

05,06

Особенности локальных структурных, валентных и магнитных состояний ионов железа в перовските $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$

© В.С. Покатилов, А.О. Коновалова, В.В. Покатилов

Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва, Россия

E-mail: pokatilov@mirea.ru

(Поступила в Редакцию 9 августа 2013 г.)

Перовскит $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ исследовался методом эффекта Мёссбауэра при температурах 295 и 675 К. Измерена температура магнитного фазового перехода (температура Нееля) $T_N = 640 \pm 10$ К. Выше температуры Нееля существует два неэквивалентных структурных состояния ионов железа. При комнатной температуре в перовските $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ существует семь наиболее вероятных неэквивалентных магнитных состояний ионов железа с существенно различными значениями параметров сверхтонких взаимодействий. Четыре состояния ионов железа соответствуют ионам Fe^{3+} в октаэдрическом кислородном окружении, а три состояния — ионам Fe^{3+} в тетраэдрическом кислородном окружении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 12-02-31918, 13-02-00690).

1. Введение

В настоящее время внимание исследователей привлекает класс материалов, получивших название „мультиферроики“. Эти материалы представляют значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и с точки зрения практического применения в устройствах обработки и хранения информации, а также различного типа датчиках [1]. Одним из наиболее перспективных мультиферроиков является BiFeO_3 , что в значительной мере связано с его рекордно высокими температурами сегнетоэлектрического и антиферромагнитного фазовых переходов: $T_C = 1120$ К и $T_N = 637$ К [1]. Сосуществование в BiFeO_3 одновременно электрического и магнитного порядка при комнатной температуре делает это соединение наиболее перспективным объектом для исследования магнитоэлектрического эффекта [1,2]. Магнитоэлектрические взаимодействия в объемных образцах BiFeO_3 малы, что обусловлено наличием в них уникальной пространственно модулированной магнитной структуры циклоидного типа с периодом $\lambda = 620 \pm 2$ Å [3]. Пространственно спин-модулированная структура (ПСМС) была обнаружена методом нейтронографии [3] и подтверждена исследованиями методами ЯМР [4,5] и эффекта Мёссбауэра [6]. Разрушение ПСМС в BiFeO_3 приводит к усилению магнитоэлектрического эффекта и спонтанной намагниченности [1]. Этот эффект наблюдался при изменении кристаллической структуры, например при замещении ионов Bi^{3+} щелочно-земельными ионами [7–9].

Кристаллическая структура и магнитные свойства перовскитов системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$ исследовались в ряде работ (см., например, [7–11]). Установлено, что ромбоэдрическая кристаллическая структура (подобно кристаллической структуре BiFeO_3) сохраняется вплоть до содержания Ca $x = 0.2$ [7–9]. Кристаллическая структу-

ра образцов при $0.25 \leq x \leq 0.4$ идентифицировалась как тетрагональная (пространственная группа $I4/mcm$) [7,8]. В работах [7–9] было также обнаружено, что при замещении ионов Bi^{3+} ионами Ca^{2+} происходит разрушение ПСМС при $x \geq 0.25$. Согласно данным работ [7,11], образец $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ характеризуется орторомбическими искажениями элементарной ячейки (пространственная группа $Bmmm$).

В работах [8–11] измерены мёссбауэровские спектры перовскитов системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$ при $0.1 \leq x \leq 0.5$. Мёссбауэровские спектры образцов системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$, измеренные при комнатной температуре, состоят из уширенных линий. Спектр образца $\text{Bi}_{0.9}\text{Ca}_{0.1}\text{FeO}_3$ описывался одним уширенным секстетом [8], тогда как мёссбауэровские спектры образцов с содержанием кальция больше 0.2 содержат два уширенных секстета с различными значениями сверхтонких магнитных полей [8–10]. Следует заметить, что качество измеренных мёссбауэровских спектров было сравнительно невысоким. Уширенные линии мёссбауэровских спектров, полученные в работах [8–11], указывают на существование более сложных локальных структурных, магнитных и зарядовых состояний ионов железа в перовскитах системы $\text{Bi}_{1-x}\text{Ca}_x\text{FeO}_3$.

