

PACS numbers: 75.47.Lx, 75.50.Gg, 75.78.-n, 75.85.+t, 77.22.Ch, 77.55.Nv, 77.80.B-

## Особливості магнетного впорядкування твердих розчинів і електричні властивості мультифероїків $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$ , де $R = \text{Sc}$ або $\text{Y}$

В. Т. Довгий, А. В. Боднарук\*, В. Ю. Дмитренко, В. В. Чишко

Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна НАН України,  
просп. Науки, 46,

03028 Київ, Україна

\*Інститут фізики НАН України,

просп. Науки, 46,

03028 Київ, Україна

Досліджено магнетні й електричні властивості системи твердих розчинів  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$ , де  $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$  ( $0,05 \leq x \leq 0,4$ ), синтезованих за нітратною технологією. Встановлено наявність у цих керамічних мультифероїках феромагнетного впорядкування за кімнатної температури. Концентраційні залежності намагнетованості  $M(x)$  для обох систем твердих розчинів мають екстремум; максимальна намагнетованість спостерігалась у складах при  $x = 0,15$ . Поле коерцитивності  $H_c$  для цих складів становить  $\cong 5\text{--}90$  Е. Діелектрична проникність зразків (при  $T = 300$  К) змінювалась в межах  $\cong 17\text{--}297$  на частоті у 1 кГц і на частоті у 1 МГц —  $\cong 7\text{--}25$ .

**Ключові слова:** мультифероїки, феромагнетики, намагнетованість, співіснування магнетних фаз, діелектрична проникність.

The magnetic and electrical properties of the system of solid solutions  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$ , where  $R = \text{Sc}$  or  $\text{Y}$  ( $0.05 \leq x \leq 0.4$ ), synthesized by nitrate

Corresponding author: Volodymyr Tymofiyovych Dovgyi

E-mail: [vladimirdovgii@gmail.com](mailto:vladimirdovgii@gmail.com)

Donetsk Institute for Physics and Engineering Named after O. O. Galkin, N.A.S. of Ukraine,  
46 Nauky Ave., UA-03028 Kyiv, Ukraine

\*Institute of Physics, N.A.S. of Ukraine,  
46 Nauky Ave., UA-03028 Kyiv, Ukraine

Citation: V. T. Dovgyi, A. V. Bodnaruk, V. Yu. Dmytrenko, and V. V. Chyshko, Features of Magnetic Ordering of Solid Solutions and Electrical Properties of Multiferroics  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$ , where  $R = \text{Sc}$  or  $\text{Y}$ , *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 12: 1565–1573 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.12.1565](https://doi.org/10.15407/mfint.44.12.1565)

technology are studied. The presence of ferromagnetic ordering in these ceramic multiferroics at room temperature is established. The concentration dependences of the magnetization  $M(x)$  for both systems of solid solutions have an extremum; the maximum magnetization is observed in the compositions at  $x = 0.15$ . The coercivity field  $H_c$  for these compositions is of  $\cong 5\text{--}90$  Oe. The dielectric permeability of the samples (at  $T = 300$  K) varies in the range  $\cong 17\text{--}297$  at a frequency of 1 kHz, and at a frequency of 1 MHz, it varies in the range  $\cong 7\text{--}25$ .

**Key words:** multiferroics, ferromagnets, magnetization, coexistence of magnetic phases, dielectric permeability.

(Отримано 17 серпня 2022 р.; остаточн. варіант — 23 вересня 2022 р.)

