

- Rev. Lett. 1987. V. 58. No. 23. P. 2486 -2489.
10. Romanov S.G., Korovin A.V., Regensburger A., Peschel U. Hybrid colloidal plasmonic-photonic crystals // *Advanced Materials*. 2011. V. 23. P. 2515-2533.
11. Яников М.В., Вейсман В.Л., Гонян А.А., Лукин А.Е., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Гербредер В.И., Огурцов А.С. Экспериментальное исследование физических свойств наночастиц серебра, введенных методом электротермодиффузии в пористую матрицу опала // *Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки»*. 2014. Выпуск 5. С. 196-201.
12. Яников М.В., Вейсман В.Л., Романов С.Г., Соловьев В.Г. Экспериментальное изучение резонанса Фано в университетском курсе физики // *Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов*. Выпуск 25. М.: ИСМО РАО, 2015. С. 96-98.
13. Veisman V.L., Romanov S.G., Solovyev V.G., Yanikov M.V. Optical properties of nanostructured silver, embedded by electro-thermo-diffusion in opal photonic crystal // *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. – Rezekne, Latvia, 2015. Vol. 1. P. 230-231.
14. Вейсман В.Л., Лобарёв Д.С., Пучков Н.И., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Яников М.В. Наблюдение резонанса Фано в наносистеме Ag/опал // *Вестник Псковского государственного университета. Серия «Естественные и физико-математические науки»*. 2015. Выпуск 6. С. 106-113.
15. Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts // *Physical Review*. 1961. V. 124. P. 1866-1878.

УДК 534.321.9: 621.762.4

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВИСМУТСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

**Асветимская Е.В.<sup>1</sup>, студ., Рубаник О.Е.<sup>1</sup>, ст. преп.,  
Шилин А.Д.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доц., Шилина М.В.<sup>2</sup>, к.б.н., доц.,  
Пушкарёв А.В.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., Радюш Ю.В.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., доц.,  
Чернов П.А.<sup>4</sup>, инж.**

<sup>1</sup>*Витебский государственный технологический университет,*

<sup>2</sup>*Витебский государственный университет им. П.М. Машерова,*

<sup>3</sup>*ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,*

<sup>4</sup>*ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассматривается применение ультразвуковых колебаний к получению материалов с магнитоэлектрическими свойствами.

Ключевые слова: сегнетомагнетики, перовскит, ультразвук.

Материалы, в которых проявляется взаимосвязь магнитных и электрических свойств – сегнетомагнетики, привлекают интерес исследования в связи с возможностью управления их взаимными свойствами с помощью электрических и магнитных полей. Это прогнозируется в перспективе использованием их в многочисленных практических приложениях и разработке на их основе новых многофункциональных электронных устройств.

Перспективами практического использования сегнетомагнитных материалов предполагается спиновая электроника [1,2], фотоника [3-5], медицина [6], информационные и энергосберегающих технологии. На основе сегнетомагнетиков можно создавать магнитные сенсоры, емкостные электромагниты, элементы магнитной памяти, невзаимные СВЧ фильтры и другие устройства, не предполагающие протекания постоянных электрических токов и сопряженных с ними тепловых потерь. Некоторые из них, например сенсоры, уже нашли практическое применение.

Такой широкий спектр возможного использования магнитоэлектриков показывает перспективность их практического получения с использованием новых технологий, таких как применение высоких давлений и ультразвуковых колебаний, исследования свойств получаемых материалов. Данные исследования в настоящее время носят лабораторный характер, но уже в настоящее время являются прорывными и привели к значительному прогрессу в понимании фундаментальной природы магнитоэлектрических взаимодействий, хотя находятся в стадии становления.

Особое внимание уделено средам, магнитоэлектрические свойства которых проявляются при комнатных температурах, поскольку такие материалы являются перспективными для практических применений. В то же время, общее количество высокотемпературных мультиферроиков до сих пор остается небольшим, а те, что проявляют магнитоэлектрические свойства при комнатной температуре, характеризуются малой намагниченностью и значительными потерями за счет конечной проводимости. В связи с этим актуален поиск новых материалов, в которых реализуются магнитоэлектрические явления в твердом теле, среди которых особого внимания заслуживает структура перовскита с образованием электрической поляризации.

К мультиферроикам обладающим одновременно электрическим и магнитным упорядочением при температурах выше комнатной относится феррит висмута  $\text{BiFeO}_3$ , который является перспективным для получения и исследования, в частности метастабильных фаз с использованием ультразвуковых колебаний и высоких давлений.

