

УДК 537.622

А. А. Затюпо, кандидат химических наук, ассистент (БГТУ);**Л. А. Башкиров**, доктор химических наук, профессор (БГТУ);**Г. С. Петров**, кандидат химических наук, доцент (БГТУ);**А. И. Галяс**, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению);**И. А. Великанова**, кандидат химических наук, доцент (БГТУ)**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$**

Методом твердофазных реакций синтезированы твердые растворы системы $(1-x)\text{BiFeO}_3 - x\text{NdCoO}_3$. Установлены закономерности влияния изовалентного замещения в BiFeO_3 ионов Bi^{3+} , Fe^{3+} ионами Nd^{3+} , Co^{3+} на кристаллическую структуру, намагниченность и тепловое расширение образующихся твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$. Показано, что замещение до 2% ионов Bi^{3+} , Fe^{3+} ионами Nd^{3+} и Co^{3+} в BiFeO_3 приводит лишь к частичному разрушению антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов ионов Fe^{3+} . По результатам исследования магнитных свойств установлено, что магнитные свойства образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,15$) обусловлены сосуществованием в них антиферромагнитной и ферромагнитной фаз, а образцы $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,80 \leq x \leq 1,0$) являются парамагнитными.

Solid solutions of the $(1-x)\text{BiFeO}_3 - x\text{NdCoO}_3$ system were synthesized by a solid-state reactions method. Peculiarities of the influence of isovalent substitution in BiFeO_3 of Bi^{3+} , Fe^{3+} ions by Nd^{3+} , Co^{3+} ions on the crystal structure, magnetization and thermal expansion of the forming solid solutions $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ are fixed. It is shown that the substitution up to 2% of Bi^{3+} , Fe^{3+} ions in BiFeO_3 by Nd^{3+} , Co^{3+} ions leads only to the partial destruction of the antiferromagnetic ordering of the Fe^{3+} ions magnetic moments. According to the results of the magnetic properties investigation it is found that magnetic properties of the samples $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,15$) are due to the coexistence of the antiferromagnetic and ferromagnetic phases but the samples $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,80 \leq x \leq 1,0$) reveal paramagnetic properties.

Введение. В последние десятилетия значительно увеличилось число публикаций, посвященных синтезу и исследованию свойств сегнетомагнетиков (мультиферроиков). Связь между магнитной и электрической подсистемами в сегнетомагнетиках, проявляющаяся в виде магнитоэлектрических (МЭ) эффектов, предоставляет возможность с помощью электрического поля управлять магнитными свойствами материала и наоборот. Это позволяет разрабатывать на основе мультиферроиков принципиально новые устройства магнитной памяти и спинтроники, сенсоры магнитного поля, устройства записи и считывания информации и др. [1–5].

Одной из проблем практического использования мультиферроиков является поиск материалов, проявляющих МЭ-эффект при комнатной температуре. Феррит висмута BiFeO_3 проявляет как сегнетоэлектрическое, так и антиферромагнитное упорядочение (со слабым ферромагнитным вкладом) при комнатной температуре, что открывает широкие перспективы для его практического применения. Однако магнитоэлектрические взаимодействия в объемных образцах BiFeO_3 являются низкими, что обусловлено существованием сложной пространственно-модулированной спиновой структуры циклоидного типа. Это приводит к отсут-

ствию в таких фазах линейного МЭ-эффекта. Для разрушения несоразмерной магнитной структуры используют различные приемы: приложение сильного магнитного поля, замещение в феррите висмута либо ионов Bi^{3+} , либо ионов Fe^{3+} , изготовление тонких пленок BiFeO_3 и др. Однако для наблюдения МЭ-эффекта требуются очень высокие величины магнитного поля ($\sim 200\text{кЭ}$) [1, 2, 5], поэтому говорить о практическом применении такого материала достаточно сложно. Стоит также отметить, что результаты по получению гигантских значений МЭ-эффекта, обнаруженные на тонких пленках BiFeO_3 , позже не подтвердились. В связи с этим наиболее перспективным направлением является замещение ионов в BiFeO_3 .