## 1. ВСТУП

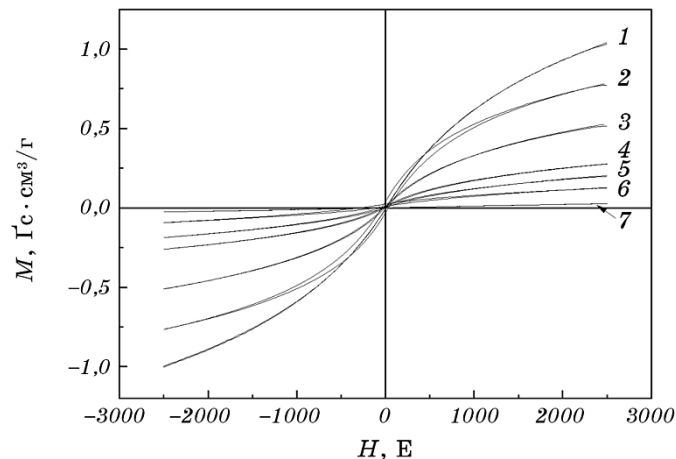
В даний час до матеріалів, в яких спостерігається взаємозв'язок магнетних та електричних властивостей, проявляється великий інтерес. Зокрема, до систем твердих розчинів на основі  $\text{BiFeO}_3$ . Інтерес до даної тематики зумовлений фундаментальними властивостями мультифероїків, а також очікується можливість практичних застосувань у таких областях як спінтроніка, системи оброблення інформації, сенсорна техніка [1–3]. Мультифероїк  $\text{BiFeO}_3$  викликає найбільший інтерес, оскільки він має температури антиферомагнетного (при  $T_N \sim 643$  K) і сегнетоелектричного (при  $T_c \sim 1083$  K) впорядкувань вище кімнатної. Однак, через існування просторової спін-модульованої структури циклоїдного типу з довжиною хвилі 62 нм, відсутній магнетоелектричний ефект. Існують різні способи руйнування або придушення гармонічності спінової циклоїди, наприклад, одержання тонких плівок з  $\text{BiFeO}_3$  частковим заміщенням йонів Bi катіонами рідкісноземельних елементів або йонів Fe катіонами 3d-перехідних елементів [1–7].

Нами досліджувалися системи твердих розчинів  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$  ( $\text{BFO}-x\text{RMO}$ ) ( $0,1 \leq x \leq 0,4$ ), де  $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ . Структурні зміни в твердих розчинах  $\text{BFO}-\text{YMO}$  досліджені в роботах [4–6], а магнетні та діелектричні властивості цих твердих розчинів в [5, 6]. Для твердих розчинів  $\text{BFO}-\text{ScMO}$  даних значно менше. Очікується, що сильно спотворені ромбоєдричні кристалічні структури ( $R3c$ ) є характерними для  $\text{BFO}$ , при заміщеннях йонів  $\text{Bi}^{3+}$  йонами  $\text{Y}^{3+}$  або  $\text{Sc}^{3+}$ , які відбуватимуться в А-підґратниці. В роботі [4] показано, що при малих заміщеннях  $\text{Bi}^{3+}$  на  $\text{Y}^{3+}$  ( $x \leq 0,1$ ) зберігається ромбоєдрична структура перовскіту  $R3c$ . При збільшенні вмісту  $\text{Y}^{3+}$  до  $x = 0,3$  переважає орторомбічна фаза  $Pbnt$ , а при  $x = 0,4$  — моноклінна фаза  $C2$ . В роботі [5] показано, що в синтезованих нанокерамічних зразках  $(1-x)\text{BFO}-x\text{YMO}$  в діапазоні заміщень  $0,1 \leq x \leq 0,2$  співіснують фази  $R3c$  і  $Pbnt$ . Йон  $\text{Y}^{3+}$  з меншим йонним радіусом, ніж у йона  $\text{Bi}^{3+}$ , сильно дестабілізує  $R3c$  фазу, що понижуює фактор толерантності та збі-

льшує кут нахилу октаедрів. Коли спотворення досягають верхньої межі ромбоєдричної структури, і вона стає нестійкою, пониження симетрії викликає перехід до орторомбічної  $Pbnm$  фази. Йонний радіус  $Sc^{3+}$  ще менше, ніж у  $Y^{3+}$ , тому в складах  $(1-x)BFO-xScMO$  спотворення кристалічної структури повинні бути ще більше.

