

04,05

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

© В.Г. Костишин¹, В.В. Коровушкин¹, И.М. Исаев¹, Д.В. Салогуб¹, С.В. Труханов², А.В. Труханов^{1,2}

¹ Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва, Россия

² 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 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 иэвалентные 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 Fe^{3+} в структуре гексаферритов такими ионами как Al^{3+} , 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 Ga^{3+} , 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 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 Fe^{3+} ионами M^{4+} , или M^{2+} зарядовый баланс может реализовываться несколькими вариантами. При изоморфных элементах M^{4+} может добавляться ион 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 M^{4+} может обеспечиваться восстановлением доли железа до Fe^{2+} с частичным электронным обменом $\text{Fe}^{3+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ [24], а при допировании ионами M^{2+} сопровождаться частичным окислением железа до состояния 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]. Мессбауэровские спектры образцов BaM-Zr снимались на спектрометре Ms-1104 Em с постоянным ускорением, источником γ -излучения служил Co^{57} в матрице хрома. Мессбауэровские спектры снимались при комнатной температуре. Изомерный (химический) сдвиг рассчитывался относительно α -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 σ_s , остаточную намагниченность σ_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 2θ от 20 до 80° .

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

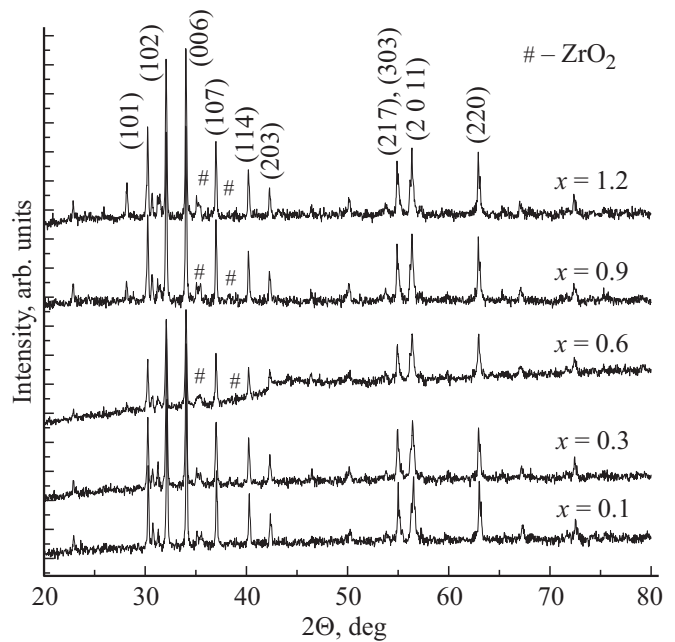


Рис. 1. Спектры рентгеновской дифракции образцов BaM-Zr.

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).

Мессбауэровские 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 мессбауэровские параметры: изомерный (химический) сдвиг δ (mm/s), квадрупольное расщепление Δ (mm/s), магнитное поле на ядрах Fe^{57} (кОе), ширина резонансной линии Γ (mm/s) и площадь секстетов (% rel.). Для сопоставления параметров спектров замещенных гексаферритов с незамещенным, на рис. 2, а приведен его мессбауэровский спектр, а в таблице параметры для пяти позиций ионов Fe: $12k$, $4f_1$, $4f_2$, $2a$ и $2b$.

Все мессбауэровские 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.