Целью настоящей работы является детальное исследование влияния замещения трехвалентных ионов висмута двухвалентными ионами кальция в перовските $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ на кристаллическую структуру, существование ПСМС, а также на локальные структурные, магнитные и зарядовые состояния ионов железа.

2. Образцы и методы исследования

Поликристаллический образец $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ был приготовлен методом твердофазного синтеза. Предварительно исходные порошки (Bi_2O_3 , Fe_2O_3 и CaO) с

чистотой не хуже 99,9% тщательно перетирались и отжигались при температуре 700°C, затем охлаждались до комнатной температуры в течение 5 h. Далее приготавливалась смесь оксидных порошков компонентов соединения в стехиометрических пропорциях, порошки тщательно перетирались и прессовались в таблетки. Небольшой излишек оксида висмута (порядка 2–3%) был добавлен для компенсации потерь этого элемента в процессе синтеза вследствие летучести висмута. Для повышения качества мёссбауэровских спектров и уменьшения времени их измерения образец обогащался стабильным изотопом ^{57}Fe в количестве 5 mol.%. Для получения однофазного образца был выполнен отжиг в течение часа при 700°C и затем в течение 12 h при 830°C с двукратным перетиранием и прессованием в таблетки.

Кристаллическая структура образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ исследовалась методом рентгенографии при комнатной температуре. Мёссбауэровский эксперимент проводился в геометрии поглощения с помощью мёссбауэровского спектрометра MS1104em (разработка НИИ физики ЮФУ, Ростов-на-Дону). Мёссбауэровские спектры измерялись при комнатной температуре и при 675 K (выше температуры Нееля). В качестве мёссбауэровского источника использовался изотоп ^{57}Co в Rh-матрице. Для обработки и анализа мёссбауэровских спектров были использованы методы восстановления распределения сверхтонких параметров: сверхтонких магнитных полей, квадрупольных смещений и сдвигов мёссбауэровских линий (программа DISTRI). Для модельной расшифровки мёссбауэровских спектров использовалась программа SPECTR. Все перечисленные расчетные программы реализованы в программном комплексе MSTools [12]. В экспериментах, когда эффект поглощения превышал 5–6%, корректировка спектра на влияние толщины образца при поглощении гамма-квантов проводилась по методу, описанному в [13].

3. Экспериментальные данные и их обсуждение

Рентгенографический анализ показал, что исследуемый образец $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ является однофазным и имеет орторомбическую кристаллическую структуру (пространственная группа $Bm\bar{m}$), что согласуется с данными работ [7,11].

Температура магнитного фазового перехода (температура Нееля) $T_N = 640 \pm 10$ K для образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ была определена с помощью метода температурного сканирования интенсивности счета гамма-квантов, прошедших через образец при скорости источника $V = 0$.

На рис. 1, *a* приведен мёссбауэровский спектр образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$, измеренный при $T = 675$ K (при температуре выше T_N). Для определения количества неэквивалентных структурных состояний ионов железа

в исследуемом образце было восстановлено распределение сдвигов мёссбауэровских линий $P(v)$ (рис. 1, *b*), что позволяет получить распределение сдвигов мёссбауэровской линии для всех синглетов, присутствующих в спектре в широком диапазоне скоростей. Анализ распределения $P(v)$ показал, что мёссбауэровский спектр

