

04,05

## Кристаллохимия и магнитные свойства гексаферрита $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ при гетеровалентном замещении железа цирконием

© В.Г. Костишин<sup>1</sup>, В.В. Коровушкин<sup>1</sup>, И.М. Исаев<sup>1</sup>, Д.В. Салогуб<sup>1</sup>, С.В. Труханов<sup>2</sup>, А.В. Труханов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва, Россия

<sup>2</sup> НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

E-mail: truhanov86@mail.ru

Поступила в Редакцию 20 октября 2021 г.

В окончательной редакции 20 октября 2021 г.

Принята к публикации 21 октября 2021 г.

Синтезированы и исследованы образцы гексаферрита бария М-типа  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  с частичным замещением ионов железа ионами циркония (концентрация замещения до 10 at.%). Исследования кристаллохимических особенностей, фазового состава и магнитных свойств проведены с помощью методов дифракции рентгеновских лучей, мессбауэровской спектроскопии и вибрационной магнитометрии. Показано наличие ограниченного гетеровалентного изоморфизма по механизму  $2\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Zr}^{4+} + \text{Fe}^{2+}$ . Установлен предел гетеровалентного изоморфного замещения ионами циркония в гексаферрите бария ( $x = 0.6$ ). Отмечено, что дополнительные сексты в мессбауэровских спектрах гексаферрита бария могут образовываться при локализации ионов  $\text{Zr}^{4+}$  преимущественно в позициях  $12k$  и  $4f_2$  за счет фрустрации магнитной структуры. Установлена корреляция химического состава (концентрация ионов циркония), примесного фазообразования, особенностей распределения заместителей по кислородным координациям и магнитных свойств объектов исследований.

**Ключевые слова:** гексаферрит бария М-типа, гетеровалентное замещение, ограниченный изоморфизм, мессбауэровская спектроскопия, магнитные свойства.

DOI: 10.21883/FTT.2022.02.51927.225

### 1. Введение

Сложные оксиды ионов переходных металлов привлекают внимание исследователей сочетанием оптимальных магнитных и электрических свойств, а также ввиду химической стабильности и коррозионной стойкости [1–3]. Гексагональные ферриты со структурой магнетоплюмбита (М-тип) являются одними из наиболее активно исследуемых и широко применяемых на практике сложных оксидов ионов железа [4–8]. Изменение химического состава гексаферритов является эффективным способом получения необходимых магнитных, электрических и физических свойств [9–11] и их использования для повышения качества работы устройств магнитоэлектроники [12], радиоэлектроники и СВЧ-электроники [13]. Это объясняется их широкой изоморфной емкостью и разнообразием изоморфных элементов, которые могут варьироваться в широком диапазоне. В большинстве случаев при этом используют изовалентные замещения ионов железа, ионами металлов с близким ионным радиусом и степенью окисления  $3+$ , поскольку при этом зарядовый баланс реализуется довольно легко (сохранение закона электронейтральности) [14,15]. При этом замещения ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в структуре гексаферритов такими ионами как  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Sc}^{3+}$  используют для повышения коэрцитивной силы и, соответственно, магнитотвердости, что влияет на качества постоянных магнитов, позволяет

устройствам работать в сильных магнитных полях и использовать их мультиферроидные свойства [12,16]. Использование изоморфных элементов  $\text{Ga}^{3+}$ ,  $\text{In}^{3+}$  и ряда других элементов, наоборот, обеспечивает магнитопроводимость ферритов, которые применяются для магнитопроводов, работающих в магнитных полях до 100 МГц в импульсном режиме, для магнитных усилителей, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности и других устройств [17,18]. Необычно ведет себя изоморфный элемент  $\text{La}^{3+}$ , увеличивая намагниченность насыщения при увеличении  $x$  до 0.1, увеличивая при этом магнитовердость, а затем уменьшая ее при дальнейшем увеличении  $x$  [19]. Допирование гексаферрита медью уменьшает как намагниченность насыщения, так и коэрцитивную силу [20].

При гетеровалентном замещении ионов  $\text{Fe}^{3+}$  ионами  $\text{M}^{4+}$ , или  $\text{M}^{2+}$  зарядовый баланс может реализовываться несколькими вариантами. При изоморфных элементах  $\text{M}^{4+}$  может добавляться ион  $\text{M}^{2+}$  по схеме  $2\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{M}^{4+} + \text{M}^{2+}$ , например,  $\text{Ti}^{4+} + \text{Co}^{2+}$  [21] и, наоборот, цинк и ниобий [22], магний и цирконий [23], а также по схеме  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Li}^{+}$ . Кроме того, электронейтральность при допировании элементами  $\text{M}^{4+}$  может обеспечиваться восстановлением доли железа до  $\text{Fe}^{2+}$  с частичным электронным обменом  $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$  [24], а при допировании ионами  $\text{M}^{2+}$  сопровождаться частичным окислением железа до состояния  $\text{Fe}^{4+}$  [25], а также

зарядовой компенсации за счет катионных вакансий при изоморфных элементах  $M^{4+}$ , как в маггемите. Все виды замещения приводят к фрустрации магнитной структуры и ослаблению обменных взаимодействий (из-за уменьшения числа связей Fe–O–Fe).

В связи с этим, целью настоящей работы является установление катионного распределения в гексаферрите  $BaZr_xFe_{12-x}O_{19}$  (BaM-Zr), определение предела изоморфизма, механизма зарядовой компенсации и влияние изоморфного циркония на его магнитные свойства.