Исследованных систем, полученных из  $\text{BiFeO}_3$  с помощью замены в подрешетке Fe, весьма мало, главным образом, из-за ограниченной растворимости, даже в случае катионов, которые близки к Fe по ионному размеру. Синтез с использованием высокого давления (HP метод) позволяет расширить растворимость и тем самым диапазоны существования фазы перовскита. Во многих случаях, метастабильные фазы перовскита могут быть стабилизированы путем закалки под давлением. Эти фазы могут быть изучены с помощью тех же средств, применимых для стабильных фаз в широком интервале температур при давлении окружающей среды. Тем не менее, этот метод нелегко доступен и только несколько систем HP на основе перовскита  $\text{BiFeO}_3$  были получены до сих пор. Весь ряд твердых растворов был получен для  $\text{BiFeO}_3\text{-BiMO}_3$  ( $M = \text{Mn, Co, и Ga}$ ) [7-10]. В других случаях, композиции с определенном соотношении  $\text{Fe}^{3+} + \text{B}^{3+} = 1: 1$ , где  $\text{B}^{3+} = \text{Cr и Mn}$ , были изучены лишь в работах [11,12].

Следует отметить, что подготовка и исследование метастабильных перовскитов (как отдельных соединений, так и твердых растворов) представляют большой интерес в нескольких отношениях. Во-первых, такие перовскиты могут быть стабилизированы в новых кристаллических структурах и, следовательно, обнаружить наличие новых свойств и эффектов. Во-вторых, анализ кристаллической структуры и физических характеристик метастабильной фазы по сравнению с теми, которые являются стабильными при атмосферном давлении, позволяет выявить и / или уточнить закономерности и явления, которые не были замечены прежде [13]. В-третьих, некоторые перовскитные фазы могут быть получены в объемном виде только через синтез HP [14], хотя их выращивают как эпитаксиальные плёнки с помощью обычных методов [15].

В предполагаемой работе  $\text{BiFe}_{0.5}\text{Sc}_{0.5}\text{O}_3$  в фазе перовскита не получается в виде достаточно качественной керамики и исследованием является получение высококачественных образцов с использованием ультразвуковых колебаний. Эта композиция на самом деле эквимоллярный твердый раствор в системе  $\text{BiFeO}_3\text{-BiScO}_3$ . Висмут – скандиевый перовскит является фазой HP и характеризуется моноклинной пространственной группой [16]. Учитывая различные симметрии исходных соединений и значительную разницу между ионным размером  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Sc}^{3+}$ , можно ожидать различные перовскитные фазы в этой системе. Это полярная модификация нового типа искаженной структуры перовскита, может сочетать в себе спонтанную поляризацию и намагниченность при высокой температуре  $\sim 220$  K. Система имеет большой потенциал, чтобы сохранять сегнетомагнитные свойства при комнатной температуре с небольшим изменением соотношения Fe / Sc. Поэтому она очень привлекательна с точки зрения регулирования свойств. Кроме того, принимая во внимание, что различные фазы квазивыврожденных состояний с требуемыми свойствами были недавно также обнаружены в системе  $\text{BiFe}_{0.75}\text{Mn}_{0.25}\text{O}_3$  [17, 18] и  $\text{BiGa}_{1-x}\text{Sc}_x\text{O}_3$  [10], а поэтому также, вероятно, может быть найдены во многих других метастабильных перовскитах, полученных из  $\text{BiFeO}_3$ .

Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру и свойства получаемой керамики показывает, что получаемая керамика имеет, как правило, улучшенные физико-механические свойства [19-21] и позволяет регулировать фазовый состав, что особенно важно для получения требуемых соотношений фаз [22].

#### Заключение

Полученные в результате анализа результаты дают возможность применить ультразвуковые колебания к получению материалов с магнитоэлектрическими свойствами и прогнозировать изменение структурных характеристик и некоторых физических свойств получаемой керамики. Исследованиями определены системы, применения к которым ультразвуковых колебаний будет наиболее эффективно для получения сегнетомагнитных фаз. Установлены фазовые составы, у которых электрическое и магнитное упорядочение

может иметь место при комнатной температуре и атмосферном давлении в получаемых метастабильных фазах.

