

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 538.911
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-4-397-403>

Поступило в редакцию 26.05.2022
Received 26.05.2022

**Д. В. Желудкевич¹, С. И. Латушко¹, М. В. Силибин², А. Н. Чобот¹, А. В. Сыса²,
К. Н. Неклюдов², Г. М. Чобот³, Д. В. Карпинский¹**

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

²Национальный исследовательский университет электронной техники «МИЭТ»,
Зеленоград, Российская Федерация

³Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА
СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$**

(Представлено членом-корреспондентом В. М. Федосюком)

Аннотация. Кристаллическая структура системы твердых растворов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ ($0 \leq x \leq 1$; $0,2 \leq y \leq 0,4$) определена на основании данных, полученных методом дифракции рентгеновского излучения, а также результатов сканирующей электронной микроскопии. Полученные результаты позволили уточнить концентрационные области однофазного структурного состояния, а также области сосуществования двух структурных фаз в исследуемой системе. Показано, что увеличение концентрации ионов-заместителей приводит к уменьшению ромбоэдрических искажений. Структуру составов с $y = 0,25-0,33$ можно уточнить, предполагая сосуществование ромбоэдрической и псевдокубической фаз. Дальнейшее замещение приводит к трансформации структуры, она становится однофазной с кубической симметрией. Расщепление рефлексов, характеризующих ромбоэдрическую фазу, полностью исчезает для составов с $y = 0,35; 0,40$. Особое внимание уделено анализу структуры твердых растворов в области концентрационного фазового перехода. Определена эволюция морфологии кристаллитов в зависимости от типа структурных искажений и концентрации ионов стронция.

Ключевые слова: твердые растворы, мультиферроики, рентгеновская дифракция, структурные фазовые переходы, ионы-заместители

Для цитирования. Кристаллическая структура системы твердых растворов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ / Д. В. Желудкевич [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 397–403. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-4-397-403>

**Dmitry V. Zheludkevich¹, Sergei I. Latushko¹, Maxim V. Silibin², Aleksandra N. Chobot¹,
Artem V. Sysa², Kapiton N. Neklyudov², Gennadii M. Chobot³, Dmitry V. Karpinsky¹**

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

²National Research University of Electronic Technology “MIET”, Zelenograd, Russian Federation

³Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

CRYSTAL STRUCTURE OF THE SYSTEM OF $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ SOLID SOLUTIONS

(Communicated by Corresponding Member Valery M. Fedosuyk)

Abstract. The crystal structure of the system of $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ ($0 \leq x \leq 1$; $0,2 \leq y \leq 0,4$) solid solutions was studied based on the X-ray diffraction data and the scanning electron microscopy results. The obtained results have allowed determining the concentration ranges of a single-phase structural state, as well as the regions of coexistence of two structure phases. It is shown that an increase in the concentration of the dopant ions leads to a decrease in rhombohedral distortions. The structure of the compounds with $y = 0,25-0,33$ is characterized by the coexistence of the rhombohedral and pseudocubic phases. Further chemical doping leads to the transformation of the structure; it becomes single-phase and has a cubic symmetry.

Splitting of the reflections specific to the rhombohedral phase completely disappears for the compounds with $y = 0.35; 0.40$. Particular attention is paid to the analysis of the structure of solid solutions in the region of the concentration phase transition. The evolution of crystallite morphology was determined as a function of the type of structure distortions and dopants concentration.

Keywords: solid solutions, multiferroics, X-ray diffraction, structural phase transitions, dopant ions

For citation. Zheludkevich D. V., Latushko S. I., Silibin M. V., Chobot A. N., Syta A. V., Neklyudov K. N., Chobot G. M., Karpinsky D. V. Crystal structure of the system of $(1-y)(\text{BiFeO}_3)-y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ solid solution. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 4, pp. 397–403 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-4-397-403>

Введение. Материалы, относящиеся к классу мультиферроиков, в последнее десятилетие являются предметом повышенного интереса исследователей. Возможность управления свойствами материалов благодаря тесной связи между электрической и магнитной подсистемами увеличивает степень свободы при создании новых материалов и открывает широкие перспективы их практического использования. Мультиферроики находят применение при производстве элементов памяти, в устройствах, основанных на ферромагнитном резонансе, благодаря наличию в них нескольких типов ферро-упорядочения.