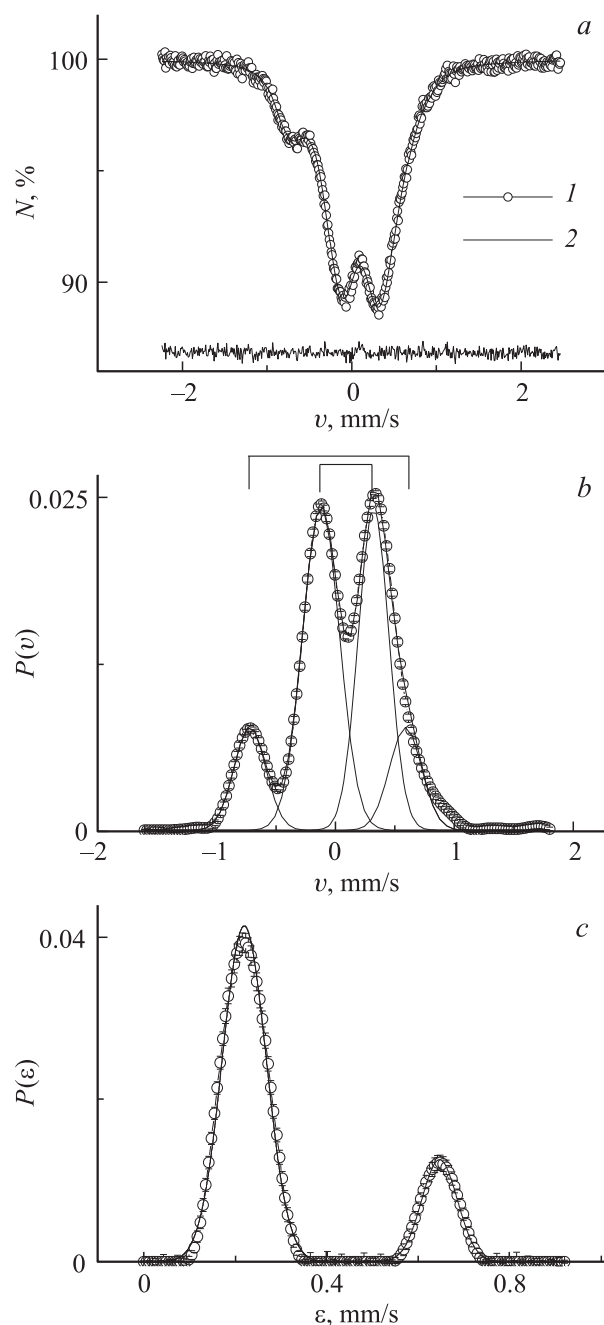


Рис. 1. Мёссбауэровский спектр образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$, измеренный при 675 K (*a*): 1 — экспериментальные точки, 2 — результаты обработки по программе DISTRI (восстановление распределения $P(\varepsilon)$); линия под мёссбауэровским спектром — разность между экспериментальным спектром и результатами обработки. *b* и *c* — восстановленные распределения сдвигов мёссбауэровских линий $P(v)$ и квадрупольных смещений дублетов $P(\varepsilon)$ соответственно.

Параметры сверхтонких взаимодействий (сверхтонкое магнитное поле H на ядрах ^{57}Fe , сдвиг мёссбауэровской линии δ , квадрупольное смещение ϵ) и доли парциальных состояний ионов железа A при температурах 675 и 295 К, а также рассчитанная вероятность B существования иона железа в октаэдрическом (Fe_o) или тетраэдрическом (Fe_t) кислородном окружении

T, K	Номер состояния Fe	$\delta(\pm 0.003), \text{mm/s}$	$\epsilon(\pm 0.003), \text{mm/s}$	$H(\pm 0.5), \text{kOe}$	$A(\pm 2), \%$	$B, \%$
675	1	0.091	0.220	0	76	
	2	-0.047	0.655	0	24	
295	1	0.367	-0.046	507.7	16	14
	2	0.377	-0.037	499.4	30	28
	3	0.359	-0.043	488.0	24	23
	4	0.424	-0.055	461.4	7	11
	5	0.204	0.219	429.3	6	7
	6	0.160	0.325	414.7	10	10
	7	0.196	0.341	402.2	7	7

исследуемого образца состоит из двух квадрупольных дублетов с различным расщеплением.

