

FeSiBC характеризуется пластинчатой структурой толщиной около 30 мкм, тогда как порошок FeSiAl имеет сферическую форму с гладкой поверхностью. Рентгеноструктурный анализ показал аморфную структуру FeSiBC с присутствием фазы α -Fe и кристаллическую ОЦК структуру α -Fe для FeSiAl с образованием сверхрешетки. Сферическая форма порошка FeSiAl обеспечивает изотропию и будет способствовать равномерному формированию изолирующего слоя. Пластинчатый порошок FeSiBC требует использования связующих веществ для оптимизации процесса компактирования. Полученные результаты создают основу для разработки высокоэффективных электротехнических материалов на основе исследованных порошков.

Благодарность (финансирование)

Работа поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № Т24КИТГ-018).

Список использованной литературы

1. H. Amano [et al.] AIP Advances. **9**, 3 (2019) 035027.
2. A. Hasegawa [et al.] AIP Advances. **10**, 1 (2020) 015241.
3. B. Meng [et al.] J. of Magn. Magn. Mater. **492** (2019) 165651.
4. K. Vijayakumar [et al.] Mat. Today: Proc. **41** (2021) 1195.

УДК 544.22

**Минчукова О.Ф., к.ф.-м.н., доцент,
Желудкевич А.Л., к.ф.-м.н., доцент, Карпинский Д.В., д.ф.-м.н.,
Латушко С.И., Дубинин Н.А.**

*ГНПО «Научно-практический центр Национальной академии наук
Беларуси по материаловедению», г. Минск*

Нгуен Ван Чанг, к.х.н.

*Институт тропических технологий Вьетнамской академии наук и
технологии, Ханой*

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМ $Ba_{1-x}(Bi,R)_xTi_{1-y}Fe_yO_3$ (R - La, Pr, Nd)

В настоящее время актуальной задачей материаловедения является разработка новых электрокерамических материалов с диэлектрическими параметрами, соответствующими высоким требовани-

ям электронной промышленности. Мультиферроики, в которых существуют магнитное и электрическое упорядочение в последнее десятилетие являются предметом повышенного интереса исследователей [1, 2]. Такие материалы находят широкое применение в производстве микронэлектронных устройств, в которых пьезоэлектрический сигнал модулируется магнитным полем. Создание материалов с метастабильными структурным состоянием представляется перспективным направлением развития современных электрокерамических материалов. Наиболее известным мультиферроиком является феррит висмута (BiFeO_3), в объёмной форме обладающий ромбоэдрической симметрией, а следовательно, сегнетоэлектрическими свойствами и антиферромагнетизмом [3]. Известно, что замещение в исходном феррите висмута ионов висмута ионами редкоземельных элементов, а ионов железа – ионами титана является эффективным способом увеличения диэлектрической проницаемости и снижения диэлектрических потерь в широком интервале температур и частот электрического поля [4]. В данной работе получены составы, находящиеся вблизи фазовой границы «ромбоэдр – куб», а именно твердые растворы $\text{Ba}_{1-x}(\text{Bi},\text{R})_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$) с $x = 10\% - 30\%$, и проведено исследование их морфологии.

Для исследования морфологии использовался сканирующий электронный микроскоп с полевой эмиссионной пушкой фирмы Carl Zeiss Merlin Microscopy GmbH, интегрированной с системой энергодисперсионного анализа Oxford Ultim Extreme фирмы OXFORD Ltd. Исследование эволюции кристаллической структуры составов $\text{Ba}_{1-x}(\text{Bi},\text{R})_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$) вблизи фазовых переходов, вызванных изменением концентрации ионов заместителей, позволило определить факторы, обуславливающие наблюдаемые структурные изменения. По результатам дифракционных измерений, составы с $x \leq 10\%$ характеризуются двухфазной структурой «ромбоэдр – куб». Увеличение концентрации ионов-заместителей приводит к уменьшению фазовой доли ромбоэдрического искажения элементарной ячейки.