## 2. Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили образцы поликристаллических гексаферритов бария  $BaZr_xFe_{12-x}O_{19}$  или BaM-Zr, где  $x = 0.1; 0.3; 0.6; 0.9; 1.2$ . Образцы изготавливались по керамической технологии из оксидов  $Fe_2O_3$ ,  $ZrO_2$  и карбоната  $BaCO_3$  квалификации „ОСЧ“. Предварительный исходный состав подвергался синтезирующему обжигу на воздухе при  $1200^\circ C$  (6 h), а затем спекался при  $1300^\circ C$  (6 h). После спекания образцы медленно охлаждались в печи ( $\sim 100^\circ/h$ ) [26]. Мёссбауэровские спектры образцов BaM-Zr снимались на спектрометре Ms-1104 Em с постоянным ускорением, источником  $\gamma$ -излучения служил  $Co^{57}$  в матрице хрома. Мёссбауэровские спектры снимались при комнатной температуре. Изомерный (химический) сдвиг рассчитывался относительно  $\alpha$ -Fe. Использовались порошковые пробы измельченные до  $0.05\text{--}0.07\text{ mm}$  из спеченных ферритов. Обработка спектров проводилась по программе „Univem Ms“, показывающая лучшую сходимость экспериментального спектра и модели разложения по параметру  $\min \chi^2$ . Магнитные параметры: удельную намагниченность  $\sigma_s$ , остаточную намагниченность  $\sigma_r$ , коэрцитивную силу  $H_c$ , полевые зависимости измеряли на вибрационном магнитометре VSM 250 в магнитном поле напряженностью до 20 кОе при комнатной температуре. Фазовый состав синтезированных образцов был исследован методом рентгеновской дифракции на дифрактометре при 300 К (излучение  $CuK\alpha$ ,  $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ), работающего в диапазоне углов дифракции  $2\theta$  от  $20$  до  $80^\circ$ .

## 3. Результаты и обсуждение

Анализ фазового состава синтезированных гексаферритов на их однофазность и возможность не полного вхождения ионов  $Zr^{4+}$  в решетку гексаферрита (рис. 1) показал, что начиная с  $x = 0.6$  можно уверенно утверждать, что цирконий не полностью входит в решетку, а частично остается в виде  $ZrO_2$ , и при  $x = 0.3$  трудно диагностируется. С возрастанием содержания циркония содержание фазы увеличивается, но не значительно. Можно считать, что содержание  $x = 0.6$  является пределом изоморфного вхождения циркония в решетку

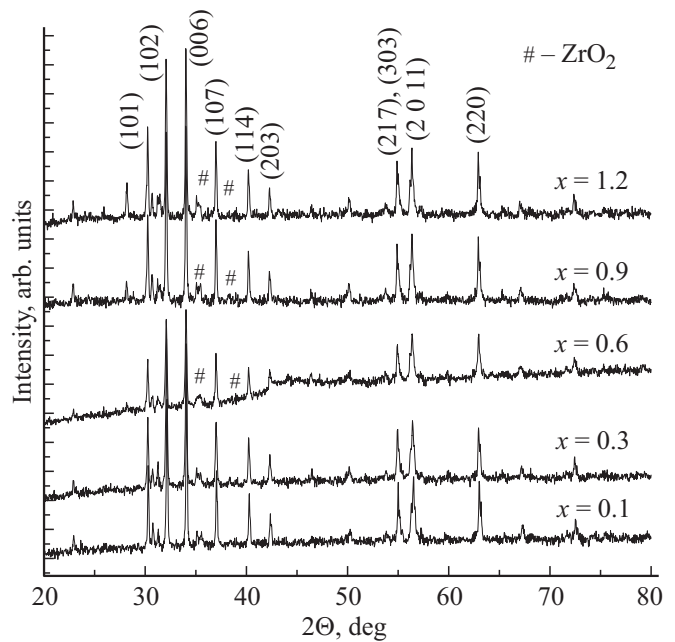
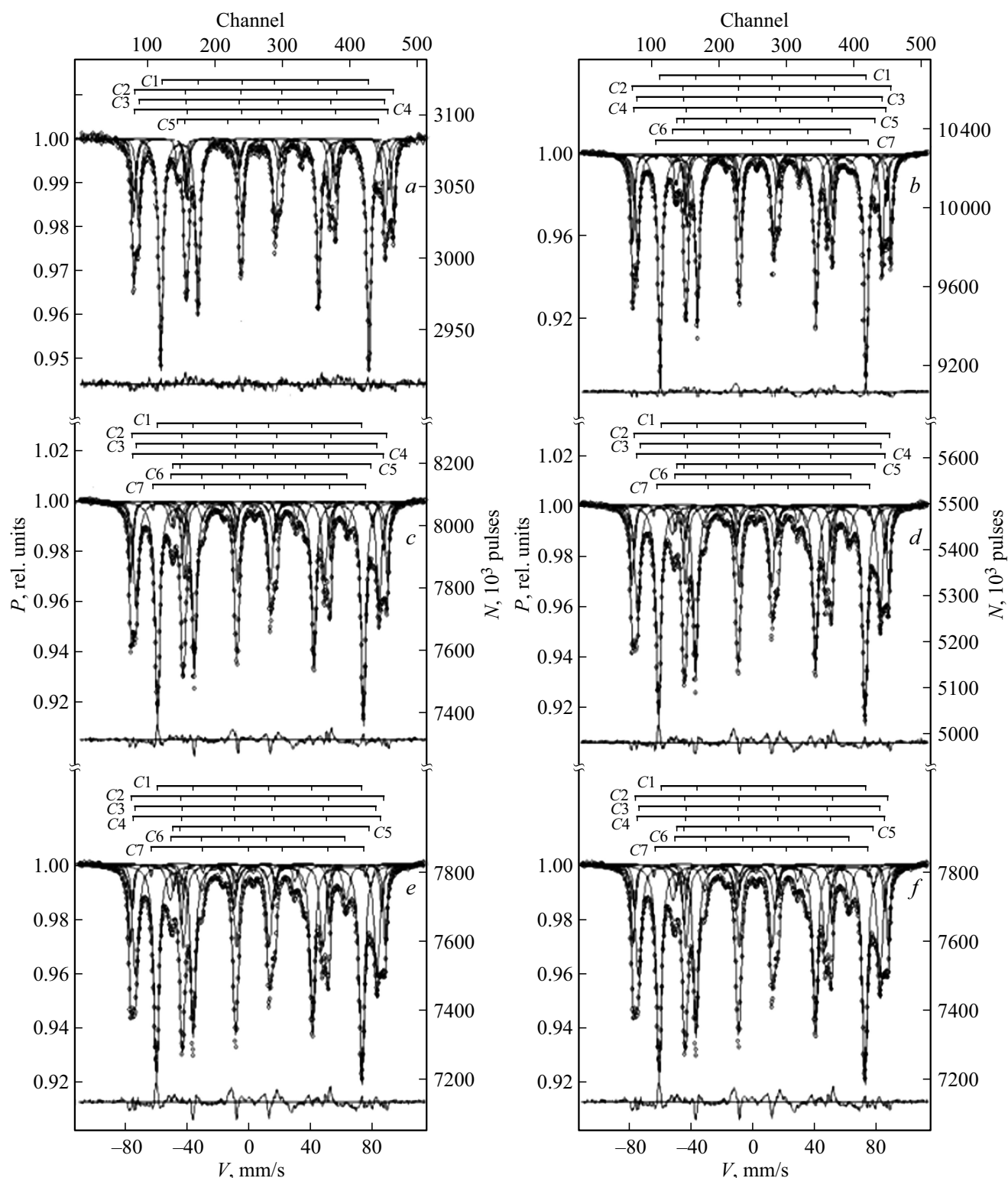