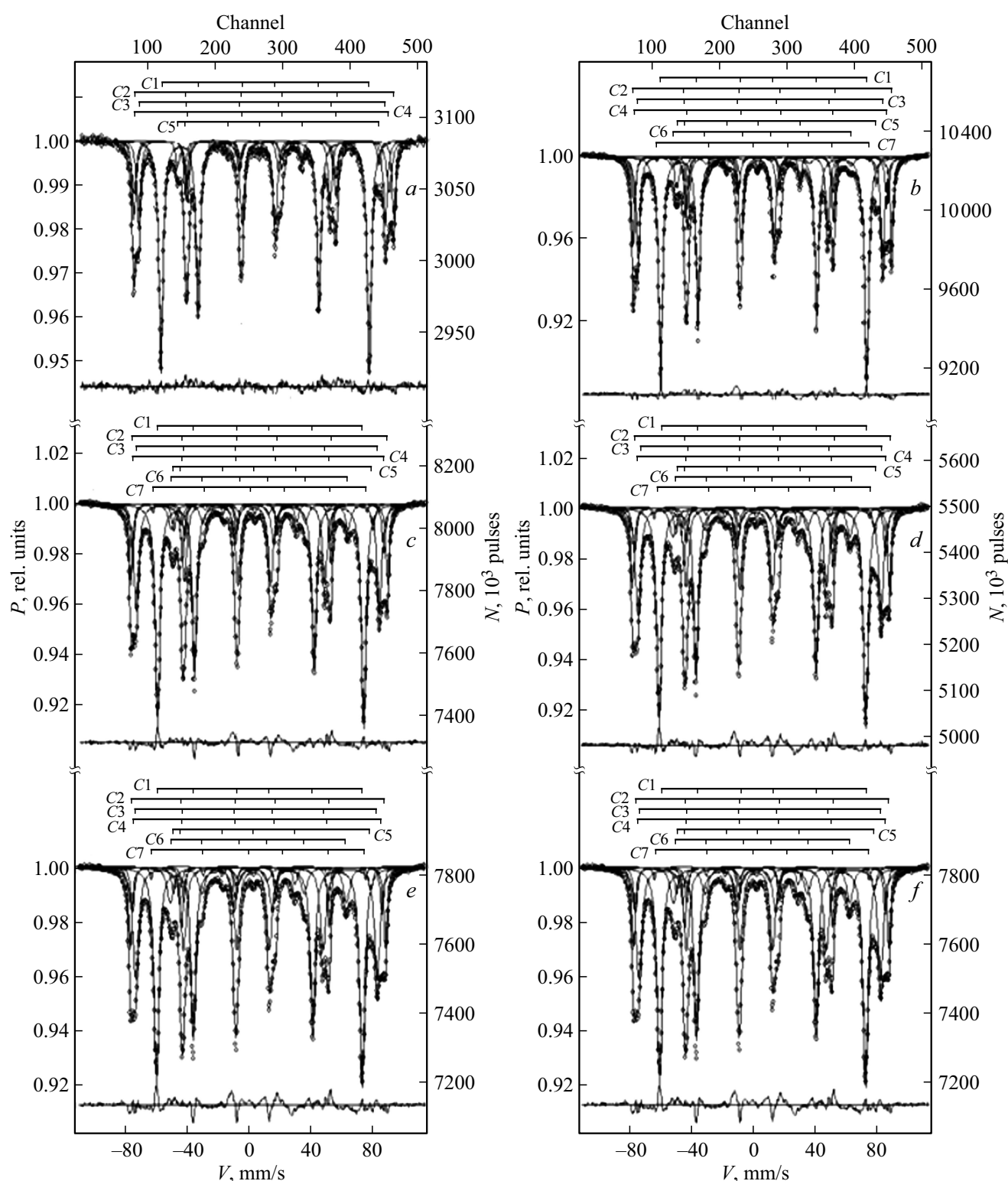


Рис. 2. Мёсбауэровские спектры образцов гексаферритов BaM-Zr при замещениях x : a — 0.0, b — 0.1, c — 0.3, d — 0.6, e — 0.9, f — 1.2.

