

УДК 549.5:54–165:536.21:536.413:537.31/32

Л. А. Башкиров, доктор химических наук, профессор (БГТУ); **А. К. Болвако**, ассистент (БГТУ);
Г. П. Дудчик, кандидат химических наук, доцент, заведующая кафедрой (БГТУ);
Л. Я. Крисько, кандидат химических наук, доцент (БГТУ)

СИНТЕЗ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ МЕТОДОМ ТВЕРДОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕКУРСОРОВ BiFeO_3 И PrCoO_3

Методом твердофазных реакций были впервые синтезированы твердые растворы системы $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$ с использованием прекурсоров – феррита висмута BiFeO_3 и кобальтита празеодима PrCoO_3 . Установлены температурные и временные режимы синтеза прекурсоров и твердых растворов. Определены параметры кристаллической решетки твердых растворов состава $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0; 0,2; 0,5; 1$). Предложены возможные механизмы образования твердых растворов из прекурсоров.

Solid solutions of $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$ system were synthesized by means of the solid-state reactions method using precursors – bismuth ferrite BiFeO_3 and praseodymium cobaltite PrCoO_3 . The temperature-time syntheses regimes of the precursors and the solid solutions were selected. The crystal lattices parameters of the solid solutions with compositions $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0; 0.2; 0.5; 1$) were found. The possible mechanisms of formation of the solid solutions from the precursors were proposed.

Введение. Как известно, ряд кристаллических диэлектриков обладают самопроизвольной поляризацией (электрическим упорядочением) в небольших объемах вещества, линейные размеры которых не превышают 10^{-6} м. Во внешнем электрическом поле подобные вещества, названные сегнетоэлектриками, или ферроэлектриками (ФЭ), обнаруживают аномально высокую поляризацию, которая в $10^4 - 10^5$ раз превышает поляризацию обычных диэлектриков.

Магнитными аналогами ФЭ являются ферромагнетики (ФМ) – материалы со спонтанной намагниченностью (магнитным упорядочением) в тех же по размерам объемах вещества, которые во внешнем магнитном поле намагничиваются в $10^{10} - 10^{11}$ раз сильнее диа- и парамагнетиков. Способность ФЭ поляризоваться в электрическом и ФМ намагничиваться в магнитном поле успешно используется в различных технических устройствах (в микроэлектронике, электрооптике, в системах магнитной записи и воспроизведения звука и др.). Однако потребности современной техники в создании устройств на основе материалов нового поколения, которые сочетали бы в себе возможности магнитной записи, хранения и быстродействующей и эффективной обработки информации, явились одной из причин интенсивного исследования веществ, обладающих способностью откликаться одновременно на воздействие электрического и магнитного полей. В таких веществах, названных мультиферроиками, или сегнетомагнетиками (СМ), имеет место магнитоэлектрический эффект (МЭ-эффект) – возникновение намагниченности M под действием электрического поля с напряженностью E и возникновение электри-

ческой поляризации P под действием магнитного поля с напряженностью H [1]: $M = \alpha E$ и $P = \alpha H$. Другими словами, для каждого СМ существует однозначная связь между E и H , которую можно выразить производной dE / dH . Величина этой производной принята в качестве количественной характеристики наблюдаемого МЭ-эффекта. Особого внимания заслуживает тот факт, что данный эффект возникает при воздействии на СМ статического электрического поля с постоянной напряженностью, что исключает тепловые (энергетические) потери, неизбежные при прохождении электрического тока через вещество.

Таким образом, управляя магнитными свойствами вещества с помощью электрического поля (или наоборот, электрическими свойствами – магнитным полем), можно создавать устройства записи или считывания информации путем преобразования магнитного упорядочения или разупорядочения в электрический сигнал.

Наиболее перспективным СМ, способным найти широкое применение в различных электронных устройствах нового поколения, является феррит висмута BiFeO_3 . Данное соединение – одно из немногих веществ, которые сочетают электрическое и магнитное упорядочение при рекордно высоких температурах. Для него сегнетоэлектрическая температура Кюри (T_C) равна 1083 К, температура перехода из антиферромагнитного в парамагнитное состояние (T_N) – 643 К [1]. При комнатных температурах в тонких (50–500 нм) пленках BiFeO_3 зафиксированы значения МЭ-эффекта $dE / dH = 3 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Э})$, что на порядки превышает величины, измеренные при комнатных температурах в других СМ [2].