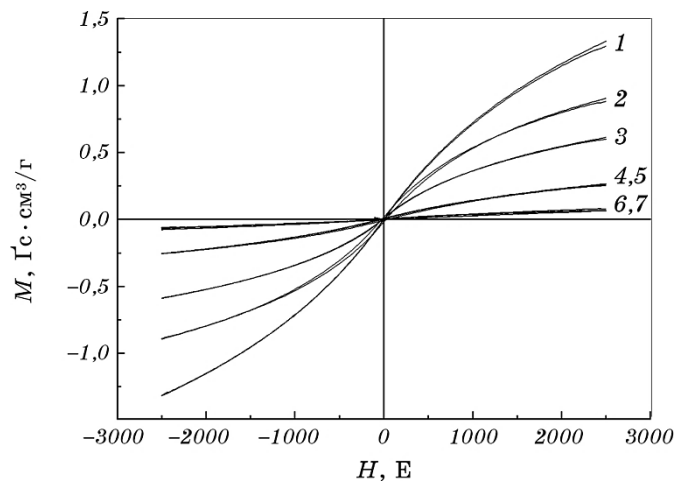
В роботі [7] показано, що при малих заміщеннях йонів Феруму  $Fe^{3+}$  на йони Мангану  $Mn^{3+}$  в BFO спостерігається зростання залишкової намагнетованості ( $M_r$ ). Максимального значення  $M_r$  в цій роботі досягає при  $x = 0,03$ . При подальшому збільшенні  $x$  відбувається спад  $M_r$  до рівня BFO. У той же час дослідження локальної структури  $Bi(Fe-Mn)O_3$  свідчать про співіснування двох кристалографічних фаз  $R3c$  і  $Pbnm$  в діапазоні заміщень  $0,03 < x < 0,2$ . Виникнення залишкової намагнетованості в складах  $(1-x)BFO-xYMO$  було виявлено за кімнатної температури і пояснено на основі часткового руйнування просторово-модульованої спінової циклоїди [6, 7]. У нанорозмірних мультифероїках  $(1-x)BFO-xYMO$  склад  $x = 0,15$  містить 61,77% фази  $R3c$  і 38,23% фази  $Pbnm$ , а склад  $x = 0,2$  — 52,42% і 47,58% відповідно [5]. Таким чином, з ростом  $x$  відбувається перерозподіл обсягів ( $V$ ) співіснуючих фаз:  $V(R3c)$  зменшується, а  $V(Pbnm)$  збільшується.

Мета роботи — вивчення впливу одночасного заміщення йонів  $Bi^{3+}$  йонами  $Sc^{3+}$  або  $Y^{3+}$  та йонів  $Fe^{3+}$  йонами  $Mn^{3+}$  на магнетні та електричні властивості мультифероїків  $(1-x)BiFeO_3-xScMnO_3$  і



**Рис. 1.** Криві магнетування  $M(H)$  для твердих розчинів системи  $(1-x)BFO-xScMO$ , виміряні за  $T = 300$  К для різних значень  $x$ : 1 — 0,15, 2 — 0,2, 3 — 0,25, 4 — 0,3, 5 — 0,35, 6 — 0,4, 7 — 0,1.

**Fig. 1.** Magnetization curves  $M(H)$  for solid solutions of the system  $(1-x)BFO-xScMO$  measured at  $T = 300$  K for different values of  $x$ : 1—0.15, 2—0.2, 3—0.25, 4—0.3, 5—0.35, 6—0.4, 7—0.1.



**Рис. 2.** Криві магнетування  $M(H)$  для зразків системи  $(1-x)\text{BFO}-x\text{YMO}$ , виміряні за  $T = 300\text{ K}$  для різних значень  $x$ : 1 — 0,15, 2 — 0,1, 3 — 0,05, 4 — 0,25, 5 — 0,2, 6 — 0,3, 7 — 0,35.

**Fig. 2.** Magnetization curves  $M(H)$  for samples of the system  $(1-x)\text{BFO}-x\text{YMO}$  measured at  $T = 300\text{ K}$  for different values of  $x$ : 1—0.15, 2—0.1, 3—0.05, 4—0.25, 5—0.2, 6—0.3, 7—0.35.