Рис. 1. Спектры рентгеновской дифракции образцов BaM-Zr.

гексаферрита. Отмечено, что кристаллическая структура основной фазы для всех образцов BaM-Zr может быть описана структурой типа магнетоплюмбита с пространственной группой  $P6_3/mmc$ . Элементарная ячейка состоит из двух формульных единиц ( $Z = 2$ ). Следует отметить, что с ростом степени замещения ионами циркония положения дифракционных максимумов смещаются в область меньших углов, что свидетельствует об увеличении межплоскостного расстояния и как следствие увеличения параметров элементарной ячейки. Это можно объяснить влиянием большего ионного радиуса иона циркония по сравнению с ионным радиусом железа для всех координационных чисел (КЧ):  $r_{Zr}^{4+} = 0.59 \text{ \AA}$  и  $r_{Fe}^{3+} = 0.49 \text{ \AA}$  (КЧ = 4);  $r_{Zr}^{4+} = 0.66 \text{ \AA}$  и  $r_{Fe}^{3+} = 0.58 \text{ \AA}$  (КЧ = 4) и  $r_{Zr}^{4+} = 0.72 \text{ \AA}$  и  $r_{Fe}^{3+} = 0.64 \text{ \AA}$  (КЧ = 4).

Мёссбауэровские спектры поликристаллических гексаферритов бария BaM-Zr состава с ( $x$ ) 0.1, 0.3, 0.6, 0.9 и 1.2 приведены на рис. 2, а в таблице их мёссбауэровские параметры: изомерный (химический) сдвиг  $\delta$  (mm/s), квадрупольное расщепление  $\Delta$  (mm/s), магнитное поле на ядрах  $Fe^{57}$  (кОе), ширина резонансной линии  $\Gamma$  (mm/s) и площадь секстетов (% rel.). Для сопоставления параметров спектров замещенных гексаферритов с незамещенным, на рис. 2, а приведен его мёссбауэровский спектр, а в таблице параметры для пяти позиций ионов Fe:  $12k$ ,  $4f_1$ ,  $4f_2$ ,  $2a$  и  $2b$ .

Все мёссбауэровские спектры замещенных гексаферритов BaM-Zr визуально мало чем отличаются от исходного, и различие в них можно заметить лишь по параметрам, полученным после обработки по программе „Univem Ms“. Результаты обработки показали, что наилучшими вариантами является разложение спектров всех образцов на 7 секстетов.



**Рис. 2.** Мёсбауэровские спектры образцов гексаферритов ВаМ-Zr при замещениях  $x$ :  $a$  — 0.0,  $b$  — 0.1,  $c$  — 0.3,  $d$  — 0.6,  $e$  — 0.9,  $f$  — 1.2.

Из таблицы видно, что наибольшие изменения приведенных параметров касаются интегральных интенсивностей секстетов, связанных с входением ионов  $\text{Zr}^{4+}$  в решетку гексаферрита, дальнейшим перераспределени-

ем катионов и влиянием этого процесса на все параметры. В этой связи представляет интерес рассмотреть динамику изменения интегральных интенсивностей от степени замещения  $x$ , приведенную на рис. 3.