Температурно-временные режимы спекания образцов и параметры элементарной ячейки твердых растворов и прекурсоров BiFeO_3 и PrCoO_3

Состав	Температура спекания, °С	Время спекания, ч	a , нм	b , нм	c , нм	Объем элементарной ячейки $V \cdot 10^3$, нм ³	Угол α , град
$\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ $x = 0,5$	770	4	0,3974	0,3910	0,4038	62,75	–
	800	2	0,3881	0,3877	0,3798	57,14	–
	800	14	0,3869	0,3868	0,3826	57,27	–
	830	4	0,3863	0,3866	0,3805	56,83	–
	850	14	0,3873	0,3864	0,3879	58,06	–
$\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ $x = 0,2$	770	4	0,3944	–	–	61,34	89,19
	800	2	0,3909	–	–	59,64	88,19
	800	14	0,3902	–	–	59,39	89,39
	830	4	0,3898	–	–	59,23	89,37
PrCoO_3	1200	1	0,3783	0,3795	0,3779	54,39	–
BiFeO_3	800	8	0,3963	–	–	62,23	89,23

Проблема, однако, заключается в том, что у объемных образцов феррита висмута линейный МЭ-эффект практически не наблюдается вследствие наличия пространственно-модулированной спиновой структуры – несоразмерности его антиферромагнитной и кристаллической структур, приводящей к тому, что в среднем по объему МЭ-эффект и спонтанная намагниченность равны нулю [3].

Многочисленные исследования феррита висмута показали, что перспективным путем подавления пространственно-модулированной структуры и улучшения его магнитоэлектрических свойств, помимо приложениия сильных магнитных полей и механических напряжений, является направленный синтез твердых растворов на основе BiFeO_3 , т. е. частичное замещение ионов висмута ионами других металлов [4]. Твердые растворы на основе феррита висмута можно разбить на две основные группы: с замещением ионов висмута и с замещением ионов железа. Как правило, в первом случае используются ионы редкоземельных элементов [3]. Замещение ионов железа проводят ионами переходных металлов с близкими ионными радиусами (ионы Ti^{4+} , Ni^{2+}). Введение в феррит висмута примесей других элементов, являясь аналогом механического давления на кристаллическую решетку, делает существование пространственно-модулированной структуры энергетически невыгодным и позволяет получить величины МЭ-эффекта, на порядок превосходящие наблюдаемые ранее [4].

На кафедре физической и коллоидной химии эта идея получила дальнейшее развитие – в течение ряда лет проводятся систематические исследования закономерностей влияния одновременного изовалентного замещения ионов Bi^{3+} и Fe^{3+} в BiFeO_3 парами ионов: La^{3+} и Co^{3+} ; Pr^{3+} и Co^{3+} ; La^{3+} и Ga^{3+} и др. на кристалличе-

скую структуру и электромагнитные свойства образующихся при этом твердых растворов.

Впервые синтезированы различными методами с использованием различных исходных веществ твердые растворы $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ [5], $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ [6] и ряд других и изучены их свойства. В литературе сведения по данному направлению отсутствуют.

В работе изучались возможности синтеза поликристаллических образцов твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ керамическим методом с использованием в качестве прекурсоров феррита висмута BiFeO_3 и кобальтита празеодима PrCoO_3 .