Одним из наиболее перспективных мультиферроиков является феррит висмута (BiFeO_3), для которого характерны переходы в магнитоупорядоченное и сегнетоэлектрическое состояния при температурах значительно выше комнатной (температура Нееля $T_N \sim 650$ К, температура Кюри $T_C \sim 1100$ К) [1–8]. Известно, что химическое замещение ионов висмута и железа позволяет модифицировать кристаллическую структуру соединений и тем самым изменять их физические свойства. Ограниченный выбор материалов с несколькими типами ферро-упорядочений обусловлен невозможностью одновременного сосуществования сильного дипольного и магнитного упорядочений в оксидах переходных металлов. Величина магнитоэлектрического эффекта в однофазных мультиферроиках вблизи комнатной температуры быстро уменьшается при повышении температуры. Значение магнитоэлектрического сигнала может быть увеличено путем синтеза составов, в качестве компонентов которых используются электро- и магнитоэлектрические материалы. Так, материалы на основе феррита висмута с сегнетоэлектрическими компонентами (Co, Mg, Ni) Fe_2O_4 и BaTiO_3 характеризуются значительным магнитоэлектрическим взаимодействием [9]. Предварительно установлено, что синтез электрострикционных и магнитоэлектрических материалов в комбинации с ферритом висмута, полученных золь-гель методом, представляет собой эффективный метод производства наноразмерных магнитоэлектрических композитов. Свойства таких материалов в значительной степени обуславливаются феноменом перколяции, который предполагает аномальное изменение электрических свойств состава вблизи границы взаимопроникновения фаз [10]. Хорошо известно, что граница перколяции смещается в сторону увеличения с уменьшением размера зерен составов.

В настоящей работе исследованы структурные фазовые переходы в системе твердых растворов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)-y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ ($0 \leq x \leq 1, 0,2 \leq y \leq 0,4$) в зависимости от концентрации ионов-заместителей, определен оптимальный химический состав и соотношение магнитоактивной и сегнетоэлектрической подсистем в твердых растворах на основе феррита висмута, что позволяет получить материалы с высокими значениями магнитоэлектрического взаимодействия.

Материалы и методы исследования. Составы $(1-y)(\text{BiFeO}_3)-y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ были получены золь-гель методом с использованием исходных реагентов $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{O}_4\text{Ti}$, $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$. Изначально лимонная кислота растворялась в дистиллированной воде в соотношении 1 : 3, затем к раствору добавлялся изопропоксид титана и температура подогревающей пластины доводилась до 90 °С. На следующем этапе к вышеуказанному раствору добавляли $\text{Ti}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ и $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Перед добавлением нитрата висмута значение pH реакционной смеси доводили до 1 путем добавления азотной кислоты (HNO_3) с целью избежать образования осадков нерастворимого оксинитрата висмута BiONO_3 . Далее к прозрачному раствору добавляли $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ (соотношение общего количества ионов металла и этиленгликоля составляло 1 : 10) и смесь гомогенизировали при 90 °С в течение 1,5 ч. Полученный гель сушили 12 ч при 180 °С, а порошок растирали в ступке и отжигали при 1000 °С.

Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометрах ДРОН-3 и ДРОН-3 М в Cu-K_α - и Cu-K_β -излучениях при комнатной температуре. Для отсекающей K_β -компоненты рентгеновского излучения использовался графитовый монохроматор. Шаг сканирования составлял не более $0,03^\circ$, время экспозиции – не менее 5 с. Фиксация данных производилась автоматически. Отсутствие примесей подтверждено исследованиями фазовой чистоты составов, проведенными методом дифракции рентгеновского излучения. Анализ дифракционных данных проводился методом полнопрофильного анализа Ритвельда. Для уточнения спектров использовался программный комплекс FullProf [11]. Исследование морфологии образцов было проведено с помощью метода сканирующей электронной микроскопии на электронном микроскопе TESCAN VAGA 3.

Результаты и их обсуждение. На основании данных, полученных методом дифракции рентгеновского излучения, определена кристаллическая структура системы твердых растворов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ ($x = 0,25-1,0$; $y = 0,2-0,4$), что позволило проследить эволюцию кристаллической структуры этой системы в зависимости от концентрации ионов-заместителей.