Из таблицы видно, что наибольшие изменения приведенных параметров касаются интегральных интенсивностей секстетов, связанных с входением ионов 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 Fe^{57} гексаферрита $BaFe_{12-x}Zr_xO_{19}$

Образец $BaFe_{12-x}Zr_xO_{19}$	Компонента спектра	Изомерный сдвиг δ , mm/s	Квадрупольное расщепление Δ , mm/s	Магнитные поля $H_{эфф}$, кОе	Площади компонент S , %	Ширина линии Γ , mm/s
$x = 0.0$	C1(12k)	0.35	0.42	414	50.5	0.32
	C2(4f ₂)	0.38	0.20	516	16.8	0.29
	C3(4f ₁)	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 ₂)	0.38	0.19	515	14.8	0.24
	C3(4f ₁)	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 ¹)	0.32	0.29	358	3.4	0.53
	C7(4f ₂ ¹)	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 ₂)	0.39	0.18	513	11.5	0.24
	C3(4f ₁)	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 ¹)	0.33	0.36	353	6.6	0.44
	C7(4f ₂ ¹)	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 ₂)	0.39	0.17	512	11.5	0.25
	C3(4f ₁)	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 ¹)	0.33	0.35	353	7.8	0.47
	C7(4f ₂ ¹)	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 ₂)	0.39	0.17	510	10.5	0.25
	C3(4f ₁)	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 ¹)	0.32	0.36	352	9.8	0.52
	C7(4f ₂ ¹)	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 ₂)	0.36	0.16	508	13.1	0.2
	C3(4f ₁)	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 ¹)	0.33	0.35	352	9.4	0.49
	C7(4f ₂ ¹)	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 $BaFe_{12-x}Me_xO_{19}$ с Ti^{4+} , In^{3+} , Sc^{3+} , Zn^{2+} при тех же концентрациях в позиции 12k, где замещения наибольшие (таблица). При этом в гексаферрите BaM-Zr интегральные интенсивности Fe^{3+} (12k) с $x = 1.2$ оказались меньше (% rel.), на 12.5%, по сравнению с замещениями Ti^{4+} , на 22.4% при $x = 1.2$ и замещениях с In^{3+} , на 21.9% с Sc^{3+} и на 6.6% при $x = 1.0$ с 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(12k¹) и C7(4f₂¹) и приведены на рис. 4.

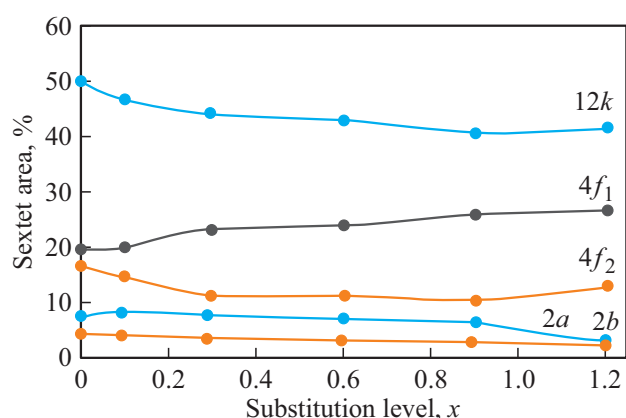


Рис. 3. Зависимость интегральных интенсивностей секстетов в спектрах гексаферрита BaM-Zr от степени замещения x .

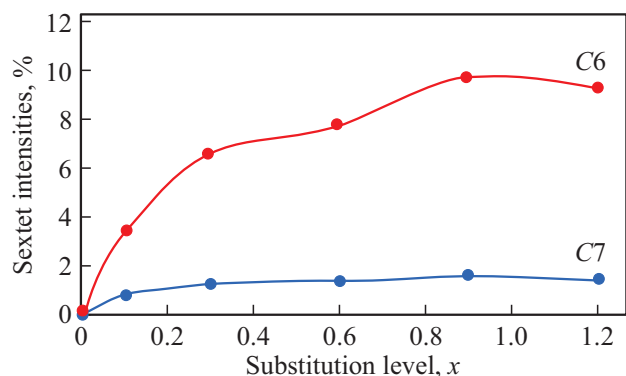


Рис. 4. Зависимость интегральных интенсивностей секстетов C6 и C7 в спектрах гексаферрита BaM-Zr от степени замещения x .