Методика эксперимента. Для синтеза поликристаллических образцов прекурсоров – феррита висмута BiFeO_3 и кобальтита празеодима PrCoO_3 керамическим методом использовались оксиды висмута Bi_2O_3 (х.ч.), железа Fe_2O_3 (ч.д.а.), празеодима Pr_6O_{11} (х.ч.) и кобальта Co_3O_4 (ч.д.а.). Порошки исходных оксидов, взятые в молярных соотношениях, соответствующих составам BiFeO_3 и PrCoO_3 , смешивали с добавлением этанола и мололи в планетарной мельнице Pulverizette 6.0 в течение 30 мин. Полученную шихту с внесенным этанолом прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм. Синтез феррита висмута осуществлялся путем изотермического отжига таблеток на воздухе при 800°C на протяжении 8 ч, синтез кобальтита празеодима – при 1200°C в течение 1 ч (таблица). Охлаждение образцов от температуры спекания до комнатной проводилось медленно, со скоростью примерно 2–3 град/мин. Для предотвращения взаимодействия таблеток с материалом подложки (Al_2O_3) на поверхность подложки наносился буферный слой шихты соответствующего состава.

Для синтеза поликристаллических образцов твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ таблетки прекурсоров дробились, растирались в агатовой ступке и мололись в планетарной мельнице, после чего полученные порошки в нужных молярных соотношениях смешивались, мололись с добавлением этанола и прессовались в таблетки диаметром 8 мм и высотой 4–5 мм. Полученные образцы подвергались спеканию при температуре от 770 до 850°C, время спекания варьировалось от 2 до 14 ч (таблица).

Идентификация образцов прекурсоров и твердых растворов проводилась путем рентгенофазового анализа (РФА). Дифрактограммы получали на рентгеновском дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (Германия) в диапазоне углов 2Θ 20–80° с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Определение параметров кристаллической решетки проводилось при помощи рентгеноструктурного табличного процессора RTP и данных картотеки международного центра дифракционных данных (ICDD JCPDS).

Результаты и их обсуждение. Дифрактограммы поликристаллических образцов прекурсоров представлены на рис. 1 и 2.

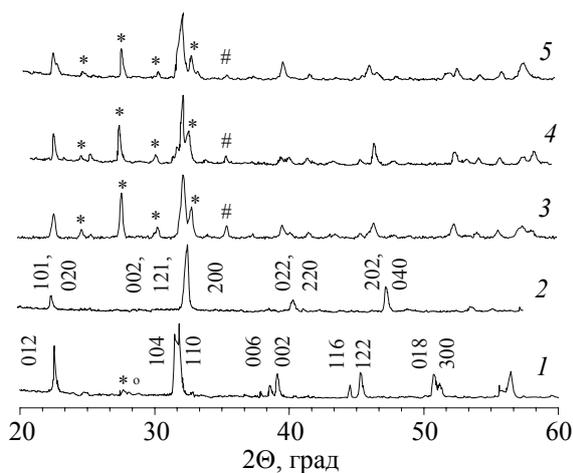


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы поликристаллических образцов прекурсоров BiFeO_3 (1), PrCoO_3 (2), твердого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0,2$), полученного в работе [6] из оксидов (3) и полученного нами из прекурсоров при $T = 800^\circ\text{C}$, 2 ч (4) и $T = 770^\circ\text{C}$, 4 ч (5). * – $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$; o – $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$; # – CoFe_2O_4

Анализ дифрактограмм показал, что в пределах погрешности метода РФА полученные образцы PrCoO_3 являются однофазными и не содержат примесей не прореагировавших оксидов (рис. 1, дифрактограмма 2).

На дифрактограмме BiFeO_3 (рис. 1, дифрактограмма 1) наблюдались небольшие рефлексы примесных фаз – парамагнитного силленита $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ и антиферромагнитного муллита

$\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$. Дифрактограммы BiFeO_3 и PrCoO_3 хорошо согласуются с дифрактограммами, полученными для этих соединений в работе [6] и с литературными данными [7], в соответствии с которыми методом твердофазных реакций однофазные образцы BiFeO_3 получить практически невозможно.

На рис. 1 представлены также дифрактограммы поликристаллических образцов твердого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0,2$), синтезированного при различных температурах и временах спекания (дифрактограммы 4, 5). На рис. 2 показаны дифрактограммы поликристаллических образцов твердого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0,5$). Для сравнения на рис. 1 и 2 даны также дифрактограммы твердых растворов аналогичных составов, полученных в работе [6] путем спекания соответствующих оксидов (дифрактограммы 3).