Рентгенограммы, полученные для составов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ с $x = 0$; $y \leq 0,2$, характеризуются однофазной ромбоэдрической структурой (рис. 1). Увеличение концентрации ионов-заместителей приводит к уменьшению ромбоэдрических искажений. Структуру составов с $y = 0,25-0,33$ можно уточнить, предполагая сосуществование ромбоэдрической и псевдокубической фаз. Дальнейшее замещение приводит к трансформации структуры, она становится однофазной с кубической симметрией.

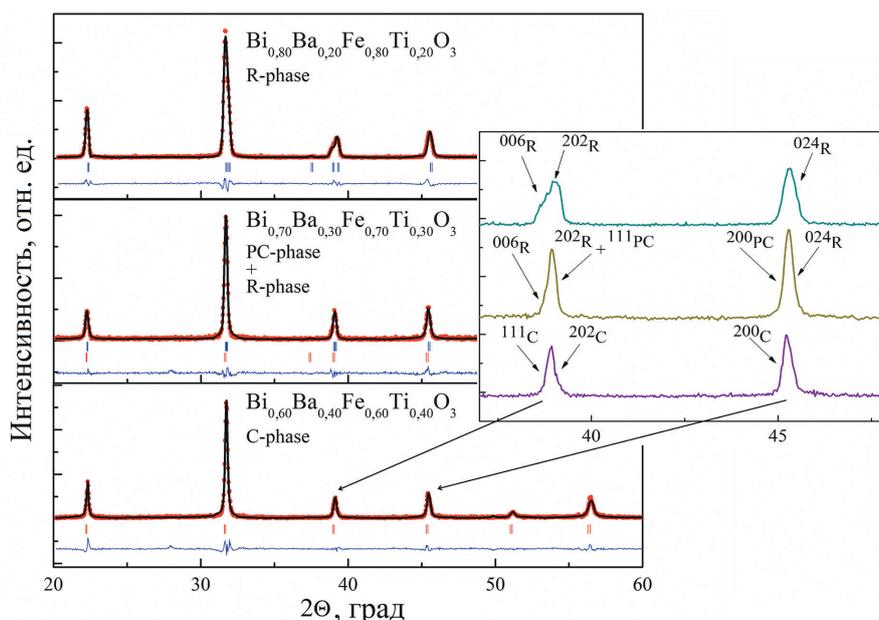


Рис. 1. Рентгенограммы составов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ с $x = 0$; $y = 0,2-0,4$ при комнатной температуре (на вставке указана эволюция выбранных дифракционных рефлексов для твердых растворов с разным химическим составом)

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of the compounds $(1-y)(\text{BiFeO}_3)_y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ with $x = 0$; $y = 0.2-0.4$ at room temperature (the inset shows an evolution of the selected diffraction reflections as a function of the dopants concentration)

Следует отметить, что псевдокубическая фаза наблюдается в составах $0,25 < y < 0,40$. Химическое замещение вызывает постепенное уменьшение объемной доли искажения ромбоэдрической элементарной ячейки. Об этом свидетельствует эволюция рефлекса $(113)R$ (рис. 1), связанного с искажением кислородных октаэдров в плоскости ab ромбоэдрической решетки. Интенсивность рефлекса постепенно уменьшается с увеличением значений y и практически исчезает для состава с $y = 0,2$. Расщепление рефлексов $(202)R$ и $(006)R$ ($2\theta = 39^\circ$), характеризующих ромбоэдрическую фазу, постепенно уменьшается с увеличением концентрации ионов-заместителей. Уменьшение расщепления обусловлено постепенным уменьшением вытянутости ромбоэдрической решетки.

Это расщепление полностью исчезает для составов с $y = 0,35; 0,40$, что также подтверждает отсутствие в составах ромбоэдрической фазы.

Таким образом, увеличение концентрации ионов Sr приводит к искажению ромбоэдрической элементарной ячейки и переходу в однофазное кубическое состояние. Как видно из рис. 2, с ростом концентрации Sr наблюдается уменьшение значений параметра a и величины объема элементарной ячейки v (от $62,61 \text{ \AA}^3$ для состава с $x = 0,25$ до $61,22 \text{ \AA}^3$ для состава с $x = 1,0$). Такое изменение параметров связано с замещением ионов Ba с радиусом ($1,35 \text{ \AA}$) на ионы Sr с меньшим ионным радиусом ($1,18 \text{ \AA}$).