$(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{YMnO}_3$ .

## 2. ПРИГОТУВАННЯ ЗРАЗКІВ

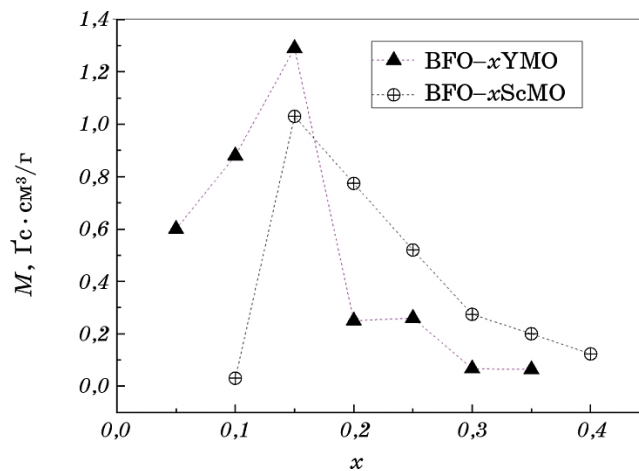
Зразки керамік складів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,4$ ), де  $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ , були одержані за нітратної технології. Вихідними речовинами для одержання даних складів служили нітрати Бісмуту, Феруму, Мангану, Скандію й Ітрію. Одержаний продукт для розкладання нітратів нагрівали за температур у  $200\text{--}500^\circ\text{C}$ . Після перетирання з одержаного продукту були спресовані таблетки  $\varnothing 8\text{ мм}$  і товщиною  $d = 1,5\text{ мм}$  для кожного значення  $x$ . Таблетки піддавали відпалу при  $T = 850^\circ\text{C}$ , 10 хвилин на повітрі.

Рентгенофазова аналіза здійснювалася на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-1,5 (випромінення  $\text{CuK}\alpha$ ). Одержані дифрактограми підтверджують про співіснування двох кристалографічних фаз  $R3c$  і  $P6mm$  в сполуках  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$ , де  $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$  при концентраціях  $x = 0,1, 0,15$  і  $0,2$ .

## 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Запис кривих магнетування проводили за кімнатної температури

на вібраційному магнетометрі LDJ-9500 в магнетних полях  $H = \pm 2,5$  кЕ. Виміри проводили для систем твердих розчинів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) за  $T = 300$  К. Результати вимірювань польових залежностей намагнетованості  $M(H)$  за  $T = 300$  К для керамічних зразків твердих розчинів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{ScMO}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,4$ ) представлені на рис. 1. Характер кривих магнетування свідчить про те, що ці тверді розчини за кімнатної температури проявляють феромагнетні властивості. Результати вимірювань  $M(H)$  для керамічних зразків твердих розчинів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{YMO}$  ( $0,05 \leq x \leq 0,35$ ) представлені на рис. 2. Характер кривих, також як і для твердих розчинів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{ScMO}$ , свідчить про прояв феромагнетних властивостей за кімнатної температури. По характеру кривих магнетування (рис. 1, 2) можна зробити висновок, що сполуки  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) — феромагнетики, чутливі до слабого магнетного поля. Величина коерцитивної сили  $H_c$  для цих сполук змінюється в межах від  $\sim 5$  Е до 90 Е. Несиметричність петель магнетної гістерези щодо  $H = 0$  свідчить про те, що, крім феромагнетної фази, в системах твердих розчинів  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) є і антиферомагнетне впорядкування (через дію обмінної анізотропії між феромагнетною та антиферомагнетною фазою). Перевага зразків цих композиційних систем у тому, що намагнетованість у малих магнетних полях ( $\sim 2$  кЕ) значно більша, ніж намагнетованість зразків із частковим заміщенням йонів Бісмуту в низці тривалентних або двовалентних йонів, а також із частковим



**Рис. 3.** Концентраційні залежності намагнетованості  $M(x)$  зразків системи твердих розчинів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) при  $H = 2,5$  кЕ.