Целью данной работы являлось установление закономерностей влияния изовалентного замещения в BiFeO_3 ионов Bi^{3+} ионами Nd^{3+} и ионов Fe^{3+} ионами Co^{3+} на кристаллическую структуру, намагниченность и тепловое расширение образующихся твердых растворов.

Методика эксперимента. Синтез поликристаллических образцов твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($x = 0; 0,02; 0,05; 0,08; 0,10; 0,15; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,0$) осуществлен методом твердофазных реакций из оксидов Bi_2O_3 , Fe_2O_3 , Nd_2O_3 и Co_3O_4 . Порошки исходных

соединений, взятых в заданных молярных соотношениях, смешивали и мололи в течение 30 мин в планетарной мельнице с добавлением этанола. Полученную шихту с добавлением этанола прессовали под давлением 50–75 МПа в таблетки диаметром 25 мм и высотой 5–7 мм, которые затем обжигали при 800°C на воздухе в течение 8 ч. После предварительного обжига таблетки дробили, перемалывали, прессовали в бруски длиной 30 мм и сечением 5×5 мм². Условия синтеза на воздухе образцов данной системы в зависимости от состава варьировались в широких пределах: $T = 850\text{--}1250^\circ\text{C}$ и длительность от 30 мин до 8 ч. Чем больше ионов висмута замещено ионами редкоземельного элемента, тем выше была температура синтеза.

Рентгеновские дифрактограммы получали на дифрактометре D8 ADVANCE с использованием CuK_α -излучения.

Удельную намагниченность ($\sigma_{\text{уд}}$) полученных образцов при 7 и 300 К в полях до 14 Тл и удельную магнитную восприимчивость ($\chi_{\text{уд}}$) в магнитном поле 0,86 Тл в интервале температур 7–300 К измеряли вибрационным методом на универсальной высокополевой измерительной системе (Стугенгеник Лтд, Лондон) и методом Фарадея в интервале температур 77–950 К в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению.

Термическое расширение образцов исследовали на воздухе в интервале температур 300–1100 К при помощи кварцевого дилатометра в динамическом (скорость нагрева и охлаждения 3–5 К·мин⁻¹) режиме.

Результаты и их обсуждение. Результаты рентгенофазового анализа исследованных твердых растворов на основе феррита висмута представлены на рис. 1. Установлено, что при замещении в BiFeO_3 от 2 до 10 мол. % ионов Bi^{3+} ионами Nd^{3+} , а ионов Fe^{3+} ионами Co^{3+} образуется непрерывный ряд твердых растворов со структурой ромбоэдрически искаженного перовскита, о чем свидетельствует постепенное

уменьшение параметра a и увеличение угла α кристаллической решетки ромбоэдрически искаженного перовскита (табл. 1). Это связано с уменьшением эффективного ионного радиуса иона-заместителя ($r_{\text{Bi}^{3+}} = 1,20 \text{ \AA}$ [6], $r_{\text{Nd}^{3+}} = 0,99 \text{ \AA}$ [6]) при одинаковом анионном окружении, при этом эффективные ионные радиусы ионов Fe^{3+} ($r_{\text{Fe}^{3+}} = 0,67 \text{ \AA}$ [6]) и Co^{3+} ($r_{\text{Co}^{3+}} = 0,64 \text{ \AA}$ [6]) практически одинаковы. При степенях замещения $x = 0,15; 0,80; 0,85; 0,90; 0,95; 1,0$ образуются твердые растворы $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ со структурой орторомбически искаженного перовскита. При этом ряд образцов твердых растворов содержит примеси ферритов $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$, $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ и CoFe_2O_4 . О невозможности получения BiFeO_3 без примесей соединений $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$, $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ при взаимодействии оксидов висмута (III) и железа (III) свидетельствуют и многочисленные литературные данные [7–12].