Восстановленное распределение квадрупольных смещений $P(\epsilon)$ (рис. 1, *c*) при $T > T_N$ содержит интенсивный пик, а также пик с меньшей интенсивностью и значительно бóльшим значением ϵ . Следовательно, при $T = 675 \text{ K}$ в $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ существует два наиболее вероятных неэквивалентных структурных состояния ионов железа. На основании данных, полученных из анализа восстановленных распределений $P(v)$ и $P(\epsilon)$, была выполнена модельная обработка мёссбауэровского спектра (рис. 2, *a*). Мёссбауэровский спектр при температуре $T > T_N$ описывается двумя дублетами, соответствующими двум неэквивалентным структурным состояниям ионов Fe^{3+} . Результаты модельной обработки мёссбауэровских спектров приведены в таблице.

Для определения локальных зарядовых и магнитных состояний ионов железа были проведены мёссбауэровские исследования образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ при комнатной температуре. С помощью мёссбауэровского спектра образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$, измеренного при 295 К (рис. 2, *b* и 3, *a*), было восстановлено распределение сверхтонких магнитных полей $P(H)$. Восстановлены два распределения $P_1(H)$ и $P_2(H)$ в областях полей 320–475 и 460–530 кОе соответственно. Общее распределение $P(H)$ состоит из нескольких разрешенных пиков (рис. 3, *b*).

Как сообщалось в работах [7,8], компенсация заряда при гетеровалентном замещении ионов Bi^{3+} ионами Ca^{2+} происходит путем образования кислородных вакансий (т.е. появляются ионы Fe^{3+} в позициях с координационным числом по кислороду, равным 4). Оценим вероятность B существования катиона железа в октаэдрическом (Fe_o) или тетраэдрическом (Fe_t) кислородном окружении. В модели случайного распределения атомов вероятность B задается формулой

$$B = C_z^n c^n (1 - c)^{z-n}, \quad (1)$$

где n — число катионов в тетраэдрическом кислородном окружении Fe_t ; z — координационное число по кис-

лороду; c — концентрация тетраэдрических состояний ионов Fe^{3+} .

Концентрацию тетраэдрических состояний ионов Fe^{3+} из соображений локальной электронейтральности в рамках представления о формальных зарядах

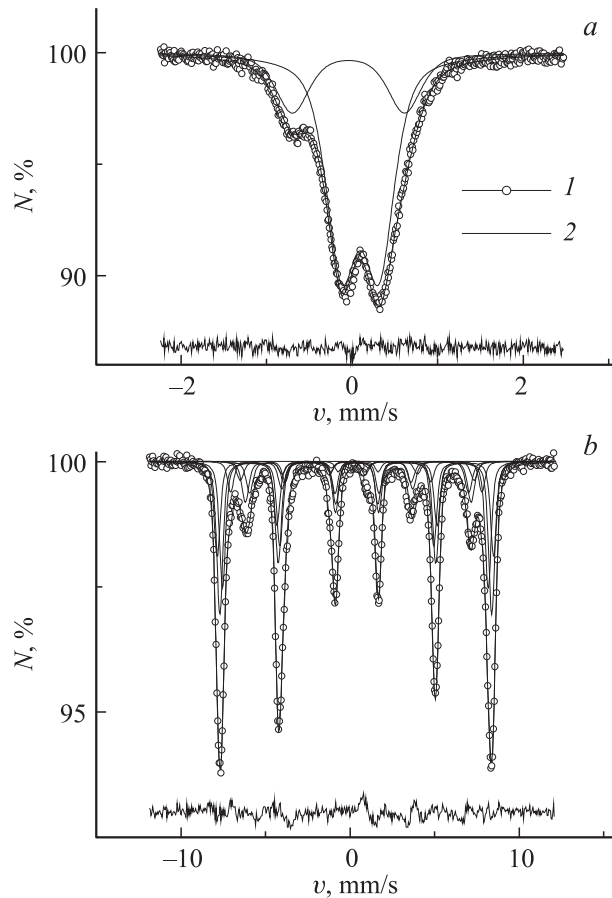


Рис. 2. Мёссбауэровские спектры образца $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$, измеренные при 675 (*a*) и 295 К (*b*). 1 — экспериментальные точки, 2 — результат модельной обработки по программе SPECTR. Под мёссбауэровскими спектрами показана разница между экспериментальным и модельным спектрами.