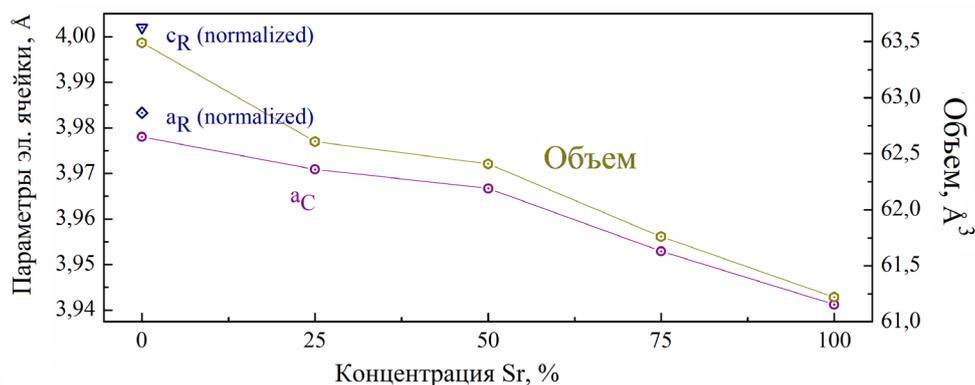


Рис. 2. Параметры элементарной ячейки для составов $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$

Fig. 2. The unit cell parameters for compounds $0.7(\text{BiFeO}_3)-0.3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$

На рис. 3 представлены дифрактограммы образцов $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ с $0,25 \leq x \leq 1,0$. Анализ дифрактограмм указывает на незначительные структурные изменения для составов с концентрациями $x < 0,75$. Рефлекс в области $\theta = 32^\circ$ для состава с концентрацией $x = 1,0$ имеет несимметричный профиль, что свидетельствует о наличии ромбоэдрических искажений.

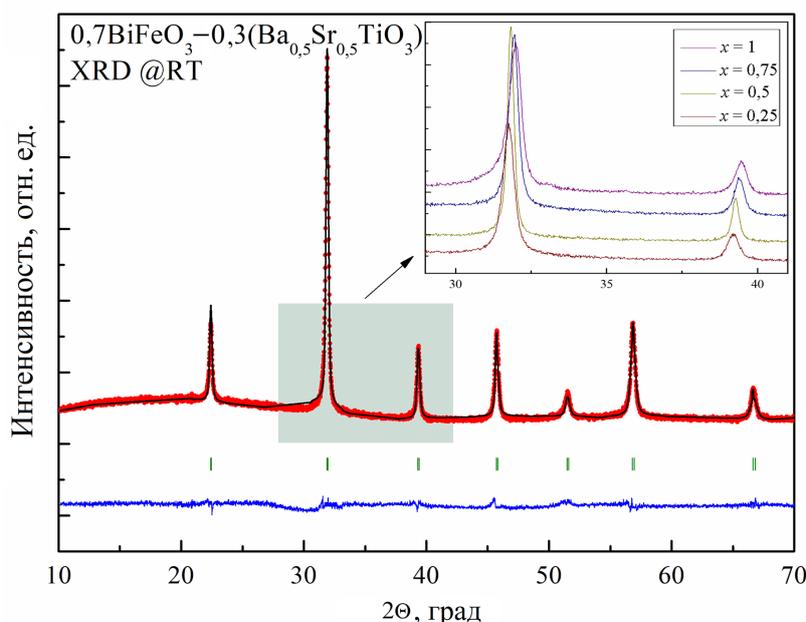


Рис. 3. Рентгенограммы, полученные для составов $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ при комнатной температуре.

На вставке показана эволюция дифракционных пиков для составов $0,25 \leq x \leq 1,0$

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the compounds $0.7(\text{BiFeO}_3)-0.3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ at room temperature.