Параметры мессбауэровских спектров  $\text{Fe}^{57}$  гексаферрита  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Zr}_x\text{O}_{19}$ 

Образец $\text{BaFe}_{12-x}\text{Zr}_x\text{O}_{19}$	Компонента спектра	Изомерный сдвиг $\delta$ , mm/s	Квадрупольное расщепление $\Delta$ , mm/s	Магнитные поля $H_{\text{эфф}}$ , кОе	Площади компонент $S$ , %	Ширина линии $\Gamma$ , mm/s
$x = 0.0$	C1(12k)	0.35	0.42	414	50.5	0.32
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.38	0.20	516	16.8	0.29
	C3(4f <sub>1</sub> )	0.26	0.22	489	19.8	0.31
	C4(2a)	0.34	0.01	507	7.5	0.26
	C5(2b)	0.28	2.21	400	5.3	0.30
$x = 0.1$	C1(12k)	0.36	0.41	412	47.0	0.31
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.38	0.19	515	14.8	0.24
	C3(4f <sub>1</sub> )	0.27	0.21	488	20.4	0.29
	C4(2a)	0.36	0.04	505	8.7	0.27
	C5(2b)	0.28	2.21	400	5.0	0.25
	C6(12k <sup>1</sup> )	0.32	0.29	358	3.4	0.53
	C7(4f <sub>2</sub> <sup>1</sup> )	0.77	-0.47	427	0.7	0.21
$x = 0.3$	C1(12k)	0.36	0.41	412	44.5	0.35
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.39	0.18	513	11.5	0.24
	C3(4f <sub>1</sub> )	0.27	0.21	486	23.6	0.38
	C4(2a)	0.38	0.08	502	8.1	0.28
	C5(2b)	0.28	2.20	397	4.5	0.30
	C6(12k <sup>1</sup> )	0.33	0.36	353	6.6	0.44
	C7(4f <sub>2</sub> <sup>1</sup> )	0.74	-0.46	428	1.2	0.21
$x = 0.6$	C1(12k)	0.36	0.41	412	43.5	0.37
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.39	0.17	512	11.5	0.25
	C3(4f <sub>1</sub> )	0.27	0.21	485	24.1	0.40
	C4(2a)	0.38	0.09	500	7.5	0.28
	C5(2b)	0.28	2.22	396	4.2	0.30
	C6(12k <sup>1</sup> )	0.33	0.35	353	7.8	0.47
	C7(4f <sub>2</sub> <sup>1</sup> )	0.73	-0.44	427	1.3	0.21
$x = 0.9$	C1(12k)	0.36	0.40	411	41.1	0.37
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.39	0.17	510	10.5	0.25
	C3(4f <sub>1</sub> )	0.27	0.21	483	26.3	0.45
	C4(2a)	0.38	0.10	499	6.9	0.27
	C5(2b)	0.27	2.20	394	3.8	0.31
	C6(12k <sup>1</sup> )	0.32	0.36	352	9.8	0.52
	C7(4f <sub>2</sub> <sup>1</sup> )	0.75	-0.44	428	1.6	0.21
$x = 1.2$	C1(12k)	0.36	0.40	411	41.9	0.41
	C2(4f <sub>2</sub> )	0.36	0.16	508	13.1	0.2
	C3(4f <sub>1</sub> )	0.28	0.21	482	26.9	0.47
	C4(2a)	0.39	0.10	496	3.5	0.22
	C5(2b)	0.28	2.21	394	3.7	0.31
	C6(12k <sup>1</sup> )	0.33	0.35	352	9.4	0.49
	C7(4f <sub>2</sub> <sup>1</sup> )	0.73	-0.45	429	1.4	0.21

Как показывают изменения интегральных интенсивностей (рис. 3) в целом они не столь значительны по сравнению с замещениями в гексаферритах  $\text{BaFe}_{12-x}\text{Me}_x\text{O}_{19}$  с  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{In}^{3+}$ ,  $\text{Sc}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  при тех же концентрациях в позиции 12k, где замещения наибольшие (таблица). При этом в гексаферрите BaM-Zr интегральные интенсивности  $\text{Fe}^{3+}$  (12k) с  $x = 1.2$  оказались меньше (% rel.), на 12.5%, по сравнению с замещениями  $\text{Ti}^{4+}$ , на 22.4% при  $x = 1.2$  и замещениях с  $\text{In}^{3+}$ , на 21.9% с  $\text{Sc}^{3+}$  и на 6.6% при  $x = 1.0$  с  $\text{Zn}^{2+}$ . Это не в полной мере

коррелирует с ионными радиусами перечисленных ионов примеси, из чего можно сделать вывод о влиянии на степень замещения не только ионных радиусов, но и электронной конфигурации ионов замещения.

Для подтверждения правильности разложения спектров гексаферрита BaM-Zr путем сравнения максимальных интегральных интенсивностей дополнительных секстетов с интенсивностями основных позиций — таковые были построены для секстетов C6(12k<sup>1</sup>) и C7(4f<sub>2</sub><sup>1</sup>) и приведены на рис. 4.

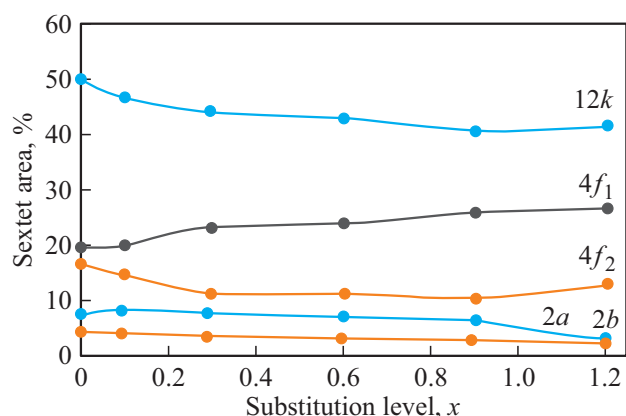


Рис. 3. Зависимость интегральных интенсивностей секстетов в спектрах гексаферрита BaM-Zr от степени замещения  $x$ .