полагаем равной $c = x/2$, где x — концентрация ионов кальция. Ионы железа, находящиеся в октаэдрическом кислородном окружении Fe_o (координационное число z по кислороду равно 6), имеют шесть ближайших катионов железа в третьей координационной сфере, из которых $(z-n)$ катионов в октаэдрическом кислородном окружении Fe_o и n катионов в тетраэдрическом кислородном окружении Fe_t . Ионы Fe_o образуют связи $[Fe_o - (zO_o + nO_t) - ((z-n)Fe_o + nFe_t)]$. Аналогично для ионов Fe в тетраэдрическом кислородном окружении Fe_t (координационное число z по кислороду равно 4) рассматриваются связи $[Fe_t - (zO_t + nO_o) - ((z-n)Fe_t + nFe_o)]$.

Распределение $P(H)$ представляет собой распределение вероятностей существования состояния иона Fe^{3+} с определенным значением сверхтонкого поля H . Сравним распределение $P(H)$ (рис. 3, *b*) и распределение расчи-

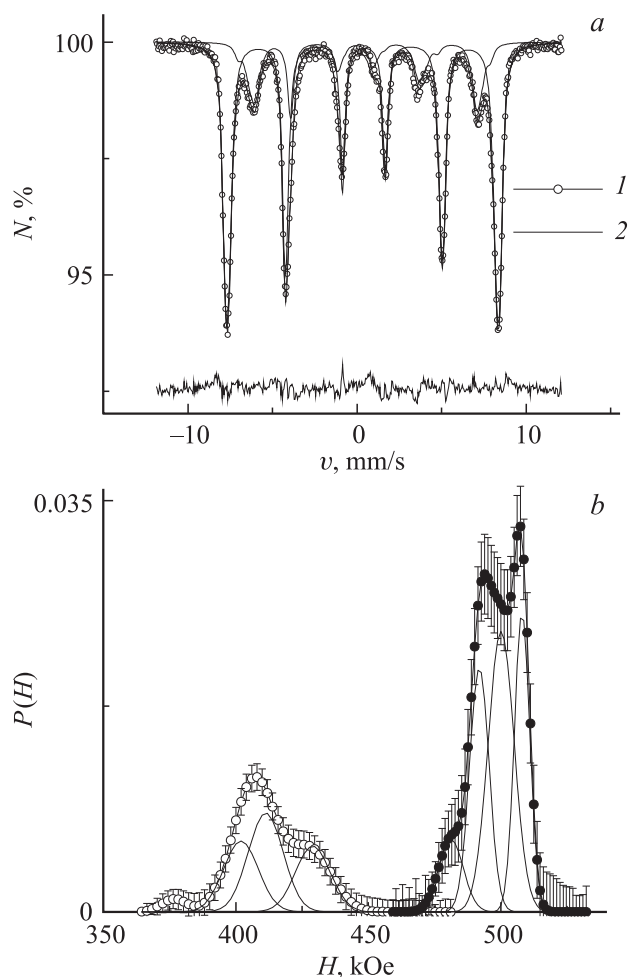


Рис. 3. *a*) Мёссбауэровский спектр образца $Bi_{0.5}Ca_{0.5}FeO_3$, измеренный при 295 К: 1 — экспериментальные точки, 2 — результаты обработки по программе DISTRI (восстановление распределения $P(H)$); линия под мёссбауэровским спектром — разность между экспериментальным спектром и результатами обработки. *b*) Восстановленные распределения сверхтонких магнитных полей $P(H)$.