**Fig. 3.** Concentration dependences of magnetization  $M(x)$  of samples of solid solutions system  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $R = \text{Sc}$  or  $\text{Y}$ ) at  $H = 2.5$  kOe.

**ТАБЛИЦЯ 1.** Діелектричні параметри зразків  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{YMnO}_3$ , виміряні на частотах 1 кГц (Е7-8) і 1 МГц (Е7-11).**TABLE 1.** Dielectric parameters of samples  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{YMnO}_3$ , measured at frequencies of 1 kHz (E7-8) and 1 MHz (E7-11).

$x$	$\text{tg}\delta_x$	$G_x$ , мкСм	$C_x$ , пФ	$C_{\text{п}}$ , пФ	$\varepsilon_x \pm \Delta\varepsilon$
1 кГц (Е7-8)					
0	0,26	0,05	15,2	0,90	$16,9 \pm 0,2$
0,05	0,40	2,0	21,2	0,90	$23,6 \pm 0,3$
0,10	0,20	1,28	50,4	0,98	$51,4 \pm 0,5$
0,15	0,10	> 10	57,24	0,96	$59,6 \pm 0,5$
0,20	0,15	1,25	135,6	0,90	$150,7 \pm 1,5$
0,25	0,18	3,44	37,5	0,93	$40,3 \pm 0,5$
0,30	0,81	2,4	296,5	1,0	$296,5 \pm 3,0$
0,35	0,08	2,5	179,4	0,90	$199,3 \pm 2,0$
0,40	0,20	2,1	112,5	0,90	$125,0 \pm 1,5$
1 МГц (Е7-12)					
0	0,16	1,84	6,39	0,90	$7,1 \pm 0,1$
0,05	0,18	1,75	15,5	0,85	$18,2 \pm 0,2$
0,10	0,09	9,45	18,8	0,85	$22,1 \pm 0,2$
0,15	0,42	15,5	17,23	0,84	$20,5 \pm 0,2$
0,20	0,25	43,6	20,0	0,80	$25,0 \pm 0,2$
0,25	0,13	0,66	8,53	0,93	$9,2 \pm 0,1$
0,30	0,20	39,14	20,1	0,91	$22,1 \pm 0,2$
0,35	0,27	33,5	19,25	0,90	$21,4 \pm 0,2$
0,40	0,32	46,7	20,9	0,90	$23,2 \pm 0,2$

заміщенням йонів Fe (у магнетному полі  $\sim 20-60$  кЕ) [7].

Концентраційні залежності намагнетованості  $M(x)$  (рис. 3), одержані з кривих магнетування за кімнатної температури в зовнішньому магнетному полі  $H = 2,5$  кЕ, мають немонотонний характер: максимального значення  $M(x)$  досягають склади з концентрацією  $x = 0,15$ . Причини такої поведінки намагнетованості  $M(x)$  в системах твердих розчинів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) наступні. У сполуках  $\text{Bi}_{1-x}\text{R}_x\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{O}_3$  спостерігається співіснування двох кристалографічних фаз:  $R\text{Zc}$  і  $Pbnt$ , кожна з цих фаз має різні за величиною намагнетованості  $M$ ; при цьому  $M(R\text{Zc}) > M(Pbnt)$ .

Зі зростанням вмісту ітрію, скандію та марганцю відбувається перерозподіл обсягів цих фаз:  $V(R\text{Zc})$  зменшується, а  $V(Pbnt)$  збі-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Діелектричні параметри зразків  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{ScMnO}_3$ , виміряні на частотах 1 кГц (Е7-8) і 1 МГц (Е7-11).**TABLE 2.** Dielectric parameters of samples  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{ScMnO}_3$ , measured at frequencies of 1 kHz (E7-8) and 1 MHz (E7-11).