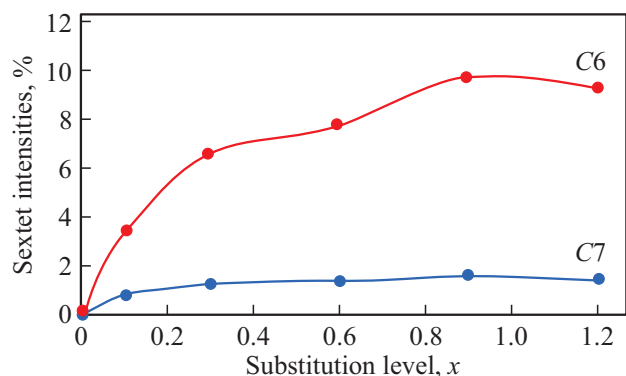


Рис. 4. Зависимость интегральных интенсивностей секстетов C6 и C7 в спектрах гексаферрита BaM-Zr от степени замещения  $x$ .

Сумма секстетов 1 и C6 по всем составам показала, что в пределах ошибки разложения и определения интенсивностей секстетов мы имеем близкую величину к исходной интенсивности для незамещенного гексаферрита. Что касается секстета C7, образованного за счет обрыва магнитной связи  $Fe(4f_2)-O-Zr(12k)$ , то сумма интегральных интенсивностей секстетов C2 и C7 не обеспечивает исходной величины 16.8%rel.

Из таблицы видно, что для образца с  $x = 0.1$  (рис. 2, b) спектра C1, изменения касаются в основном площадей секстетов C1 и C2 позиции  $12k$  и  $4f_2$ . Уменьшение площади секстета C1 означает вхождение ионов  $Zr^{4+}$  в позицию  $12k$ . Это приводит к двум оборванным связям  $Fe(12k)-O-Fe(12k)$  в триаде этих октаэдров и образованию двух магнитно-эквивалентных положений ионов  $Fe^{3+}$  обозначенных как  $12k_1$  (секстет C6). Существенные изменения в катионном распределении ионов  $Zr^{4+}$  произошли при  $x = 0.3$ , которые заключаются в резком уменьшении интенсивности секстета C2 от ионов  $Fe(4f_2)$ , а также в увеличении интенсивности секстета C7 от ионов  $Fe^{2+}$  и C3 от ионов  $Fe(4f_1)$ . Уменьшение площади секстета C2 от

ионов  $Fe(4f_2)$  объясняется вхождением ионов  $Zr^{4+}$  в эту позицию и оборванной связью  $Fe(4f_2)-O-Fe(12k)$  с возникновением неэквивалентного положения иона  $4f_2^1$  (секстет C7), при этом, согласно изомерному сдвигу, валентность этих ионов  $2+$ , что обеспечивает электронейтральность гексаферрита. Однако, доля двухвалентных ионов (секстет C7) не обеспечивает общего уменьшения интенсивности секстета C2, поскольку основная часть ионов  $Fe^{3+}(4f_2^1)$ , в виде дополнительного секстета наложилась на секстет C3, увеличивая его интенсивность и ширину резонансной линии за счет не полного совпадения секстетов. Величина магнитного поля доли наложенного секстета указывает на то, что он мог быть образован за счет секстета C2 от  $Fe^{3+}(4f_2^1)$ , или секстета C4 от  $Fe^{3+}(2a)$ , но интенсивность секстета 2a не изменялась, поэтому увеличение интенсивности секстета C3 можно объяснить только наложением части дополнительного секстета C2 от  $Fe(4f_2)$ . При этом, меньшая величина магнитного поля на ядрах  $Fe^{57}$  ионов железа секстета C7, объясняется двухвалентным их состоянием. Эти изменения продолжают и при увеличении  $x$  до 0.6 и далее до 1.2. Изомерный сдвиг и квадрупольное расщепление всех секстетов при  $x$  от 0.1 до 1.2 находятся в соответствии с валентным состоянием ионов железа и их координацией.

Наблюдаемые изменения катионного распределения должны отразиться и на магнитных характеристиках гексаферрита BaM-Zr.

Из рис. 5 можно видеть, что все исследуемые образцы не выходят на состояние магнитного насыщения во внешних магнитных полях до 2Т. С ростом степени замещения ионами цинка основные магнитные характеристики изменяются нелинейно. Для более детального понимания изменения магнитных свойств для различного химического состава, на рис. 6 приведены полученные зависимости удельной намагниченности и остаточной, коэрцитивной силы и коэффициент прямоугольности.

Удельная намагниченность гексаферрита BaM-Zr (рис. 6, a) в зависимости от степени замещения изменяется не монотонно, и имеет максимум при  $x = 0.3$  с дальнейшим ее уменьшением вплоть до  $x = 1.2$ . Это находится в соответствии с данными мессбауэровской спектроскопии, фиксирующей происходящее катионное перераспределение при  $x = 0.3$ . Поскольку магнитные моменты в гексаферритах от ионов  $12k$ ,  $2a$  и  $2b$  направлены в одну сторону, а  $4f_1$  и  $4f_2$  — в противоположную, то результирующий магнитный момент, согласно модели Нееля, равен их разности. Результатом этого является то, что уменьшение заселенности позиции  $4f_2$  ионами  $Zr^{4+}$ , приводит к скачку намагниченности, а дальнейшее увеличение заселенности позиции  $12k$  ее уменьшает.

Остаточная намагниченность (рис. 6, b) также реагирует на катионное перераспределение, и при  $x = 0.3$  имеет, в отличие от удельной намагниченности, прогиб с дальнейшим уменьшением ее величины, что говорит о связи этих параметров.