The inset shows the evolution of diffraction reflections for the compounds with $0.25 \leq x \leq 1.0$

Морфология поверхности образцов $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ была исследована методом сканирующей электронной микроскопии. Исследуемые составы состоят из агломерированных сферических кристаллитов размером менее 100 нм. СЭМ-изображения составов $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ показаны на рис. 4. Следует отметить, что исходный состав $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{BaTiO}_3)$ имеет схожую микроструктуру с составами, содержащими ионы стронция. Для данного состава характерны сферические и пластинчатые частицы размером 70–100 нм.

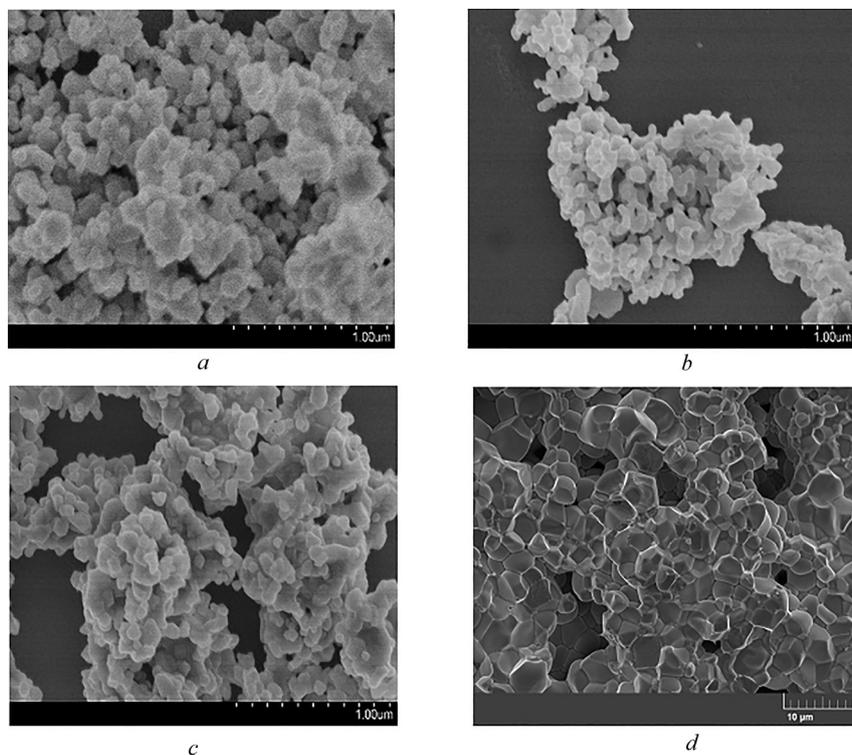


Рис. 4. СЭМ-изображения составов $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$: *a*) $x = 0$; *b*) $x = 0,1$; *c*) $x = 0,5$; *d*) $x = 1,0$

Fig. 4. SEM images of the compounds $0,7(\text{BiFeO}_3)-0,3(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$: *a*) $x = 0$; *b*) $x = 0,1$; *c*) $x = 0,5$; *d*) $x = 1,0$

Форма кристаллитов составов с $0,25 \leq x \leq 1$ практически не изменялась с увеличением концентрации ионов-заместителей. При этом происходило уменьшение среднего размера кристаллитов и уменьшение параметров элементарной ячейки, что подтверждается рентгеноструктурными данными.

Заключение. Проведено исследование кристаллической структуры системы твердых растворов $(1-y)(\text{BiFeO}_3)-y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ методом дифракции рентгеновского излучения, а также сканирующей электронной микроскопии. Показано, что составы $(1-y)(\text{BiFeO}_3)-y(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3)$ с концентрацией $x = 0$ и $y \leq 0,2$ характеризуются однофазной ромбоэдрической структурой. Увеличение концентрации ионов-заместителей приводит к уменьшению ромбоэдрических искажений, а структуру составов с $0,25 \leq y \leq 0,33$ можно уточнить, предполагая сосуществование ромбоэдрической и псевдокубической фаз. Расщепление рефлексов, характеризующих ромбоэдрическую фазу, постепенно уменьшается с увеличением концентрации ионов-заместителей. Уменьшение расщепления обусловлено постепенным уменьшением вытянутости ромбоэдрической решетки. Это расщепление полностью исчезает для составов с $y = 0,35; 0,40$, что также подтверждает отсутствие в составах ромбоэдрической фазы. Дальнейшее замещение приводит к трансформации структуры, она становится однофазной с кубической симметрией.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-58-04003Бел_мол_а) и БРФФИ (проект № Ф21PM-018).