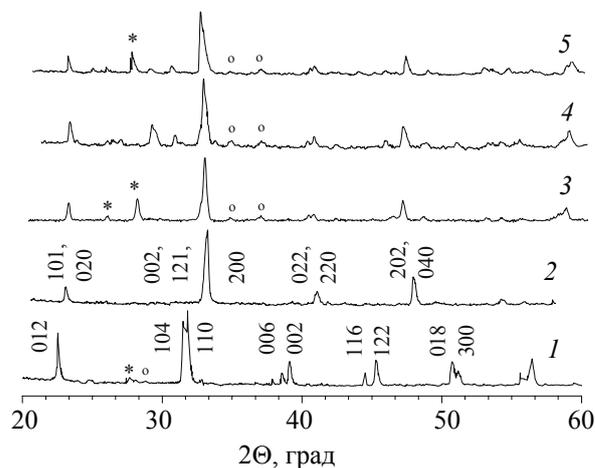


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы поликристаллических образцов прекурсоров BiFeO_3 (1), PrCoO_3 (2), твердого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0,5$), полученного в работе [6] из оксидов (3) и полученного нами из прекурсоров при $T = 800^\circ\text{C}$, 2 ч (4) и $T = 830^\circ\text{C}$, 4 ч (5). * – $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$; o – $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$

Спекание смеси порошков прекурсоров в молярном соотношении $\text{BiFeO}_3 : \text{PrCoO}_3 = 4 : 1$ для получения твердого раствора состава $\text{Bi}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_3$ ($x = 0,2$), обогащенного висмутом, проводили при четырех температурно-временных режимах, указанных в таблице. С учетом относительно низкой, по сравнению с PrCoO_3 , температуры плавления BiFeO_3 (1600°C для PrCoO_3 и 950°C для BiFeO_3 [8]) температура спекания не превышала 830°C.

Анализ дифрактограмм показал, что после спекания шихты при $T = 800^\circ\text{C}$ (2 ч) в конечном продукте $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0,2$) присутствует

небольшое количество примесных фаз – $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$ и ферромагнетика CoFe_2O_4 (рис. 1, дифрактограмма 4). Увеличение температуры спекания до 830°C (4 ч) и продолжительности термообработки до 14 ч при $T = 800^\circ\text{C}$ не привело к образованию беспримесного продукта. Таким образом, можно сделать вывод о термической неустойчивости твердого раствора $\text{Bi}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_3$ и сложном механизме протекания исследуемой твердофазной реакции при $T > 800^\circ\text{C}$. Понижение температуры до $T = 770^\circ\text{C}$ при времени отжига 4 ч вызвало существенное уменьшение содержания примесей в образце, в особенности примеси ферромагнетика CoFe_2O_4 , негативно влияющего на свойства целевого продукта. Из рис. 1 (дифрактограмма 5) видно, что содержание этой примеси пренебрежимо мало.

Спекание смеси порошков прекурсоров в молярном соотношении $\text{BiFeO}_3 : \text{PrCoO}_3 = 1 : 1$ для получения твердого раствора состава $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ ($x = 0,5$) проводили при пяти температурно-временных режимах, указанных в таблице. Максимальная температура спекания шихты, с учетом пониженного содержания феррита висмута по сравнению с предыдущим составом, составила 850°C . Образцы, полученные при $T = 770^\circ\text{C}$ (4 ч) и $T = 800^\circ\text{C}$ (2 ч), содержали небольшое количество антиферромагнетика $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$. Повышение температуры отжига до 830°C (4 ч) и 850°C (14 ч) приводит к практическому исчезновению этой примесной фазы, однако на дифрактограмме появляется небольшой рефлекс, соответствующий парамагнетику $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$. Следов ферромагнитной фазы CoFe_2O_4 ни в одном из этих образцов не обнаружено (рис. 2). Наиболее оптимальным режимом синтеза твердого раствора состава $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ следует, очевидно, выбрать $T = 830^\circ\text{C}$ (4 ч).