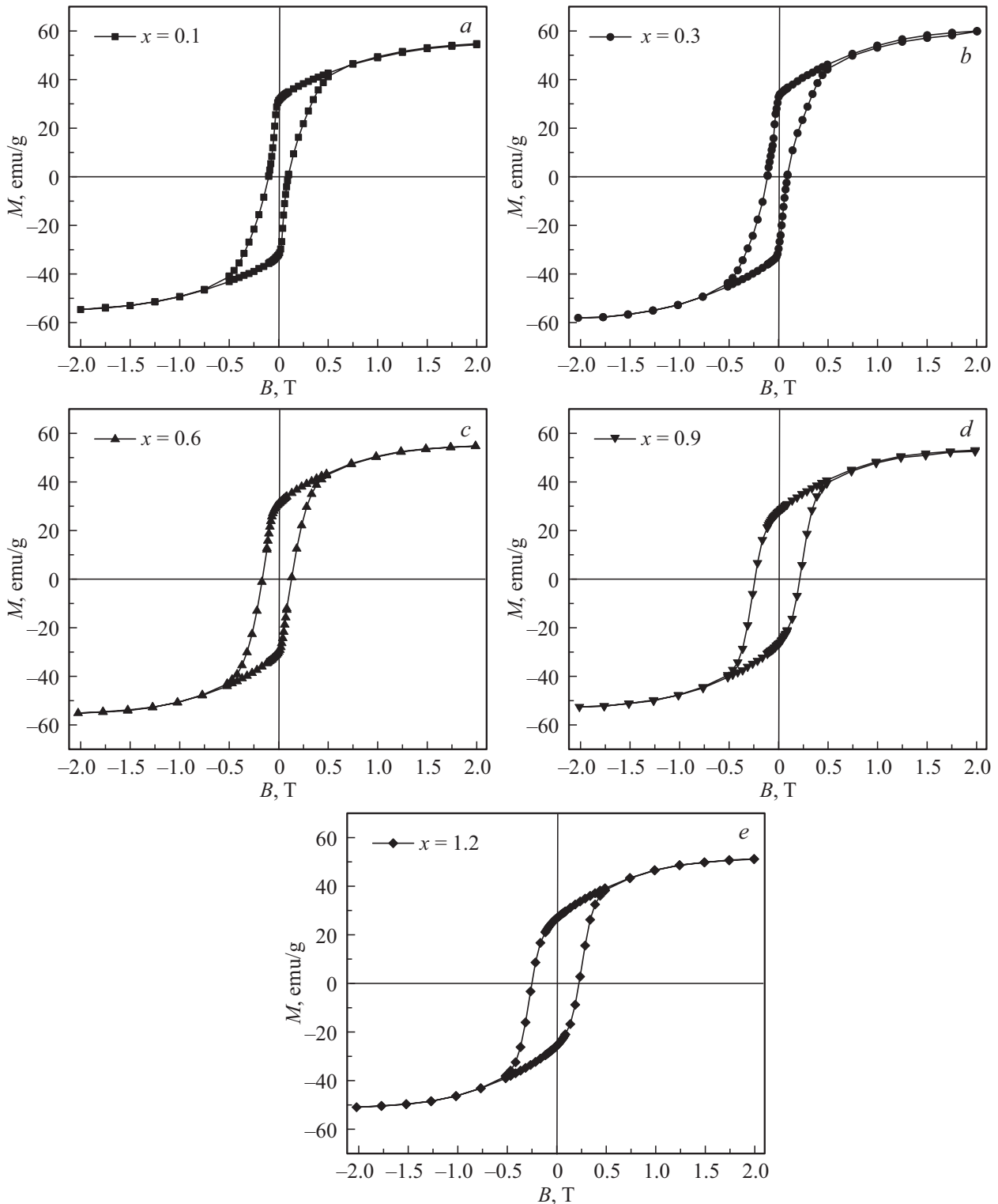
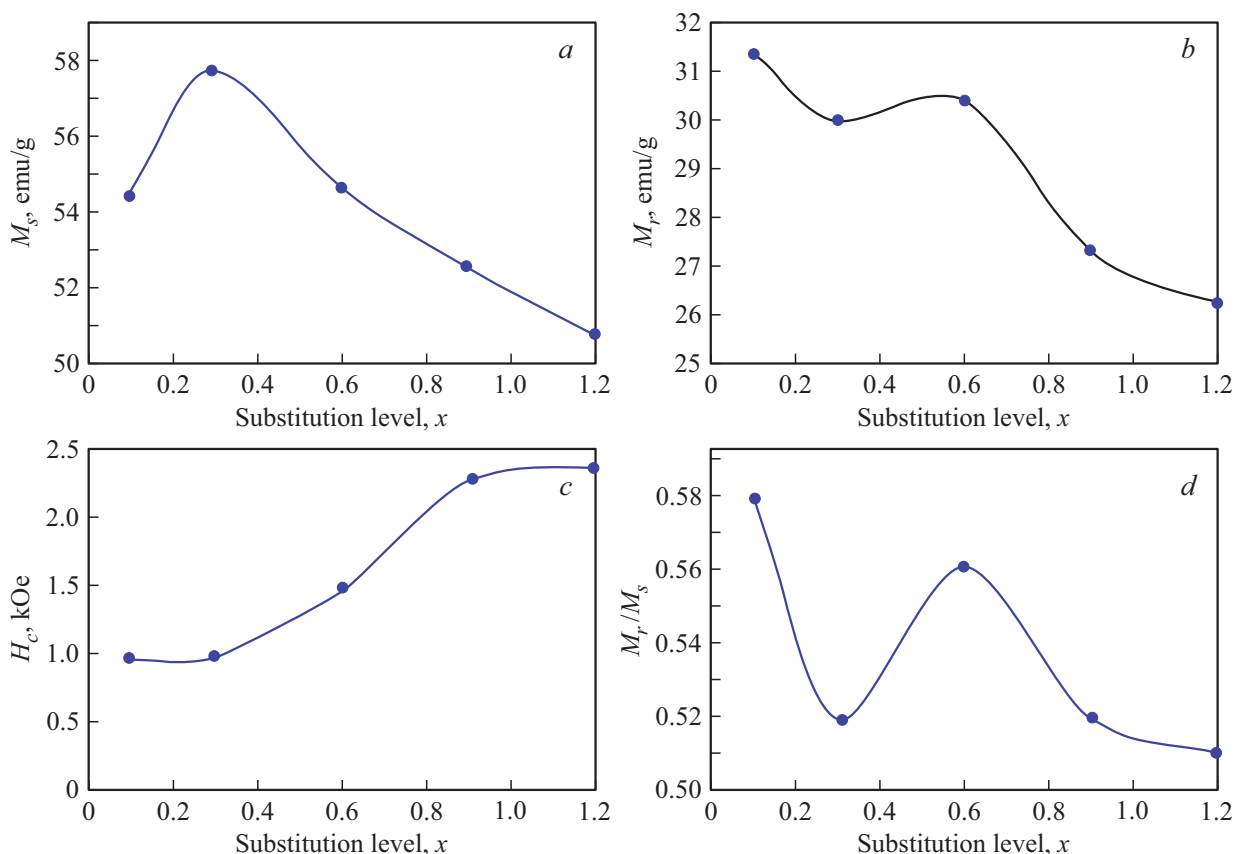