Acknowledgements. The work is supported by the RFBR (project № 20-58-04003Бел_мол_а) and BRFFR (project № Ф21PM-018).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Phase stability and structural temperature dependence in powdered multiferroic BiFeO₃ / R. Haumont [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2008. – Vol. 78, N 13. – Art. 134108. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.134108>
2. Structural and electrical characteristics of potential candidate lead-free BiFeO₃–BaTiO₃ piezoelectric ceramics / S. Kim [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 122, N 16. – P. 164105. <https://doi.org/10.1063/1.4999375>
3. Temperature and Composition-Induced Structural Transitions in Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO₃ ceramics / D. V. Karpinsky [et al.] // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2014. – Vol. 97, N 8. – P. 2631–2638. <https://doi.org/10.1111/jace.12978>
4. The β-to-γ Transition in BiFeO₃: A Powder Neutron Diffraction Study / D. C. Arnold [et al.] // *Adv. Funct. Mater.* – 2010. – Vol. 20, N 13. – P. 2116–2123. <https://doi.org/10.1002/adfm.201000118>
5. Temperature-dependent structural and spectroscopic studies of (Bi_{1-x}Fe_x)FeO₃ / A. Kirsch [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. – 2018. – Vol. 122, N 49. – P. 28280–28291. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b05740>
6. Catalan, G. Physics and Applications of Bismuth Ferrite / G. Catalan, J. F. Scott // *Adv. Mater.* – 2009. – Vol. 21, N 24. – P. 2463–2485. <https://doi.org/10.1002/adma.200802849>
7. The Ferroic Phase Transitions of BiFeO₃ / S. M. Selbach [et al.] // *Adv. Mater.* – 2008. – Vol. 20, N 19. – P. 3692–3696. <https://doi.org/10.1002/adma.200800218>
8. Structural Stability and Magnetic Properties of Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO₃ Solid Solutions / D. V. Karpinsky [et al.] // *Solid State Communications*. – 2011. – Vol. 151, N 22. – P. 1686–1689. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2011.08.002>
9. Integration of sputter-deposited multiferroic CoFe₂O₄–BiFeO₃ nanocomposites on conductive La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ electrodes / S. H. Lee [et al.] // *Nanotechnology*. – 2019. – Vol. 30, N 10. – P. 105601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaf7cd>
10. Priya, A. S. Investigation of multiferroic properties of doped BiFeO₃–BaTiO₃ composite ceramics / A. S. Priya, I. B. Shameem Banu, S. Anwar // *Mater. Lett.* – 2015. – Vol. 142. – P. 42–44. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.111>
11. Rodríguez-Carvajal, J. R. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction / J. R. Rodríguez-Carvajal // *Physica B: Condensed Matter*. – 1993. – Vol. 192, N 1–2. – P. 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-i](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-i)