$x$	$\text{tg}\delta_x$	$G_x, \text{нСм}$	$C_x, \text{пФ}$	$C_{\text{п}}, \text{пФ}$	$\varepsilon_x \pm \Delta\varepsilon$
1 кГц (Е7-8)					
0,10	0,07	32,5 нСм	39,5	0,97	$40,7 \pm 0,5$
0,20	0,03	1,47	72,4	0,99	$73,1 \pm 0,7$
0,25	0,02	2,7	96,3	0,99	$97,3 \pm 1,0$
0,30	0,04	1,45	42,6	0,98	$43,5 \pm 0,5$
0,35	0,06	5,8 нСм	20,9	0,99	$21,1 \pm 0,3$
0,40	0,08	8,2 нСм	16,6	0,99	$16,8 \pm 0,3$
1 МГц (Е7-12)					
0,10	0,06	6,0 нСм	15,13	0,80	$18,9 \pm 0,3$
0,20	0,07	2,92	7,0	0,81	$8,6 \pm 0,3$
0,25	0,64	33,2	8,21	0,80	$10,3 \pm 0,3$
0,30	0,26	10,9	8,3	0,83	$10,0 \pm 0,3$
0,35	0,57	23,7	7,65	0,90	$8,5 \pm 0,3$
0,40	0,25	11,33	7,05	0,90	$7,8 \pm 0,3$

льшується. Тому сумарний магнетний момент при деякій концентрації спільного заміщення ( $x_c$ ) досягає максимуму, а при подальшому збільшенні  $x$  починає зменшуватися. Аналізуючи концентраційні залежності намагнетованості  $M(x)$  (рис. 3) і беручи до уваги (враховуючи) величини йонних радіусів А-катіонів, Å: 1,03 — для  $\text{Bi}^{3+}$  та йонів заміщення, 0,90 — для  $\text{Y}^{3+}$ , 0,745 — для  $\text{Sc}^{3+}$  можна зробити важливий висновок. Величина намагнетованості та деформації кристалічної ґратниці при малих концентраціях  $x$  більше для йонів заміщення з великим йонним радіусом ( $\text{Y}^{3+}$ ), а при великих концентраціях  $x$  навпаки, намагнетованість і деформації більше для йонів заміщення з меншим йонним радіусом ( $\text{Sc}^{3+}$ ).

Діелектричні властивості зразків складів  $(1-x)\text{BFO}-x\text{ScMO}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,4$ ) і  $(1-x)\text{BFO}-x\text{YMO}$  ( $0,05 \leq x \leq 0,35$ ) вимірювались за кімнатної температури в конденсаторному осередку з обкладинками у вигляді дисків діаметром 8 мм за допомогою  $RLC$ -метрів Е7-8 (частота 1 кГц) і Е7-12 (1 МГц). Діелектрична проникність  $\varepsilon_x$  визначалася як відношення ємності осередку зі зразком  $C_x$  до ємності осередку з повітрям  $C_{\text{п}}$ :

$$\varepsilon_x = C_x / C_{\text{п}}$$

Тут  $C_x = \varepsilon_x \varepsilon_0 S/d$ ,  $C_n = \varepsilon_n \varepsilon_0 S/d$ , де  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $S$  — площа обкладинок і  $d$  — відстань між обкладинками конденсатора. Ця формула справедлива, оскільки діелектрична проникність повітря  $\varepsilon_n = 1$  з достатньою точністю. Крім діелектричної проникності  $\varepsilon$ , прилади дають змогу виміряти тангенс кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$  і адмітанс  $G$  — аналог провідності. Результати вимірювань наведено в табл. 1 і 2.

#### 4. ВИСНОВКИ

У системі твердих розчинів  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$ , де  $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$  ( $0,05 \leq x \leq 0,4$ ), виявлено феромагнетне впорядкування за кімнатної температури. Руйнування або придушення гармонічності спінової циклоїди приводить до росту намагнетованості і збільшення діелектричної проникності.

За характером петель магнетної гістерези можна зробити висновок, що сполуки  $(1-x)\text{BFO}-x\text{RMO}$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) — феромагнетики, чутливі до слабого магнетного поля. Ця властивість робить їх перспективними для використання в пристроях перемикування електричної поляризації магнетним полем і, навпаки, перемикування намагнетованості електричним полем. Величина коерцитивної сили  $H_c$  для цих сполук змінюється в межах від  $\sim 5$  Е до 90 Е.