Кристаллиты исследованных составов характеризуются различной морфологией, параметрами кристаллической структуры и размерами. Для примера, на рисунке 1 представлены изображения, полученные методом сканирующей электронной микроскопии, керамических составов с замещением висмута лантаном $\text{Ba}_{1-x}(\text{Bi},\text{La})_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ с $x = 10\% - 30\%$. Для всех полученных твердых

растворов установлено, что средний размер зерен постепенно уменьшается с увеличением концентрации ионов заместителей, при этом для составов с $x \leq 30\%$ наблюдается заметное уширение рентгеновских рефлексов по сравнению с составами с более высокой концентрацией ионов заместителей.



Рис. 1 – СЭМ-изображения составов $\text{Ba}_{0,35}\text{Bi}_{0,585}\text{La}_{0,065}\text{Ti}_{0,35}\text{Fe}_{0,65}\text{O}_3$ (а) и $\text{Ba}_{0,35}\text{Bi}_{0,455}\text{La}_{0,195}\text{Ti}_{0,35}\text{Fe}_{0,65}\text{O}_3$ (б)

СЭМ-изображения, полученные для составов с более высоким содержанием ионов заместителей, характеризуются преобладающей кубической структурой и меньшим размером зерен, что может быть вызвано сосуществованием двух структурных фаз.

Следует отметить, что СЭМ-изображения, полученные для составов с однофазной ромбоэдрической структурой, демонстрируют зерна прямоугольной формы с острыми краями, в то время как зерна, наблюдаемые для образцов с двухфазной структурой, имеют округлую форму (рис. 1). С увеличением концентрации ионов заместителей наблюдается изменение среднего размера зерен в твердых растворах $\text{Ba}_{1-x}(\text{Bi},\text{R})_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$). Уменьшение размера зерна связано с переходом кристаллической структуры составов от ромбоэдрической фазы к кубической, вследствие уменьшения параметров ячейки и ее объема, соответственно. Составы с $x = 30\%$ характеризуется резким уменьшением размера зерен до 1 мкм ввиду фазового перехода «ромбоэдр – куб». Анализ энергодисперсионных спектров позволил установить, что химический состав всех полученных твердых растворов на основе титаната бария с замещением редкоземельными элементами соответствует элементному составу рассчитанных навесок.

Заключение

Методом многоступенчатого твердофазного синтеза получены соединения систем $\text{Ba}_{1-x}(\text{Bi},\text{R})_x\text{Ti}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ ($\text{R} - \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$) с $x = 10\% - 30\%$. С увеличением концентрации ионов заместителей

во всех системах наблюдается изменение среднего размера зерен, что связано с переходом кристаллической структуры составов от ромбоэдрической фазы к кубической вследствие уменьшения параметров ячейки и ее объема. Составы с $x = 30\%$ характеризуются резким уменьшением размера зерен до 1 мкм ввиду фазового перехода «ромбоэдр – куб».

Благодарность (финансирование)

Работа поддержана Белорусским Республиканским Фондом Фундаментальных Исследований (грант № T24BA-002).

Список использованной литературы

1. K.F. Wang, J.M. Liu, Z.F. Ren. Adv. Phys. 58(4) (2009) 321.
2. G. Catalan, J.F. Scott. Adv. Mater. 21(24) (2009) 2463.
3. A.L. Zhaludkevich [et al.] J. of Alloys .Comp. 830 (2020) 154632.
4. M. Habib [et al.] J Materiomics. 7 (1) (2021) 40.

УДК: 621.315.616

Хуан Х.Л., магистр физики, ст. исследователь

Чжэнчжоский университет, Чжэнчжоу, Китай

МОДИФИКАЦИЯ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ТРАНСФОРМАТОРНЫМ МАСЛОМ

Оптимизация теплообмена в энергетическом оборудовании является ключевой задачей повышения энергоэффективности. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является модификация смачиваемости поверхностей трансформаторным маслом, что позволяет существенно улучшить теплопередачу в системах охлаждения силовых трансформаторов [1]. В работе исследуются методы управления смачиваемостью и их влияние на эффективность теплообмена.

Исследования проводились на стальных образцах, используемых в конструкциях теплообменников трансформаторов. Модификация поверхности осуществлялась методами магнетронного осаждения с формированием покрытий толщиной от 250 до 750 нм. Для анализа смачиваемости использовали автоматизированный ком-