Рис. 5. Полевые зависимости удельной намагниченности образцов гексаферрита бария ВаМ-Zr.

Коэрцитивная сила (рис. 6, *c*) в диапазоне 0.1–0.3 не меняется, а затем монотонно возрастает за счет увеличения магнитокристаллической анизотропии. Максимальные ее значения не превышают 2.4 кОе, что свидетельствует о небольшой магнитотвердости гекса-

феррита ВаМ-Zr, и пригодности его использования для магнитных усилителей, сердечников трансформаторов и катушек индуктивности.

Коэффициент прямоугольности петли гистерезиса  $M_r/M_s$  варьирует в процессе увеличения степени заме-



**Рис. 6.** Магнитные характеристики гексаферрита BaM-Zr: *a* — намагниченность насыщения; *b* — остаточная намагниченность, *c* — коэрцитивная сила, *d* —  $Sq = M_r/M_s$ .

щения и при  $x = 1.2$  показывает невысокое значение 0.51, что ограничивает возможности гексаферрита для использования в переключающих устройствах магнитоэлектроники.

#### 4. Заключение

В результате проведенных исследований гексаферрита бария  $BaZr_xFe_{12-x}O_{19}$  было показано, что в его структуре осуществляется ограниченный гетеровалентный изоморфизм по схеме  $2Fe^{3+} \rightarrow Zr^{4+} + Fe^{2+}$ . Двухвалентное железо в структуре при этом диагностировано по изомерному сдвигу ионов Fe в мессбауэровских спектрах гексаферрита. Установлено, что пределом гетеровалентного изоморфного замещения в гексаферрите является  $x = 0.6$ , при этом цирконий в виде самостоятельной фазы начинает проявляться в виде  $ZrO_2$ , фиксированной рентгенографией, а в диапазоне  $x = 0.6-0.9$  Zr по данным мессбауэровской спектроскопии продолжается частично входить в решетку гексаферрита. Дополнительные сексты в мессбауэровских спектрах гексаферрита бария могут образовываться при локализации ионов  $Zr^{4+}$  преимущественно в позициях  $12k$  и  $4f_2$  за счет двух оборванных обменных связей  $Fe(12k)-O-Fe(12k)$  и  $Fe(4f_2)-O-Fe(12k)$ , обозначенные как  $12k_1$  и  $4f_2^1$ . За-

висимость удельной намагниченности BaM-Zr показала, что на ней имеется максимум при  $x = 0.3$ , вследствие преобладания при этом замещения в позиции  $4f_2$ , после чего намагниченность монотонно уменьшается с увеличением  $x$ . Коэрцитивная сила в диапазоне 0.1–0.3 не меняется, а затем монотонно возрастает за счет увеличения магнитокристаллической анизотропии. Максимальные ее значения не превышают 2.4 кОе, что свидетельствует о низкой магнитотвердости гексаферрита BaM-Zr. Проведенные исследования показывают пределы использования легированного циркония гексаферрита бария, а также возможность получения образцов с наперед заданными магнитными свойствами для промышленного использования.