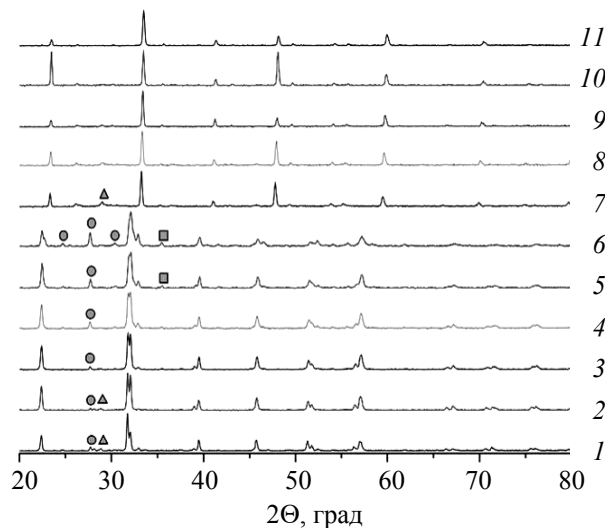


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ при различных значениях x : 1 – 0; 2 – 0,02; 3 – 0,05; 4 – 0,08; 5 – 0,10; 6 – 0,15; 7 – 0,80; 8 – 0,85; 9 – 0,90; 10 – 0,95; 11 – 1,0; ● – $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$; ▲ – $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$; ■ – CoFe_2O_4

Таблица 1

Параметры кристаллической решетки твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$

Степень замещения x	$a, \text{ \AA}$	$b, \text{ \AA}$	$c, \text{ \AA}$	Угол α , град.	$V, \text{ \AA}^3$	Структура
0	3,9650	–	–	89,437	62,324	$R (R3c)$
0,02	3,9624	–	–	89,494	62,205	$R (R3c)$
0,05	3,9590	–	–	89,522	62,048	$R (R3c)$
0,08	3,9555	–	–	89,529	61,880	$R (R3c)$
0,10	3,9527	–	–	89,568	61,752	$R (R3c)$
0,15	3,9482	3,9123	4,0332	–	62,299	$O (Pnma)$
0,80	5,3739	7,6152	5,3786	–	220,111	$O (Pnma)$
0,85	5,3695	7,5999	5,3615	–	218,791	$O (Pnma)$
0,90	5,3532	7,5820	5,3589	–	217,505	$O (Pnma)$
0,95	5,3456	7,5712	5,3522	–	216,618	$O (Pnma)$
1,0	5,3407	7,5653	5,3433	–	215,886	$O (Pnma)$

По мнению ряда авторов, образование примесных побочных продуктов $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$, $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ происходит не только при твердофазном методе синтеза, но и при получении феррита висмута по золь-гель технологии [13]. Чтобы не допустить формирования $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$, прибегают к твердофазным реакциям с большим избытком Bi_2O_3 [14]. Однако и в этом случае присутствуют примеси антиферромагнитного $\text{Bi}_2\text{Fe}_4\text{O}_9$ и парамагнитного $\text{Bi}_{25}\text{FeO}_{39}$, которые не исчезают даже после дополнительной термообработки или посредством выщелачивания в разбавленной азотной кислоте [14].

По результатам исследования магнитных свойств твердых растворов на основе феррита висмута было показано, что в зависимости от концентрации замещающего иона образуются двухфазные в магнитном отношении твердые растворы. На зависимости удельной намагниченности $\sigma_{\text{уд}}$ от T для BiFeO_3 наблюдается резко выраженный максимум в точке перехода антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов ионов Fe^{3+} в парамагнитное состояние, позволяющей определить температуру Нееля: $T_N \approx 617$ К (рис. 2).