References

1. Haumont R., Kornev I. A., Lisenkov S., Bellaiche L., Kreisel J., Dkhil B. Phase stability and structural temperature dependence in powdered multiferroic BiFeO₃. *Physical Review B*, 2008, vol. 78, no. 13, art. 134108. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.134108>
2. Kim S., Khanal G. P., Nam H.-W., Fujii I., Ueno S., Moriyoshi C., Kuroiwa Y., Wada S. Structural and electrical characteristics of potential candidate lead-free BiFeO₃–BaTiO₃ piezoelectric ceramics. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 122, no. 16, pp. 164105. <https://doi.org/10.1063/1.4999375>
3. Karpinsky D. V., Troyanchuk I. O., Tovar M., Sikolenko V., Efimov V., Efimova E., Shur V. Ya., Kholkin A. L. Temperature and Composition-Induced Structural Transitions in Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO₃ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, vol. 97, no. 8, pp. 2631–2638. <https://doi.org/10.1111/jace.12978>
4. Arnold D. C., Knight K. S., Catalan G., Redfern S. A., Scott J. F., Lightfoot P., Morrison F. D., The β-to-γ Transition in BiFeO₃: A Powder Neutron Diffraction Study. *Advanced Functional Materials*, 2010, vol. 20, no. 13, pp. 2116–2123. <https://doi.org/10.1002/adfm.201000118>
5. Kirsch A., Murshed M. M., Kirkhame M. J., Huq A., Litterst F. J., Gesing T. M. Temperature-dependent structural and spectroscopic studies of (Bi_{1-x}Fe_x)FeO₃. *Journal of Physical Chemistry C*, 2018, vol. 122, no. 49, pp. 28280–28291. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b05740>
6. Catalan G., Scott J. F. Physics and Applications of Bismuth Ferrite. *Advanced Materials*, 2009, vol. 21, no. 24, pp. 2463–2485. <https://doi.org/10.1002/adma.200802849>
7. Selbach S. M., Tybell T., Einarsrud M. A., Grande T. The Ferroic Phase Transitions of BiFeO₃. *Advanced Materials*, 2008, vol. 20, no. 19, pp. 3692–3696. <https://doi.org/10.1002/adma.200800218>
8. Karpinsky D. V., Troyanchuk I. O., Mantytskaya O. S., Khomchenko V. A., Kholkin A. L. Structural Stability and Magnetic Properties of Bi_{1-x}La(Pr)_xFeO₃ Solid Solutions. *Solid State Communications*, 2011, vol. 151, no. 22, pp. 1686–1689. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2011.08.002>
9. Lee S. H., Tian G., Kim T. C., Jung H. K., Choi J. W., Walker F. J., Ahn C. H., Ross C. A., Kim D. H. Integration of sputter-deposited multiferroic CoFe₂O₄–BiFeO₃ nanocomposites on conductive La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ electrodes. *Nanotechnology*, 2019, vol. 30, no. 10, pp. 105601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/aaf7cd>
10. Priya A. S., Banu S. I. B., Anwar S. Investigation of multiferroic properties of doped BiFeO₃–BaTiO₃ composite ceramics. *Materials Letters*, 2015, vol. 142, pp. 42–44. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.11.111>
11. Rodríguez-Carvajal J. R. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, 1993, vol. 192, no. 1–2, pp. 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-i](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-i)

Информация об авторах

Желудкевич Дмитрий Викторович – мл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: geludkevichdima@mail.ru.

Латушко Сергей Игоревич – мл. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: smer444@mail.ru.

Силибин Максим Викторович – канд. техн. наук, доцент. Национальный исследовательский университет электронной техники «МИЭТ» (пл. Шокина, 1, 124498, Зеленоград, Российская Федерация). E-mail: sil_m@mail.ru.

Чобот Александра Николаевна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.n.chobot@tut.by.

Сыса Артём Владимирович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Национальный исследовательский университет электронной техники «МИЭТ» (пл. Шокина, 1, 124498, Зеленоград, Российская Федерация). E-mail: sysa.artem@yandex.ru.

Неклюдов Капитон Николаевич – мл. науч. сотрудник. Национальный исследовательский университет электронной техники «МИЭТ» (пл. Шокина, 1, 124498, Зеленоград, Российская Федерация). E-mail: neklyudovk@gmail.com.

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

Карпинский Дмитрий Владимирович – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. НПЦ НАН Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: karpinsky@ifftp.bas-net.by.

Information about the authors

Zheludkevich Dmitry V. – Junior 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: geludkevichdima@mail.ru.

Latushko Sergei I. – Junior 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: smer444@mail.ru.

Silibin Maxim V. – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. National Research University of Electronic Technology “MIET” (1, Shokin sq., 124498, Zelenograd, Russian Federation). E-mail: sil_m@mail.ru.

Chobot Aleksandra N. – 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.

Sysa Artem V. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. National Research University of Electronic Technology “MIET” (1, Shokin sq., 124498, Zelenograd, Russian Federation). E-mail: sysa.artem@yandex.ru.

Neklyudov Kapiton N. – Junior Researcher. National Research University of Electronic Technology “MIET” (1, Shokin sq., 124498, Zelenograd, Russian Federation). E-mail: neklyudovk@gmail.com.

Chobot Gennadii M. – 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.

Karpinsky Dmitry V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. 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: karpinsky@ifftp.bas-net.by.