#### Список использованных источников

1. Ёйа Н., and Paruch P. Multiferroics: A way forward along domain walls // *Nature Materials*. – 2009. – V. 8. – P. 168.
2. Catalan G., Scott J.F. Physics and Applications of Bismuth Ferrite // *Advanced Materials*. 2009. V. 21, № 24. P. 2463–2485.
3. Alexe M., Hesse D. Tip-enhanced photovoltaic effects in bismuth ferrite // *Nature Communications*. Nature Publishing Group, 2011. V. 2. P. 256.
4. Kehr S.C., Liu Y.M., Martin L.W., et al. Near-field examination of perovskite-based superlenses and superlens-enhanced probe-object coupling. // *Nature communications*. 2011. V. 2. P. 249.
5. Wang X., Lin Y., Xifeng Ding, Jinguo Jiang. Enhanced visible-light-response photocatalytic activity of bismuth ferrite nanoparticles // *Journal of Alloys and Compounds*. Elsevier B.V., 2011. V. 509, № 23. P. 6585–6588.
6. Dai Z., Fujita Y., Akishige Y. Dielectric properties and heating effect of multiferroic BiFeO<sub>3</sub> suspension // *Materials Letters*. Elsevier B.V., 2011. V. 65, № 13. P. 2036–2038.
7. M. Azuma, H. Kanda, A. A. Belik, Y. Shimakawa, M. Takano, J. Magn. Effects of rare earth manganites on structural, ferroelectric, and magnetic properties of BiFeO<sub>3</sub> thin films. *Magn. Mater.* 310 1177 (2007).
8. P. Mandal, A. Sundaresan, C. N. R. Rao, A. Iyo, P. M. Shirage, Y. Tanaka, C. Simon, V. Pralong, O. I. Lebedev, V. Caignaert, B. Raveau. Temperature- and magnetic-field-induced magnetization reversal in perovskite YFe<sub>0.5</sub>Cr<sub>0.5</sub> Phys. Rev. B 82, 100416 (2010).
9. A. N. Salak, A. D. Shilin, M. V. Bushinski, N. M. Olekhnovich, N. P. Vyshatko, Experimental and Theoretical Study of Zircon and Scheelite Phases of DyVO<sub>4</sub> Mater. Res. Bull. 35, 1429 (2000).
10. D. D. Khalyavin, A. N. Salak, N. P. Vyshatko, A. B. Lopes, N. M. Olekhnovich, A. V. Pushkarev, I. I. Maroz, Yu. V. Radyush, Polar and antipolar polymorphs of metastable perovskite BiFe<sub>0.5</sub>Sc<sub>0.5</sub>O<sub>3</sub> Chem. Mater. 18, 5104 (2006).
11. T. Oikawa, S. Yasui, T. Watanabe, K. Ishii, Y. Ehara, H. Yabuta, T. Kobayashi, T. Fukui, K. Miura, H. Funakubo, Jap. J. Appl. Leukemia and Lymphoma of Natural Killer Cells Phys. 52, 04CH09 (2013).
12. A. A. Belik, J. Synthesis, crystal structure, and properties of KSbO<sub>3</sub>-type Bi<sub>3</sub>Mn<sub>1.9</sub>Te<sub>1.1</sub>O<sub>11</sub> Solid State Chem, 195, 32 (2012).
13. Qiu Ch.-W., Yao H.-Y., Li L.-W., S. Zouhdi, and T.-S. Yeo Routes to left-handed materials by magnetoelectric couplings // *Phys. Rev. B*. – 2007. – V. 75. – P. 245214.
14. ESS Instrument Construction Proposal CAMEA L. C. Chapon, P. Manuel, P. G. Radaelli, C. Benson, L. Perrott, S. Ansell, N. J. Rhodes, D. Raspino, D. Duxbury, E. Spill, J. Norris, Neutron News 22, 22 (2011).
15. J. Rodriguez Carvajal, Physica Change of magnetic ground state by light electron-doping in CeOs<sub>2</sub>Al<sub>10</sub> B 193, 55 (1993).
16. A. Ducke, E. Muench, M. Troemel, Institut fur Anorganische Chemie, Frankfurt, Germany. ICDD Grant-in-Aid (1992), refs 00-043-0181 and 00-043-0200.
17. H. T. Stokes, D. M. Hatch, and B. J. Campbell. Crystal and magnetic structures of hexagonal YMnO<sub>3</sub>. ISOTROPY Software Suite, iso.byu.edu.
18. Хасанов О.Л., Похолков Ю.П. Соколов В.М., Двилис Э.С., Бикбаева З.Г., Полисадова В.В., Струц В.К. Ультразвуковая обработка наноструктурных порошков для изготовления циркониевой технической керамики. «Перспективные материалы», № 1, 2000 г., С. 50-55.
19. Ю. В. Радюш, Н.М. Олехнович. Особенности диэлектрического отклика твердых растворов (1-x)(PbMg 1/3 Nb 2/3O<sub>3</sub> +xPbZrO<sub>3</sub>), синтезированных при высоком давлении.
20. Шилин А.Д., Рубаник В.В., Рубаник В.В.(мл.) и др. Перспективные материалы и технологии. Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Из-во УО «ВГТУ», 2013. – 655с.
21. Хасанов, О.Л. Эффекты мощного ультразвукового воздействия на структуру и свойства наноматериалов. / О.Л. Хасанов, Э.С. Двилис, Полисадова В.В. Томск: ТПУ, 2008. – 153 с.
22. Bliznyuk L.A., Petrochenko T.P., Klimza A.A.1, Basov N.A.1, Rubanik V.V., Shilin A.D., Shilina M.V. Phase composition of ceramics obtained by applying ultrasonic vibrations. / Перспективные материалы и технологии Международный симпозиум посвящен 40-летию ИТА НАН Беларуси 27-29 мая 2015, Витебск, Беларусь. Сборник материалов