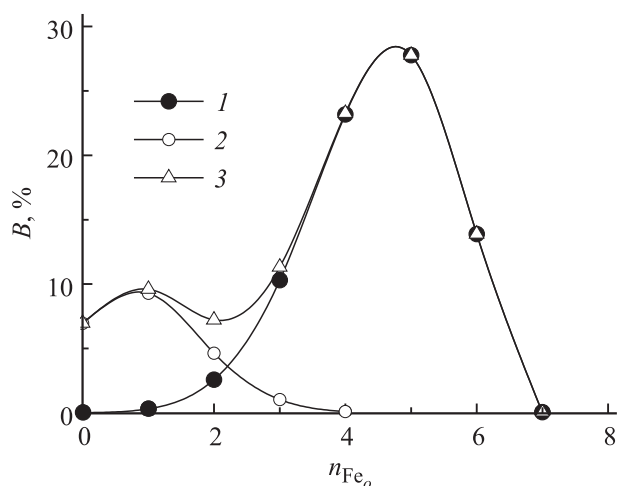


Рис. 4. Распределение вероятностей B существования иона железа в октаэдрическом Fe_o (1), тетраэдрическом Fe_t (2) кислородном окружении и распределение суммарных вероятностей для Fe_o и Fe_t (3). n_{Fe_o} — число катионов в октаэдрическом кислородном окружении Fe_o . Вероятности B для ионов Fe_t в тетраэдрическом кислородном окружении нормированы на соотношение долей состояний ионов Fe_o и Fe_t в образце перовскита $Bi_{0.5}Ca_{0.5}FeO_{3-y}$: 75% для Fe_o и 25% для Fe_t .

танных вероятностей B (рис. 4). Расчет вероятностей B по формуле (1) показал, что в исследуемом перовските $Bi_{0.5}Ca_{0.5}FeO_3$ при комнатной температуре существует четыре наиболее вероятных состояния ионов железа Fe^{3+} в октаэдрическом кислородном окружении и три наиболее вероятных состояния Fe^{3+} в тетраэдрических позициях (см. таблицу).

На основе этой модели распределение $P(H)$ (рис. 3) было разложено на семь гауссовских пиков, которые соответствуют семи наиболее вероятным состояниям ионов железа. Четыре наиболее вероятных состояния ионов железа в октаэдрическом кислородном окружении Fe_o (состояния 1–4 в таблице) соответствуют состояниям ионов железа $\{Fe_o - 6O_o - 6Fe_o\}$, $\{Fe_o - (5O_o + 1O_t) - (5Fe_o + 1Fe_t)\}$, $\{Fe_o - (4O_o + 2O_t) - (4Fe_o + 2Fe_t)\}$ и $\{Fe_o - (3O_o + 3O_t) - (3Fe_o + 3Fe_t)\}$. Три наиболее вероятных состояния ионов железа в тетраэдрическом кислородном окружении Fe_t (состояния 5–7 в таблице) соответствуют состояниям ионов железа $\{Fe_t - 4O_t - 4Fe_t\}$, $\{Fe_t - (3O_t + 1O_o) - (3Fe_t + 1Fe_o)\}$, $\{Fe_t - (2O_t + 2O_o) - (2Fe_t + 2Fe_o)\}$.

На основе данных, полученных из распределения сверхтонких полей $P(H)$, была проведена модельная обработка мёссбауэровского спектра. Мёссбауэровский спектр образца $Bi_{0.5}Ca_{0.5}FeO_{3-y}$ при комнатной температуре описывается семью секстетами, соответствующими семи наиболее вероятным неэквивалентным магнитным состояниям ионов железа (рис. 2, *b*). Параметры сверхтонких взаимодействий и доли A различных состояний ионов железа при комнатной температуре приведены в таблице.