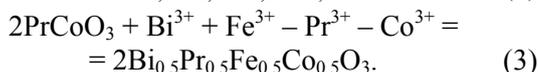
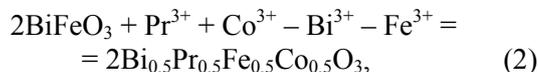
Сопоставление полученных результатов с данными работы [6] показывает (рис. 1 и 2), что синтез твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ из прекурсоров BiFeO_3 и PrCoO_3 является более перспективным методом, поскольку дает возможность получения продукта, содержащего незначительное количество примесных фаз по сравнению с образцами, полученными непосредственно из оксидов металлов. Кроме того, синтез из прекурсоров позволяет снизить температуру спекания с $1000\text{--}1200$ [6] до $800\text{--}850^\circ\text{C}$ и продолжительность термообработки.

Образование твердых растворов протекает, очевидно, путем диффузии ионов на границе раздела фаз BiFeO_3 и PrCoO_3 . Можно предположить два возможных механизма диффузии – двухстороннюю (рис. 3) и одностороннюю (рис. 4) диффузию. На примере образования

двух формульных единиц твердого раствора состава $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ по уравнению



схему двухсторонней диффузии можно отобразить следующими уравнениями:



Сложением уравнений (2) и (3) получаем суммарное уравнение (1). Стрелками показано направление движения ионов из одной кристаллической решетки в другую, пунктирной линией ограничена область зарождения новой фазы – твердого раствора $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ (рис. 3 и 4).

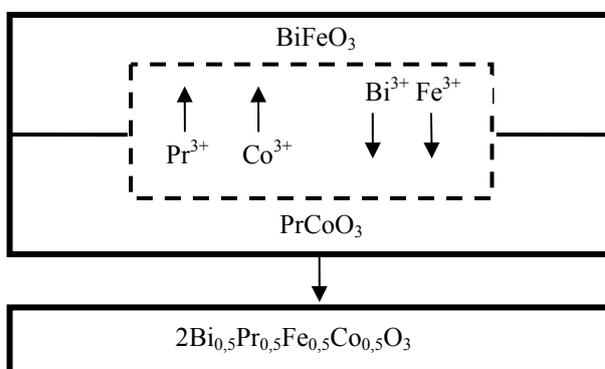


Рис. 3. Схема двухсторонней диффузии ионов Bi^{3+} , Fe^{3+} , Pr^{3+} , Co^{3+} при образовании двух формульных единиц твердого раствора $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ из прекурсоров BiFeO_3 и PrCoO_3

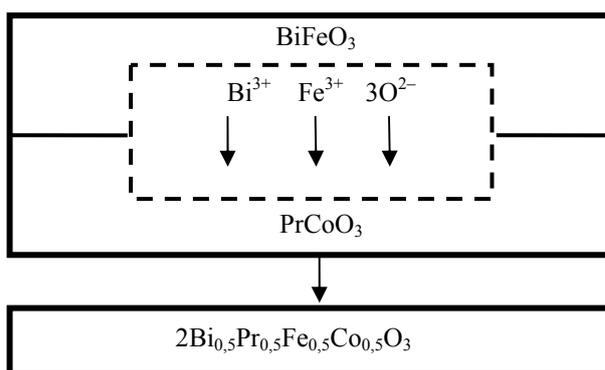
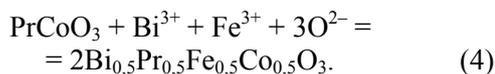


Рис. 4. Схема односторонней диффузии ионов Bi^{3+} , Fe^{3+} , O^{2-} из кристаллической решетки прекурсора BiFeO_3 в решетку прекурсора PrCoO_3 при образовании двух формульных единиц твердого раствора $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$

Поскольку температура плавления BiFeO_3 намного ниже температуры плавления PrCoO_3 , можно предположить, что из-за более высокой

подвижности ионов кристаллической решетки феррита висмута по сравнению с подвижностью ионов Pr^{3+} и Co^{3+} возможна односторонняя диффузия Bi^{3+} , Fe^{3+} и O^{2-} из кристаллической решетки BiFeO_3 в кристаллическую решетку PrCoO_3 по схеме, отображенной на рис. 4.