симпозиума. С. 305-307.

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ № T15BT-008, при поддержке программы «TUMOCs» Project “Tuneable multiferroics based on oxygen octahedral structures”.

УДК 534.321.9: 621.762.4

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СИНТЕЗА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ФАЗ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ

Курнеев Я.А.<sup>1</sup>, студ., Шарендо Н.А.<sup>1</sup>, студ., Шилин А.Д.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доц.,  
Шилина М.В.<sup>2</sup>, к.б.н., доц., Пушкарев А.В.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н.,  
Радюш Ю.В.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., доц., Чернов П.А.<sup>4</sup>, инж.

<sup>1</sup>Витебский государственный технологический университет,

<sup>2</sup>Витебский государственный университет им. П.М. Машерова,

<sup>3</sup>ГО НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,

<sup>4</sup>ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси»,  
г. Витебск, Республика Беларусь

Реферат. В статье рассматривается применение ультразвуковых колебаний к получению порошковых материалов.

Ключевые слова: порошки, перовскит, ультразвук.

В настоящей работе представлены результаты подготовки порошковых материалов для синтеза Bi-содержащих перовскитов кислородно-октаэдрических (BCOO) систем с использованием золь-гель метода (SG). Особый акцент был сделан на подготовку органики свободно гомогенной смеси  $\text{Fe}_{0.5}\text{Sc}_{0.5}\text{O}_3$  для дальнейшего использования в качестве предшественника синтеза высокого давления. Полученная серия BCOO перовскита выборочно под контролем химического состава была изучена с помощью РФА, ТГ-ДСК.

Основной целью данной работы является разработка новых экологически чистых мультиферроиков на основе Bi-содержащих кислородно-октаэдрических систем. Ряд семейств оксидных материалов с магнитными, сегнетоэлектрическими и сегнетоэластическими свойствами и их комбинаций состоят из трехмерных цепочек октаэдров. Семейство перовскита является самым известным в этом отношении. Магнитные и диэлектрические свойства метастабильных перовскитных материалов ( $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{1-y}\text{Sc}_y\text{O}_3$ ), которые находятся в стадии изучения, можно регулировать с помощью частичных замещений Fe (III) и Bi (III). Тем не менее, синтез этих мультиферроиков с использованием стандартных методов позволяет получить ограниченное замещение в системе. В то же время, технология высокого давления (ВД) - спекания позволяет получить более широкий диапазон соединений перовскита в качестве метастабильных фаз. Совсем недавно, метастабильный перовскит  $\text{BiFe}_{0.5}\text{Sc}_{0.5}\text{O}_3$  был синтезирован под высоким давлением (6 ГПа) и при высокой температуре (1500 К) в виде полярного и антиполярного полиморфов. Материал, используемый в качестве предшественника для синтеза под высоким давлением, был получен твердотельным методом реакции из соответствующих оксидов металлов. Тем не менее, обычная керамическая технология, как правило, приводит к образованию агрегатов и требует более высоких температур, которые приводят к агломерации частиц. Однородность и чистота порошка, таким образом, синтезированных, являются неудовлетворительными для исследований, в то время как распределение частиц по размерам очень широко.

Это исследование сосредоточено на подготовке метастабильного перовскита предшественника ( $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{0.5}\text{Sc}_{0.5}\text{O}_3$ ) для синтеза под высоким давлением при помощи золь-гель метода. Водный раствор золь-гель процесса (сжигание) является наиболее удобным способом из-за своей простоты, хорошего смешивания исходных материалов (смешение на молекулярном уровне), относительно низкой температуры реакции и легко контролируемой стехиометрии конечного продукта. Быстрое развитие большого объема газов, сопровождающееся значительной потерей массы в процессе сгорания ксерогеля, ограничивает возникновение агломератов и приводит к образованию мелких частиц с узким распределением по размерам. Все эти функции помогут получить однородные, плотные и однофазные керамики.