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 прямоуглольности.

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.

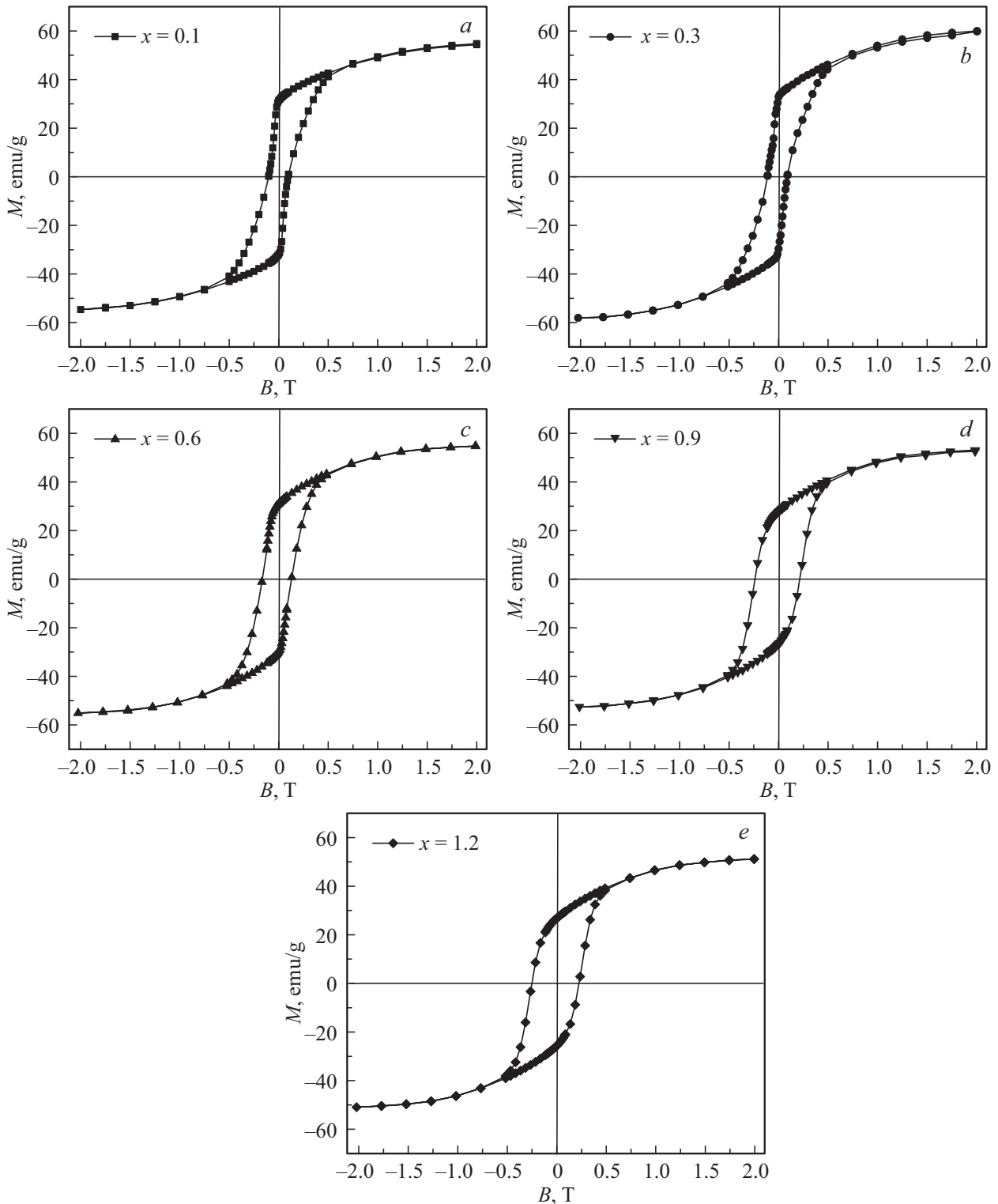


Рис. 5. Полевые зависимости удельной намагниченности образцов гексаферрита бария ВаМ-Zr.