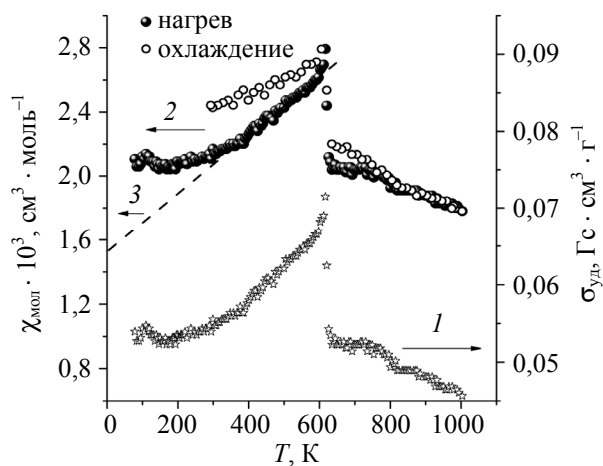


Рис. 2. Температурные зависимости удельной намагниченности $\sigma_{\text{уд}}$ (1) и молярной магнитной восприимчивости $\chi_{\text{мол}}$ (2) для BiFeO_3 в магнитном поле $H = 0,86$ Тл. Экстраполяция линейного участка уменьшения $\chi_{\text{мол}}$ от T до $T = 0$ К (3)

При 2%-ном замещении в BiFeO_3 ионов Bi^{3+} и Fe^{3+} ионами Nd^{3+} и Co^{3+} соответственно происходит лишь частичное разрушение антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов ионов Fe^{3+} . Об этом свидетельствует наличие аномалии в виде скачка на температурной зависимости удельной намагниченности, схожей с таковой для феррита BiFeO_3 (рис. 3, вставка). Температура Нееля для данного образца $T_N = 593$ К близка температуре Нееля феррита висмута $T_N = 617$ К. Следовательно, антиферро-

магнетизм твердого раствора $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ с $x = 0,02$ может быть обусловлен именно присутствием в нем фазы BiFeO_3 . При этом данные рентгенофазового анализа показывают изменение параметров кристаллической решетки при незначительном замещении ионов. Следовательно, замещение до 2% ионов Bi^{3+} , Fe^{3+} ионами Nd^{3+} и Co^{3+} приводит лишь к частичному разрушению антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов ионов Fe^{3+} .

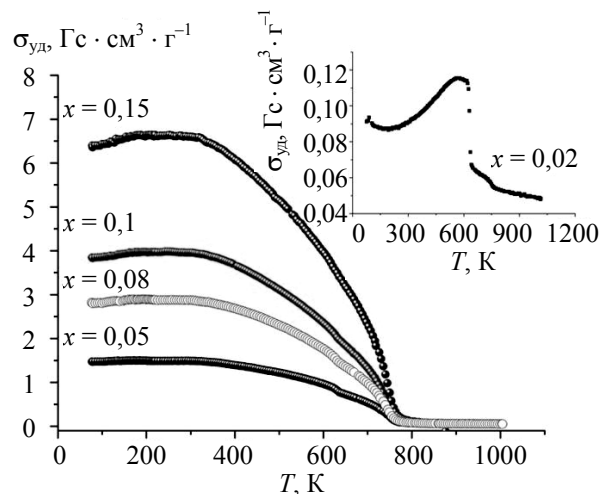


Рис. 3. Температурные зависимости удельной намагниченности $\sigma_{\text{уд}}$ для образцов ферритов-кобальтитов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ при различной степени замещения x