#### Финансирование работы

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 19-19-00694 от 06.05.2019).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.L. Kozlovskiy, I.E. Kenzhina, M.V. Zdorovets. *Cer. Inter.* **46**, 8, 10262 (2020).
- [2] M.V. Zdorovets, A.L. Kozlovskiy. *J. Alloys Comnd.* **815**, 152450 (2020).
- [3] A.L. Kozlovskiy, M.V. Zdorovets. *Comp. B* **191**, 107968 (2020).
- [4] Y. Yang, F. Wang, J. Shao, D. Huang, H. He, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov. *J. Alloys Comnd.* **765**, 616 (2018).
- [5] A.V. Trukhanov, K.A. Astapovich, M. Almessiere, V.A. Turchenko, E.L. Trukhanova, V.V. Korovushkin, A.A. Amirov, M.A. Darwish, D.V. Karpinsky, D.A. Vinnik, D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, M.V. Zdorovets, A.L. Kozlovskiy, S.V. Trukhanov. *J. Alloys Comnd.* **822**, 153575 (2020).
- [6] D.S. Klygach, M.G. Vakhitova, D.A. Vinnik, A.V. Bezborodov, S.A. Gudkova, V.E. Zhivulin, D.A. Zherebtsov, C.P. SakthiDharana, S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, A.Yu. Starikov. *J. Magn. Magn. Matter.* **456**, 290 (2018).
- [7] D.A. Vinnik, V.E. Zhivulin, A.Yu. Starikov, S.A. Gudkova, E.A. Trofimov, A.V. Trukhanov, S.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, V.V. Matveev, E. Lahderanta, E. Fadeev, T.I. Zubar, M.V. Zdorovets, A.L. Kozlovsky. *J. Magn. Magn. Matter.* **498**, 166117 (2020).
- [8] V. Turchenko, V.G. Kostishyn, S. Trukhanov, F. Damay, F. Porcher, M. Balasoiu, N. Lupu, B. Bozzo, I. Fina, A. Trukhanov, J. Waliszewski, K. Recko, S. Polosan. *J. Alloys Comnd.* **821**, 153412 (2020).
- [9] В.В. Коровушкин, А.В. Труханов, В.Г. Костишин, И.М. Исаев, И.В. Щетинин, Н.М. Дуров, А.Ю. Миронович, И.О. Минкова, К.А. Астапович. *ФТТ* **62**, 5, 789 (2020).
- [10] А.В. Труханов, В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, Л.В. Панина, С.В. Труханов, В.А. Турченко, И.С. Поляков, Р.Х. Рахматуллин, Г.А. Филатов, Т.И. Зубарь, В.В. Олейник, Е.С. Яковенко, Л.Ю. Мацуй, Л.Л. Вовченко, В.Л. Лаунец, Е.Л. Труханова. *ФТТ* **60**, 9, 1723 (2018).
- [11] В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, И.М. Исаев, А.Ю. Миронович, С.В. Труханов, В.А. Турченко, К.А. Астапович, А.В. Труханов. *ФТТ* **63**, 2, 229 (2021).
- [12] А.В. Труханов, С.В. Труханов, В.Г. Костишин, Л.В. Панина, И.С. Казакевич, В.А. Турченко, В.В. Кочервинский. *ФТТ* **59**, 4, 721 (2017).
- [13] A.V. Trukhanov, V.G. Kostishyn, L.V. Panina, V.V. Korovushkin, V.A. Turchenko, P. Thakur, A. Thakur, Y. Yang, D.A. Vinnik, E.S. Yakovenko, L.Yu. Macuy, E.L. Trukhanova, S.V. Trukhanov. *J. Alloys Comnd.* **754**, 247 (2018).
- [14] A.V. Trukhanov, V.O. Turchenko, I.A. Bobrikov, S.V. Trukhanov, A.I. Balagurov, I.S. Kazakevich. *J. Magn. Magn. Matter.* **393**, 253 (2015).
- [15] S.V. Trukhanov, A.V. Trukhanov, V.A. Turchenko, V.G. Kostishin, L.V. Panina, I.S. Kazakevich, A.M. Balagurov. *J. Magn. Magn. Matter.* **417**, 130 (2016).
- [16] M.N. Shipko, V.V. Korovushkin, V.G. Kostishyn, N.D. Ursulyak, A.G. Nalagin, E.S. Savtchenko. *J. Nano-Electron. Phys.* **7**, 4, 04075 (2015).
- [17] В.В. Коровушкин, А.В. Труханов, В.Г. Костишин, И.М. Исаев. *Физика и технология наноматериалов и структур. Сб. науч. статей IV Междунар. научно-практ. конф. Курск (2017). Т. 1. С. 229.*
- [18] В.В. Коровушкин, А.В. Труханов, М.Н. Шипко, В.Г. Костишин, И.М. Исаев, А.Ю. Миронович, С.В. Труханов. *ЖНХ* **64**, 5, 463 (2019).
- [19] S. Verma, O.P. Pandey, A. Paesano Jr., P. Sharma. *Physica B: Condens. Matter.* **448**, 57 (2014).
- [20] D.A. Vinnik, A.Yu. Tarasova, D.A. Zherebtsov, L.S. Mashkovtseva, S.A. Gudkova, S. Nemrava, A.K. Yakushechkina, A.S. Semisalova, L.I. Isaenko, R. Niewa. *Cer. Inter.* **41**, 9172 (2015).
- [21] T. Tsutaoka, A. Tsurunaga, N. Koga. *J. Magn. Magn. Mater.* **399**, 64 (2016).
- [22] S. Kanagesan, M. Hashim, S. Jesurani, T. Kalavani, I. Ismail. *J. Supercond. Nov. Magn.* **27**, 811 (2014).
- [23] M. Sharma, S.C. Kashyap, H.C. Gupta. *Physica B* **448**, 24 (2014).
- [24] H. Sozeri, Z. Mehmedi, H. Kavaz, A. Baykal. *Cer. Int.*, **41**, 8, 9602 (2015).
- [25] В.В. Коровушкин, А.В. Труханов, В.Г. Костишин, И.М. Исаев, С.В. Труханов, К.А. Астапович, А.Ю. Миронович. *Неорган. материалы* **56**, 7, 746 (2020).
- [26] В.В. Коровушкин, М.Н. Шипко, В.Г. Костишин, И.М. Исаев, А.Ю. Миронович, С.В. Труханов, А.В. Труханов. *Неорган. материалы* **55**, 10, 1065 (2019).

*Редактор Т.Н. Василевская*