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-

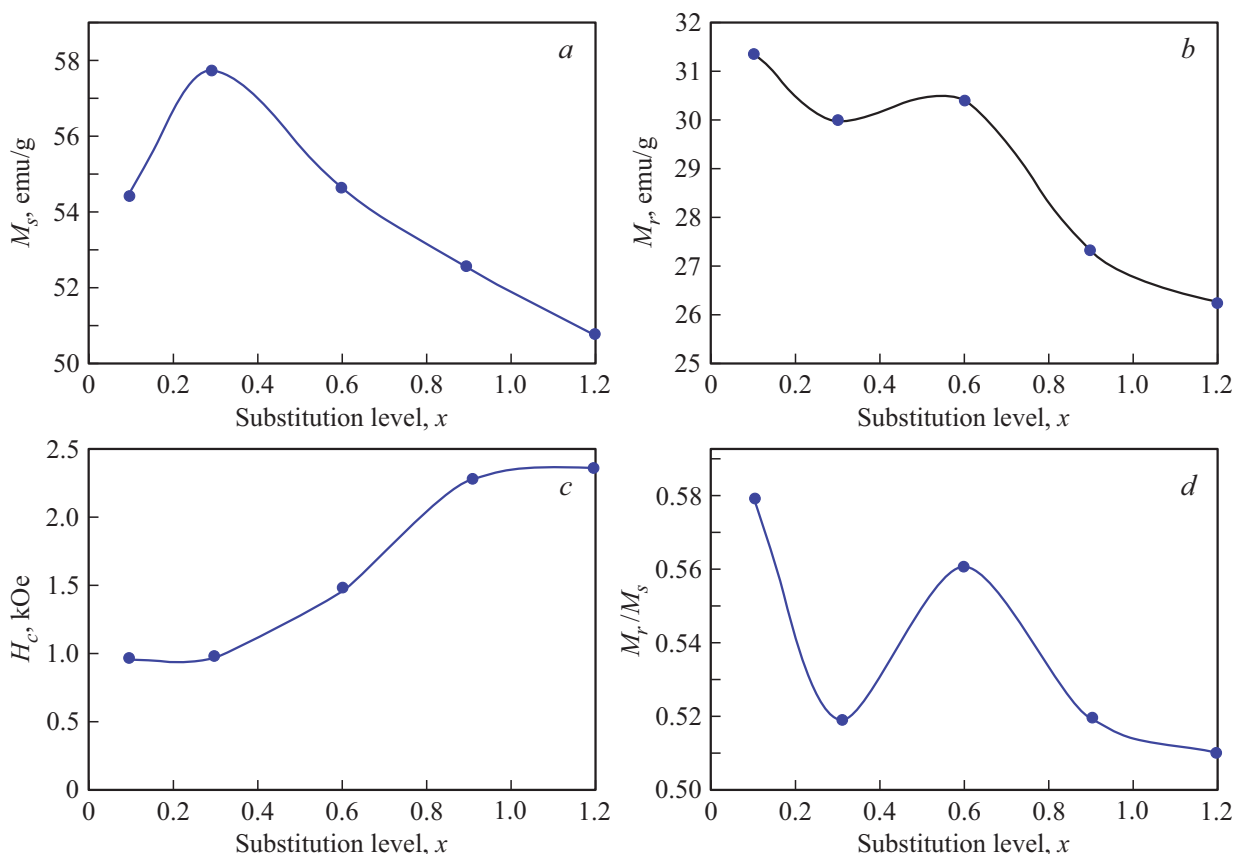


Рис. 6. Магнитные характеристики гексаферрита BaM-Zr: *a* — намагниченность насыщения; *b* — остаточная намагниченность, *c* — коэрцитивная сила, *d* — $Sq = M_r/M_s$.

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