С ростом степени замещения x от 0,05 до 0,15 в $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ происходит увеличение $\sigma_{\text{уд}}$ (рис. 3), что может являться следствием структурного искажения при замещении в BiFeO_3 ионов Bi^{3+} ионами редкоземельных элементов с меньшим ионным радиусом, чем у ионов висмута, которое приводит к разрушению пространственно-модулированной спиновой структуры и появлению слабого ферромагнетизма. Подобное поведение также наблюдалось и у образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($\text{Ln} - \text{La}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$) при $0,05 \leq x \leq 0,3$, описанных в работе [15–17]. Следует отметить, что твердые растворы $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ с $x = 0,10$ и $0,15$ содержали примесь феррита кобальта CoFe_2O_4 , который также может вносить вклад в ферромагнетизм данных образцов. Присутствие примесной фазы феррита кобальта сильно затрудняет интерпретацию магнитных свойств данных твердых растворов. При этом есть основание считать, что ферромагнетизм образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,1 \leq x \leq 0,15$) обусловлен не только присутствием ферромагнитной фазы CoFe_2O_4 , но и слабым ферромагнетизмом основной фазы, поскольку температура Кюри T_c данных образцов (табл. 2) и феррита кобальта отличается на 20–50 К (для

CoFe_2O_4 $T_c = 793$ К [18]), а во-вторых, даже в тех образцах, где данная примесь отсутствует, наблюдается увеличение удельной намагниченности (рис. 3).

Таблица 2

Температура Кюри (T_c) и удельная намагниченность при $T = 300$ К для ферритов-кобальтитов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$

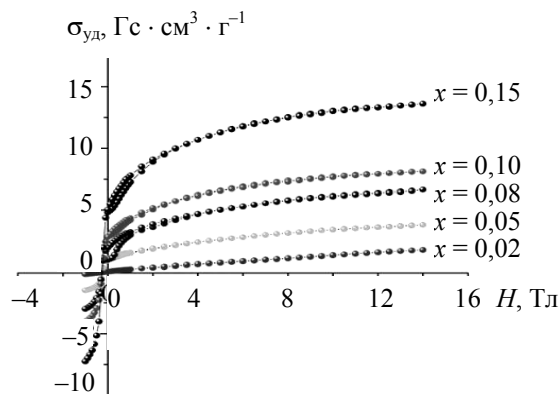
Степень замещения x	Температура Кюри T_c , К	$\sigma_{\text{уд}}$ при $T = 300$ К, $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{Г}$
0,05	772	1,49
0,08	768	2,89
0,1	766	3,96
0,15	765	6,60

Следует сказать, что температурные зависимости удельной намагниченности для полученных образцов (рис. 3) характеризуются некоторыми аномалиями, не присущими ферромагнетикам: наличием размытого максимума на зависимостях $\sigma_{\text{уд}}$ от T в интервале температур 200–350 К, где удельная намагниченность не увеличивается, а снижается при уменьшении температуры; а также существованием при температуре ≈ 620 К небольшой аномалии, совпадающей с температурой Нееля для феррита BiFeO_3 . Данные обстоятельства свидетельствуют о том, что в этих образцах, кроме ферромагнитной, присутствует также и антиферромагнитная фаза. Следовательно, в образцах $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$, у которых зависимости $\sigma_{\text{уд}}$ от T имеют вышеуказанные особенности, замещение до 15% ионов Bi^{3+} , Fe^{3+} ионами Nd^{3+} , Co^{3+} в двух катионных подрешетках BiFeO_3 не приводит к полному разрушению антиферромагнитного упорядочения магнитных моментов ионов Fe^{3+} в базовом соединении BiFeO_3 .

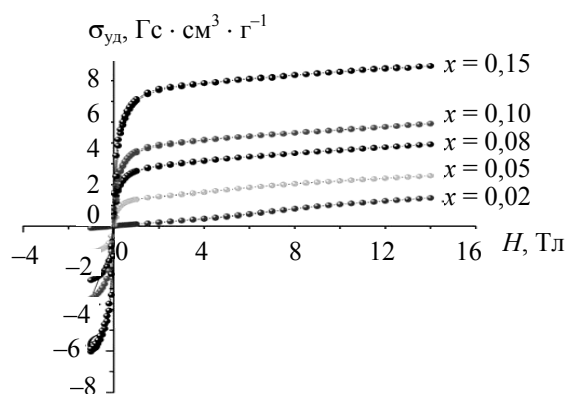
Полученные полевые зависимости удельной намагниченности (рис. 4) показали наличие самопроизвольной и остаточной намагниченности (табл. 3), что также подтверждает присутствие ферромагнитной фазы как в образцах $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ с $x = 0,05$; 0,08, в которых отсутствует примесь феррита кобальта CoFe_2O_4 , так и в образцах с $x = 0,10$; 0,15, в которых эта ферромагнитная фаза присутствует.

