

05,10

Особенности магнитной структуры и свойств наноразмерных порошков гексаферрита бария, полученных методом гидротермального синтеза

© А.Ю. Миронович¹, В.Г. Костишин¹, С.А. Мельников¹, М.О. Кондратьев¹,
Е.С. Савченко¹, А.Г. Савченко¹, А.И. Риль²

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования „Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: mironovich.ai@misiss.ru

Поступила в Редакцию 11 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 11 декабря 2025 г.

Принята к публикации 24 декабря 2025 г.

Исследовано влияние концентрации гидроксид-ионов (OH^-) на фазовый состав порошков гексаферрита бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, синтезированных гидротермальным методом. Установлено, что для формирования фазы гексаферрита без примесей необходим значительный избыток щелочи в реакционной смеси (соотношение $\text{OH}/\text{NO}_3 > 16$). С помощью метода сканирующей электронной микроскопии показано, что образующийся порошок состоит из тонких субмикронных пластинок с четко выраженным гранями. При этом установлено, что внутреннее строение частиц несовершенно, что отражается на рентгеновских дифрактограммах, мёссбауэровских спектрах и магнитных характеристиках порошка ($M_s = 18 \text{ emu/g}$, $M_r = 3.7 \text{ emu/g}$, $H_c = 0.35 \text{ kOe}$). Показано, что отжиг частиц приводит к устранению дефектов и повышению магнитных параметров ($M_s = 60 \text{ emu/g}$, $M_r = 24 \text{ emu/g}$, $H_c = 3.6 \text{ kOe}$). Продемонстрировано, что одноосное прессование полученного порошка $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ приводит к формированию текстуры типа (001). После отжига при 900°C спрессованный феррит характеризуется анизотропией магнитных свойств, проявляющейся в двукратной разнице коэффициентов прямоугольности петель магнитного гистерезиса, снятых при приложении магнитного поля параллельно (0.3) и перпендикулярно (0.61) плоскости образца.

Ключевые слова: гексаферрит бария, гидротермальный синтез, магнитные свойства, анизотропия, кристаллографическая текстура.

DOI: 10.61011/FTT.2026.01.62585.342-25

1. Введение

Гексаферрит бария $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ (BaM) является известным соединением, обладающим уникальным набором свойств, в особенности магнитных: высокой коэрцитивной силой, умеренной намагниченностью насыщения, большой константой анизотропии, высоким значением частоты ферромагнитного резонанса, химической устойчивостью. Эти свойства определяют основные практические приложения BaM: постоянные магниты, приборы СВЧ-электроники, устройства хранения информации.

В последнее десятилетие активно исследуется зависимость функциональных характеристик гексаферрита бария от его химического состава ($\text{BaFe}_{12-x}\text{Me}_x\text{O}_{19}$, где Me — катионы различных металлов [1–5]), метода и условий синтеза [6], формы получаемого материала (nano- и микродисперсные порошки [7], пленки [8], изотропная и анизотропная керамика [9,10]). Интерес к гексаферритам обусловлен необходимостью решения актуальных задач по разработке материалов для 5G и 6G устройств связи, более миниатюрных или даже

планарных СВЧ-устройств, постоянных магнитов, не содержащих редкоземельных элементов, а также магнитной памяти с высокой плотностью записи. Материал для таких применений должен прежде всего обладать анизотропией магнитных свойств. Анизотропные гексаферриты могут быть получены благодаря использованию различных принципов и приемов, включая эпитаксиальный рост [11], ориентацию частиц в магнитном поле [12], самотекстурирование под нагрузкой [13].

Равновесной формой зерен гексаферрита бария является шестиугольная пластинка. При этом кристаллографическая ось c , совпадающая с осью легкого намагничивания, направлена по нормали к плоскости пластинки. Гипотетически, такое строение позволяет относительно просто получать анизотропные керамические образцы гексаферритов спеканием частиц, предварительно ориентированных посредством приложения давления, магнитного поля или их одновременного действия. Практически, реализация такого подхода затрудняется особенностями реальной морфологии частиц (отклонением формы от равновесной, размерами, соотношением

диаметра к толщине), а также самопроизвольной агрегации (вследствие агломерации и магнитного диполь-дипольного взаимодействия).

Для получения текстурированных гексаферритов предпочтительно использовать порошки, состоящие из дискретных кристаллитов с большим значением отношения диаметра к толщине. Получить гексаферрит бария в таком состоянии на данный момент проще всего используя метод гидротермального синтеза. Эта технология дает возможность синтезировать различные твердофазные вещества из раствора [14–18], что позволяет кристаллитам принимать форму, близкую к равновесной и не зависящую от морфологии частиц исходных реагентов, как в случае синтеза по твердофазным реакциям.