Несиметричність петель магнетної гістерези щодо  $H = 0$  свідчить про те що, крім феромагнетної фази, в системах твердих розчинів  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) присутнє і антиферомагнетне впорядкування.

Встановлено, що концентраційні залежності намагнетованості  $M(x)$  мають максимуми для обох систем при  $x = 0,15$ . Величина намагнетованості при малих концентраціях  $x$  більше для йонів заміщення з великим йонним радіусом ( $\text{Y}^{3+}$ ), а при великих концентраціях  $x$  навпаки, намагнетованість більше для йонів заміщення з меншим йонним радіусом ( $\text{Sc}^{3+}$ ).

Виявлено, що діелектрична проникність зразків  $(1-x)\text{BiFeO}_3-x\text{RMnO}_3$  ( $R = \text{Sc}$  або  $\text{Y}$ ) змінювалася в межах  $\sim 17-297$  на частоті 1 кГц і на частоті 1 МГц —  $\sim 7-25$ .

Отже, одночасне заміщення в  $\text{BiFeO}_3$  йонів  $\text{Bi}^{3+}$  на  $\text{Sc}^{3+}$  або  $\text{Y}^{3+}$ , а також йонів  $\text{Fe}^{3+}$  на  $\text{Mn}^{3+}$  відіграє важливу роль в поліпшенні магнетних і магнетоелектричних властивостей мультифероїків, що може представляти практичний інтерес для використання цих систем твердих розчинів у різних багатофункціональних пристроях.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. П. Пятаков, А. К. Звездин, *Успехи физических наук*, **182**, № 6: 593



- (2012).
2. S. Dong, J.-M. Liu, S.-W. Cheong, and Zh. Ren, *Adv. Phys.*, **60**, Nos. 5–6: 519 (2015).
  3. M. Fiebig, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**: R123 (2005).
  4. А. В. Назаренко, А. Г. Разумная, М. Ф. Куприянов, Ю. В. Кабилов, А. Г. Рудская, П. Ю. Тесленко, Н. Б. Кофанова, *Физика твёрдого тела*, **53**, № 8: 1523 (2011).
  5. S. N. Tripathy, K. K. Mishra, S. Sen, B. G. Mishra, D. K. Pradhan, R. Palai, and D. K. Pradhan, *J. Appl. Phys.*, **114**: 144104 (2013).
  6. R. Pandey, L. K. Pradhan, P. Kumar, and M. Kar, *Ceram. Int.*, **44**, No. 15: 18609 (2018).
  7. L. Chen, L. Zheng, Y. He, J. Zhang, Z. Mao, and X. Chen, *J. Alloys Comp.*, **633**: 216 (2015).

## REFERENCES

1. A. P. Pyatakov and A. K. Zvezdin, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **182**, No. 6: 593 (2012) (in Russian).
2. S. Dong, J.-M. Liu, S.-W. Cheong, and Zh. Ren, *Adv. Phys.*, **60**, Nos. 5–6: 519 (2015).
3. M. Fiebig, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**: R123 (2005).
4. А. В. Назаренко, А. Г. Разумная, М. Ф. Куприянов, Ю. В. Кабилов, А. Г. Рудская, П. Ю. Тесленко, and Н. В. Кофанова, *Fizika Tverdogo Tela*, **53**, No. 8: 1523 (2011) (in Russian).
5. S. N. Tripathy, K. K. Mishra, S. Sen, B. G. Mishra, D. K. Pradhan, R. Palai, and D. K. Pradhan, *J. Appl. Phys.*, **114**: 144104 (2013).
6. R. Pandey, L. K. Pradhan, P. Kumar, and M. Kar, *Ceram. Int.*, **44**, No. 15: 18609 (2018).
7. L. Chen, L. Zheng, Y. He, J. Zhang, Z. Mao, and X. Chen, *J. Alloys Comp.*, **633**: 216 (2015).