Таким образом, анализ температурных и полевых зависимостей удельной намагниченности для образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,15$) показывает, что их магнитные свойства определяются сосуществованием в них антиферромагнитной и ферромагнитной фаз.

Полевые зависимости удельной намагниченности для ферритов-кобальтитов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ с $x = 0,80$; 0,90 и 1,00 при температуре 300 К (рис. 5, б) показывают, что при увеличении напряженности магнитного поля до 14 Тл удельная намагниченность образцов увеличивается линейно.



а



б

Рис. 4. Зависимость удельной намагниченности ($\sigma_{\text{уд}}$) от напряженности магнитного поля (H) при температурах 5 К (а) и 300 К (б) для образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,15$) при различной степени замещения x

Таблица 3

Величины самопроизвольной удельной намагниченности (σ_0) и удельной намагниченности в магнитном поле 14 Тл (σ_{14}), удельной остаточной намагниченности (σ_r) при 7 и 300 К для $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$

Состав x	7 К			300 К	
	σ_0 , $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{Г}$	σ_{14} , $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{Г}$	σ_r , $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{Г}$	σ_0 , $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{Г}$	σ_{14} , $\text{Гс} \cdot \text{см}^3/\text{Г}$
0,02	0,2	1,8	0,02	0,3	1,4
0,05	2,4	3,8	1,0	1,5	2,4
0,08	4,8	6,7	2,0	2,9	3,9
0,10	6,5	8,1	2,8	3,9	4,9
0,15	11,3	13,6	5,0	6,6	7,7

При температуре 5 К в полях выше 2 Тл (рис. 5, а) наблюдается тенденция к выходу намагниченности на насыщение. При этом для образцов с $x = 0,8$; 0,9; 1,0 в полях 2–12 Тл наблюдается магнитный гистерезис, свидетельствующий

о наличии фазы со свойствами слабого ферромагнетика, однако при уменьшении магнитного поля от 14 Тл до нуля остаточная удельная намагниченность отсутствует.

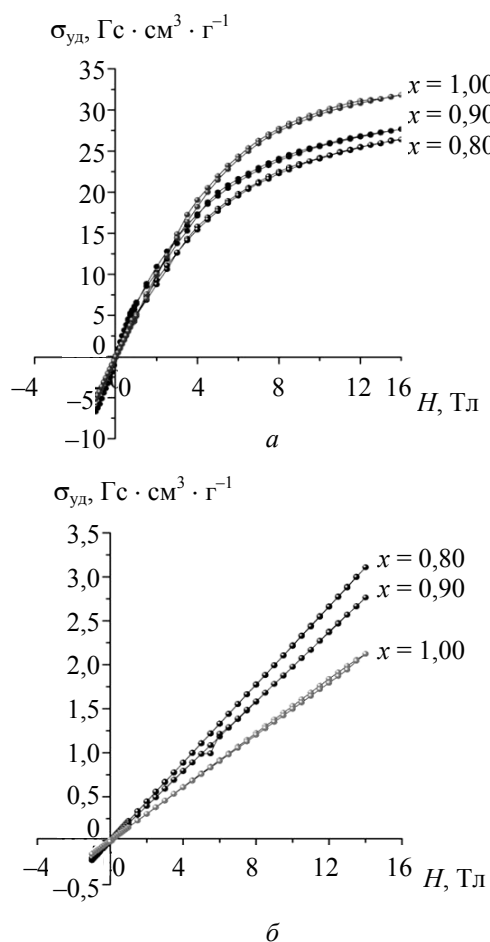


Рис. 5. Зависимость удельной намагниченности ($\sigma_{уд}$) от напряженности магнитного поля (H) при температурах 5 К (а) и 300 К (б) для образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ при различной степени замещения x