Значения сдвигов мёссбауэровских линий δ при комнатной температуре свидетельствуют о том, что все ионы железа находятся в трехвалентном состоянии [14]. Сравнение полученных значений параметров сверхтонких взаимодействий при комнатной температуре с литературными данными для ионов железа в различном кислородном окружении [14] указывает на то, что первые четыре секстета с примерно равными сдвигами мёссбауэровских линий ($\delta \approx 0.35\text{--}0.43$ mm/s) и малыми квадрупольными смещениями соответствуют ионам Fe^{3+} в октаэдрическом кислородном окружении (Fe_o). Три секстета (состояния 5–7) со сдвигом мёссбауэровских линий $\delta \approx 0.16\text{--}0.21$ mm/s и большими значениями квадрупольного смещения ϵ отвечают ионам Fe^{3+} в тетраэдрическом кислородном окружении. Состояние 1 с наибольшим сверхтонким полем соответствует состоянию ионов Fe^{3+} в неискаженном октаэдрическом кислородном окружении. Состояния 2–4 отвечают состояниям ионов Fe^{3+} в октаэдрическом кислородном окружении, вблизи которых находятся катионы железа в тетраэдрическом кислородном окружении. Появление тетраэдрического состояния Fe^{3+} приводит к искажению кислородного октаэдра, изменению длин и углов связи $\text{Fe}_o\text{--O--Fe}_i$ и, следовательно, к уменьшению значения сверхтонкого поля для состояния иона железа в октаэдрическом кислородном окружении. Эффективный ионный радиус R для высокоспиновых состояний ионов $\text{Fe}_o^{3+}(3d^5)$ в октаэдрическом кислородном окружении ($z = 6$) равен $R(\text{Fe}_o^{3+}) = 0.645$ Å, а в тетраэдрическом ($z = 4$) — $R(\text{Fe}_t^{3+}) = 0.45$ Å [15]. Появление тетраэдрического состояния Fe^{3+} со значительно меньшим ионным радиусом приводит к искажению кислородного октаэдра, изменению длин и углов связи Fe--O--Fe . Различие в наблюдаемых значениях сверхтонких полей для семи состояний ионов железа (см. таблицу) связано с различными парциальными вкладами $H_{\text{СТНФ}}$ в сверхтонкое магнитное поле от иона Fe^{3+} , осуществляемыми посредством сверхобменных взаимодействий $\text{Fe}_o\text{--O--Fe}_o$, $\text{Fe}_o\text{--O--Fe}_i$ и $\text{Fe}_i\text{--O--Fe}_i$ [16]. Вклад $H_{\text{СТНФ}}$ в антиферромагнетиках появляется на ядрах железа как результат переноса спиновой плотности к центральному катиону $\text{F}(\uparrow)$ от ближайших соседних катионов железа, имеющих противоположную ориентацию спина $\text{F}(\downarrow)$ [16]. При этом величина $H_{\text{СТНФ}}$ определяется параметрами ковалентности химических связей $\text{Fe}^{3+}\text{--O}^{2-}$, а также углом связи в цепочках Fe--O--Fe [16,17].

Доли A состояний ионов железа в октаэдрических (A_o) и тетраэдрических (A_t) состояниях при комнатной температуре равны $76(\pm 2)$ и $24(\pm 2)\%$ соответственно. Значения долей для двух неэквивалентных состояний ионов железа при температуре выше температуры Нееля в пределах ошибки совпадают со значениями долей для состояний ионов железа в октаэдрическом A_o и тетраэдрическом кислородном окружениях A_t при комнатной температуре. Сравнение данных, полученных при анализе мёссбауэровских спектров, измеренных при комнатной температуре, с результатами мёссбауэров-

ских исследований при температуре выше температуры T_N показывает, что два наиболее вероятных состояния ионов железа при $T < T_N$ соответствуют состояниям ионов трехвалентного железа в октаэдрическом и тетраэдрическом кислородном окружении.

Компенсация заряда при гетеровалентном замещении ионов Bi^{3+} ионами Ca^{2+} в перовските $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ происходит путем образования кислородных вакансий. Существование ионов Fe^{3+} в тетраэдрическом кислородном окружении в перовските $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ указывает на наличие дефицита кислорода. Оценен параметр дефицита кислорода y по значениям относительных площадей парциальных спектров при комнатной температуре: $y = 0.23 \pm 0.02$. Полученное значение y совпадает с теоретическим расчетом параметра $y = 0.25$, выполненным в рамках представления о формальных зарядах атомов и локальной электронейтральности: $y = x/2$, где x — концентрация двухвалентного кальция.

