V., Aloysius R.P., Malik A., Bhalla G.L. Identifying the contribution of band filling effects in the double perovskite system $\text{Sr}_{0.4}\text{Ba}_{1.6}\text{FeMoO}_6$. *Solid State Communications*. 2011;151:415-419. DOI: 10.1016/j.ssc.2010.11.004.

Вклад авторов

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

Каланда Н.А. отвечал за замысел и дизайн исследования, провел анализ и интерпретацию данных, подготовил статью к публикации.

Ярмолич М.В. осуществила синтез образцов $\text{SrBaFeMoO}_{6-\delta}$ твердофазным методом, сбор и обработку экспериментальных данных в части режимов кристаллизации, анализ и интерпретацию полученных данных.

Бобриков И.А. провел дифференциально-термического анализ, интерпретацию полученных данных.

Сумников С.В. провел термогравиметрический анализ, интерпретацию полученных данных.

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

Authors contribution

Gurskii A.L. completed editing and final approval of the manuscript for publication, its critical review in terms of significant intellectual content.

Kalanda N.A. was responsible for the design and design of the study, conducted analysis and interpretation of the data, and prepared articles for publication.

Yarmolich M.V. carried out the synthesis of SrBaFeMoO₆ – δ samples by the solid-phase method, collecting and processing experimental data regarding crystallization modes, analysis and interpretation of the data obtained.

Bobrikov I.A. conducted differential thermal analysis, interpretation of the data.

Sumnikov S.V. conducted a thermogravimetric analysis, interpretation of the data.

Petrov A.V. performed data processing, editing and registration of articles for publication.

Сведения об авторах

Гурский А.Л., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры защиты информации 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).

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

Information about the authors

Gurskii A.L., D.Sci, Professor, Professor of the Department of Information Security of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kalanda N.A., PhD, Leading Researcher of the Department of Cryogenic Research of SSPA “Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus”.

Yarmolich M.V., PhD, Senior Researcher of the department of cryogenic research of the SSPA “Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus”.

Bobrikov I.A., PhD, Senior Researcher of I.M. Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia).

Petrov A.V., PhD, Senior Researcher of the Department of Cryogenic Research of the SSPA “Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus”.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-23-17;
e-mail: gurskii@bsuir.by
Гурский Александр Леонидович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-23-17;
e-mail: gurskii@bsuir.by
Gurskii Alexander Leonidovich