Для получения дополнительной информации о возможности дальнейшего практического использования полученных образцов системы $(1-x)\text{BiFeO}_3 - x\text{NdCoO}_3$ были проведены дилатометрические исследования. Показано, что для твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ с незначительным замещением ионов висмута и железа зависимости относительного удлинения от температуры являются практически линейными (рис. 6, а). При увеличении концентрации ионов-заместителей температурные зависимости относительного удлинения образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,80 \leq x \leq 1,0$) становятся нелинейными (рис. 6, б). Показано, что величина коэффициента линейного теплового расширения образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ в области температур 400–1000 К при увеличении степени замещения x постепенно увеличивается: от $11,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

для BiFeO_3 до $34,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ для NdCoO_3 , что, возможно, обусловлено переходом ионов кобальта из низкоспинового в промежуточно- и высокоспиновое состояние.

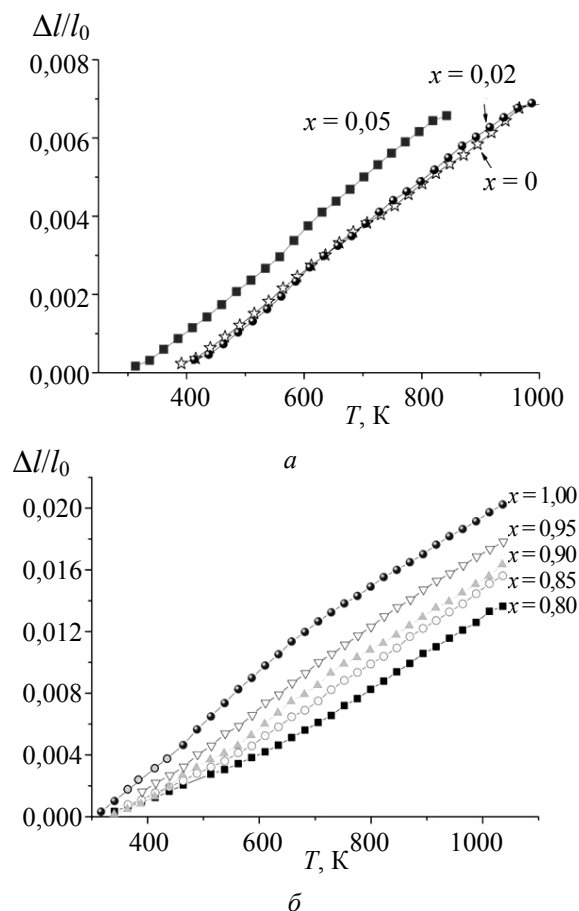


Рис. 6. Температурная зависимость относительного удлинения $\Delta l/l_0$ для образцов $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ при различной степени замещения x

Заключение. Методом твердофазных реакций синтезированы твердые растворы системы $(1-x)\text{BiFeO}_3 - x\text{NdCoO}_3$. Установлено, что ромбоэдрическая фаза устойчива при степени замещения $x \leq 0,1$, а при дальнейшем увеличении концентрации ионов-заместителей твердые растворы $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ имеют орторомбически искаженную структуру перовскита. В результате проведенных исследований магнитных свойств показано, что образцы $\text{Bi}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,15$) в магнитном отношении являются неоднородными; в них сосуществуют как ферромагнитная, так и антиферромагнитная фазы, и они являются сегнетомагнитными материалами, перспективными для практического использования в различных областях науки и техники. Таким образом, выявлен характер влияния природы и концентрации замещающих ионов на кристаллическую структуру, магнитные свойства и тепловое расширение образующихся

твердых растворов, что позволит получать функциональные материалы с заданными свойствами.