4. Заключение

Перовскит $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ исследовался методом эффекта Мёссбауэра при температурах 295 и 675 К. Измерена температура магнитного фазового перехода перовскита $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ (температура Нееля) $T_N = 640 \pm 10$ К. Выше температуры Нееля существует два неэквивалентных структурных состояния ионов железа. Мёссбауэровские исследования при комнатной температуре показали, что замещение ионов Bi^{3+} ионами Ca^{2+} в количестве 0.5 at.% приводит к появлению семи наиболее вероятных неэквивалентных магнитных состояний ионов железа с существенно различными значениями параметров сверхтонких взаимодействий. Мёссбауэровский спектр $\text{Bi}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{FeO}_3$ при комнатной температуре удовлетворительно описывается суперпозицией семи секстетов. Все ионы железа находятся в трехвалентном состоянии. Четыре состояния ионов железа соответствуют Fe^{3+} в октаэдрическом кислородном окружении, а три состояния с меньшими значениями сверхтонких магнитных полей соответствуют ионам Fe^{3+} в тетраэдрическом кислородном окружении.

Список литературы

- [1] А.К. Звездин, А.П. Пятаков. УФН **174**, 465 (2004).
- [2] Ю.Н. Веневцев, В.В. Гагулин, В.Н. Любимов. Сегнетомагнетика. Наука, М. (1982). 223 с.
- [3] I. Sosnowska, T. Peterlin-Neumaier, E. Steichele. J. Phys. C **15**, 4835 (1982).
- [4] A.V. Zalesky, A.A. Frolov, T.A. Khimich, A.A. Bush, V.S. Pokatilov, A.K. Zvezdin. Europhys. Lett. **50**, 547 (2000).
- [5] В.С. Покатилов, В.В. Покатилов, А.С. Сигов. ФТТ **51**, 58 (2009).
- [6] В.С. Покатилов, А.С. Сигов, А.О. Коновалова. Изв. РАН. Сер. физ. **74**, 386 (2010).
- [7] И.О. Троянчук, О.С. Мантыцкая, А.Н. Чобот, Н.В. Терешко. ФТТ **51**, 1984 (2009).

- [8] И.О. Троянчук, Д.В. Карпинский, М.В. Бушинский, О. Прохненко, М. Копцевич, Р. Шимчак, Я. Пиетоса. *ЖЭТФ* **134**, 105 (2008).
- [9] V.A. Khomchenko, M. Korsecwic, A.M.L. Lopes, Y.G. Pogorelov, J.P. Araujo, J.M. Vieira, A.L. Kholkin. *J. Phys. D* **41**, 102 003 (2008).
- [10] D. Kothari, V.R. Reddy, A. Gupta, V. Sathe, A. Banerjee, S.M. Gupta, A.M. Awasthi. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 202 505 (2007).
- [11] C. Lepoittevin, S. Malo, N. Barrier, N. Nguyen, G. Van Tendeloo, M. Hervieu. *J. Solid State Chem.* **181**, 2601 (2008).
- [12] В.С. Русаков. Мёссбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем. Изд-во Ин-та ядерной физики НЯЦ, Алматы (2000). 430 с.
- [13] А.М. Афанасьев, М.А. Чуев. *ЖЭТФ* **107**, 989 (1995).
- [14] F. Menil. *J. Phys. Chem. Solids* **46**, 763 (1985).
- [15] R.D. Shannon. *Acta Cryst. A* **32**, 751 (1976).
- [16] N.L. Huang, R. Orbach, E. Simanek, J. Owen, D.R. Taylor. *Phys. Rev.* **156**, 383 (1967).
- [17] К.В. Похолок, И.А. Пресняков, А.В. Соболев, В.С. Русаков, А.В. Баранов, В.П. Горьков. *Изв. РАН. Сер. физ.* **67**, 1030 (2003).