Схеме, представленной на рис. 4, соответствует материальный баланс ионов, согласно уравнению



Феррит висмута BiFeO_3 имеет ромбоэдрическую, а кобальтит празеодима – орторомбическую структуру перовскита соответственно [1, 4]. Дифрактограммы образцов твердого раствора состава $\text{Bi}_{0,8}\text{Pr}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2}\text{O}_3$, обогащенного висмутом, показали, что он имеет структуру ромбоэдрически искаженной элементарной перовскитовой ячейки. Рассчитанные нами параметры кристаллической элементарной ячейки прекурсора BiFeO_3 и твердых растворов приведены в таблице. Наблюдается хорошее совпадение значений параметров элементарной ячейки BiFeO_3 с данными работы [5]. Для твердого раствора наиболее предпочтительными значениями параметров a и α являются те, что соответствуют образцу, полученному спеканием при $T = 770^\circ\text{C}$ в течение 4 ч (таблица). Как уже отмечалось, этот образец практически не содержит примеси ферромагнетика CoFe_2O_4 .

Твердые растворы $\text{Bi}_{0,5}\text{Pr}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}_3$ с эквимольным содержанием прекурсоров имели орторомбическую кристаллическую структуру. Наиболее надежными значениями параметров элементарной ячейки мы считаем те, которые соответствуют образцу, полученному спеканием прекурсоров при $T = 830^\circ\text{C}$ на протяжении 4 ч (таблица).

Заключение. Методом твердофазных реакций были впервые синтезированы твердые растворы составов $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0; 0,2; 0,5; 1$) в двойной системе $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$ с использованием прекурсоров – феррита висмута BiFeO_3 и кобальтита празеодима PrCoO_3 . Предварительно прекурсоры получены спеканием соответствующих оксидов. Установлены температурные и временные режимы синтеза прекурсоров и твердых растворов. Определены параметры кристаллической решетки синтезированных твердых растворов.

По сравнению с синтезом твердых растворов состава $\text{Bi}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ непосредственно из оксидов металлов метод получения их из прекурсоров BiFeO_3 и PrCoO_3 является более

перспективным, поскольку конечный продукт содержит незначительное количество примесных фаз. Кроме того, синтез из прекурсоров позволяет существенно снизить температуру спекания исходных образцов.

Дальнейшим развитием разрабатываемого направления – получения перспективных сегнетомагнетиков на основе феррита висмута может быть исследование условий синтеза обогащенного висмутом парамагнитного прекурсора $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$. Возможно, твердофазное взаимодействие данного прекурсора с оксидом железа по реакции



позволит получить феррит висмута с улучшенными сегнетомагнитными характеристиками.

Работа выполнена в рамках комплексного задания 1.02 ГПНИ «Функциональные материалы и технологии, наноматериалы».

Литература

1. Макоед, И. И. Получение и физические свойства мультиферроиков: монография / И. И. Макоед. – Брест: БрГУ, 2009. – 181 с.
2. Epitaxial BiFeO_3 multiferroic thin film heterostructures / J. Wang [et al.] // Science. – 2003. – Vol. 299. – P. 1719–1722.
3. Звездин, А. К. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках / А. К. Звездин, А. П. Пятаков // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 4. – С. 465–470.
4. Пятаков, А. П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А. П. Пятаков, А. К. Звездин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 6. – С. 593–620.
5. Физико-химические свойства твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$, синтезированных с использованием различных методов / А. А. Затуно [и др.] // Труды БГТУ. – 2012. – № 3: Химия и технология неорганич. в-в. – С. 37–41.
6. Синтез, структура и физико-химические свойства твердых растворов в квазибинарной системе $\text{BiFeO}_3 - \text{PrCoO}_3$ / А. И. Клындюк [и др.] // Вести Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2012. – № 4. – С. 5–9.
7. Морозов, М. И. Особенности образования BiFeO_3 в смеси оксидов висмута и железа (III) / М. И. Морозов, Н. А. Ломанова, В. В. Гусаров // Журнал общей химии. – 2003. – Т. 73, вып. 11. – С. 1772–1776.
8. Портной, К. И. Кислородные соединения редкоземельных элементов / К. И. Портной, И. И. Тимофеева. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

Поступила 02.03.2013