Работа выполнена в рамках задания 1.02 ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы и технологии, наноматериалы и нанотехнологии в современной технике».

Литература

1. Пятаков А. П., Звездин А. К. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики // Успехи физических наук. 2012. Т. 182, № 6. С. 593–620.

2. Catalan G., Scott J. F. Physics and Applications of Bismuth Ferrite // Advanced Materials. 2009. Vol. 21. P. 2463–2485.

3. Khikhlovskiy V. V. The renaissance of multiferroics: bismuth ferrite (BiFeO_3) – a candidate multiferroic material in nanoscience. 2010. URL: <http://www.rug.nl/zernike/education/topmastemanoscience/NS190Khikhlovskiy.pdf> (дата обращения: 22.03.2012).

4. Макоед И. И. Получение и физические свойства мультиферроиков: монография. Брест: БрГУ, 2009. 181 с.

5. Пятаков А. П. Магнитоэлектрические и флексомагнитоэлектрические эффекты в мультиферроиках и магнитных диэлектриках: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.11. Москва, 2013. 212 с.

6. Шаскольская М. П. Кристаллография. М.: Высш. шк., 1976. 391 с.

7. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск первый. Двойные системы / Н. А. Торопов [и др.]. Л.: Наука, 1969. 822 с.

8. Achenbach G. D., James W. J., Gerson R. Preparation of single-phase polycrystalline BiFeO_3 // J. Am. Ceram. Soc. 1967. V.50. P.437.

9. Maître A., François M., Gachon J. C. Experimental Study of the Bi_2O_3 – Fe_2O_3 Pseudo-Binary System // J. Phase Equilibria and Diffusion. 2004. V. 25, No. 1. P. 59–67.

10. Особенности образования BiFeO_3 в смеси оксидов висмута и железа (III) / М. И. Морозов [и др.] // Журнал общей химии. 2003. Т.73, вып. 11. С. 1772–1776.

11. Оптические свойства керамики BiFeO_3 в диапазоне частот 0,3 – 30 THz / Г. А. Командин [и др.] // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, вып. 4. С. 684–692.

12. Reaction pathways in the solid state synthesis of multiferroic BiFeO_3 / M. S. Bernardo [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. 2011. Vol. 31. P. 3047–3053.

13. Carvalho T. T., Tavares P. B. Synthesis and thermodynamic stability of multiferroic BiFeO_3 // Mater. Letters. 2008. V. 62. P. 3984–3986.

14. Room-temperature coexistence of large electric polarization and magnetic order in BiFeO_3 single crystals / D. Lebeugle [et al.] // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P.024116-1–024116-8.

15. Затюпо А. А. Физико-химические свойства твердых растворов на основе феррита висмута и кобальтитов, галлатов лантана, самария со структурой перовскита: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.21, 02.00.04. Минск, 2013. 190 с.

16. Пилейко С. В., Затюпо А. А., Башкиров Л. А. Кристаллическая структура и магнитные свойства твердых растворов ферритов-кобальтитов $\text{Bi}_{1-x}\text{Sm}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ // Физика конденсированного состояния: материалы XXI Международ. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов (Гродно, 18–19 апр. 2013 г.) / ГрГУ им. Я. Купалы [и др.]; редкол.: Г.А. Хацкевич (гл. ред.) [и др.]. Гродно: ГрГУ, 2013. С. 118–120.

17. Кристаллическая структура и магнитные свойства твердых растворов $\text{Bi}_{1-x}\text{Ln}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_3$ ($\text{Ln} = \text{La}^{3+}, \text{Nd}^{3+}, \text{Sm}^{3+}$) / А. А. Затюпо [и др.] // Молодежь в науке – 2013: материалы X Международ. науч. конф. молодых ученых, Минск, 19–22 нояб. 2013 г. Минск, 2013. С.723–727.

18. Смит Я., Вейн Х. Ферриты. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 504 с.

Поступила 03.03.2014