Для получения гексаферрита бария чаще всего гидротермальной обработке подвергают смесь раствора солей железа и бария с раствором сильного основания. Сущность методики представляется достаточно простой, но большое количество возможных параметров синтеза — температура, время, тип реагентов, их концентрации и соотношения, объем автоклава — не всегда позволяет быстро подобрать оптимальный режим и получить желаемый результат. В некоторых случаях целевую фазу (гексаферрит) практически не удается получить без последующего высокотемпературного отжига [19,20].

На данный момент широко распространена следующая гипотеза формирования гексаферрита в гидротермальных условиях. Сначала при смешивании растворов Fe^{3+} и OH^- образуется ферригидрит. Считается, что в гидротермальных условиях он растворяется с образованием комплексных ионов $[\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$, которые взаимодействуют друг с другом и с ионами бария, формируя молекулу $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [21]. Растворение ферригидрита происходит при взаимодействии его активных поверхностных позиций с ионами/молекулами растворителя. Эти же позиции способны адсорбировать свободные катионы металлов [22,23]. В связи с этим в работе [24] сделано предположение, что ионы бария могут адсорбироваться на ферригидrite и блокировать доступ растворителя к его активным позициям, что препятствует растворению и дальнейшему образованию гексаферрита бария. Анализируя условия удачного гидротермального синтеза BaM, можно предположить, что для „разблокировки“ поверхностных позиций требуются повышенные температуры или повышенные концентрации гидроксид-ионов. Действительно, во многих работах используется большой избыток гидроксид-анионов (отношение $\text{OH}/\text{NO}_3 = 15–30$ [25–28]). С другой стороны, некоторым удается получить гексаферрит используя меньшие количества щелочи ($\text{OH}/\text{NO}_3 = 2–5$ [29–31]). В данной работе непосредственно исследуется влияние концентрации OH^- на фазовый состав порошков, получаемых гидротермальной обработкой раствора Fe^{3+} , Ba^{2+} и OH^- . Демонстрируется, что повышение количества свободных гидроксид-анионов в растворе (при постоянстве прочих условий синтеза) действительно приводит к образованию гексаферрита бария в гидротермальных условиях.

Кроме того, показывается, что при прессовании получаемых порошков BaM в заготовках образуется текстура, приводящая к анизотропии магнитных свойств.

2. Экспериментальная часть

Исследуемые порошки были получены методом гидротермального синтеза. В качестве прекурсора использовалась смесь водного раствора нонагидрата нитрата железа $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и нитрата бария $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ с водным раствором гидроксида натрия NaOH в соотношении 40 ml/40 ml, соответственно. Растворы изготавливались с расчетом на то, что в конечном объеме (80 ml) концентрация ионов железа составит 0.1 mol/l, а соотношение $\text{Fe}^{3+}/\text{Ba}^{2+} = 9$ (как оптимальное для получения гексаферрита [32]). Количество NaOH рассчитывались таким образом, чтобы соотношение OH/NO_3 составляло 2.5, 5, 8, 12 и 16. В соответствие с этим соотношением образцы маркируются как BaM-2.5, BaM-5 и т. д. Полученные растворы смешивали в тефлоновом стакане объемом 100 ml, который загружался в автоклав. Автоклав помещался в муфельную печь, нагревался до 180 °C в течение 1 h и выдерживался при этой температуре 4 h. Полученный осадок тщательно промывался дистиллированной водой на установке вакуумной фильтрации, а затем сушился в термостате при 90 °C в течение 8 h, после чего перемалывался. Для дополнительных исследований из порошка BaM-16 на гидравлическом прессе с усилием 4 t изготавливается таблетка диаметром 12 mm. Полученная таблетка, а также часть порошка отжигались на воздухе при 900 °C в течение 1 h (скорость нагрева составляла 15°/min, охлаждение не контролировалось).

Фазовый анализ полученных образцов проводился на рентгеновских дифрактометрах Bruker D8 Advance (излучение $\text{Cu}K_\alpha$, $\lambda = 0.154 \text{ nm}$) и Bruker D2 PHASER. Полученные дифрактограммы обрабатывались методом Ритвельда в программе Profex [33]. Магнитные параметры измерялись с помощью вибромагнетометра JDAW-2000D. Для изучения микроструктуры порошка использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM3030. Мессбауэровские спектры образцов были получены на установке EM MS-1104 с источником Co^{57} в родиевой матрице.

3. Результаты и обсуждение

Рентгеновские дифрактограммы полученных порошков представлены на рис. 1. По результатам рентгенофазового анализа можно заключить, что образцы BaM-2.5 и BaM-5 состоят из ферригидрита, а BaM-12 и BaM-16 из гексаферрита бария. В образце BaM-8 наблюдаются рефлексы обеих фаз. Это позволяет заключить, что соотношение OH/NO_3 является одним из ключевых параметров гидротермального синтеза BaM и для формирования целевой фазы необходим существенный избыток щелочи. Также на дифрактограммах образцов BaM-2.5 и

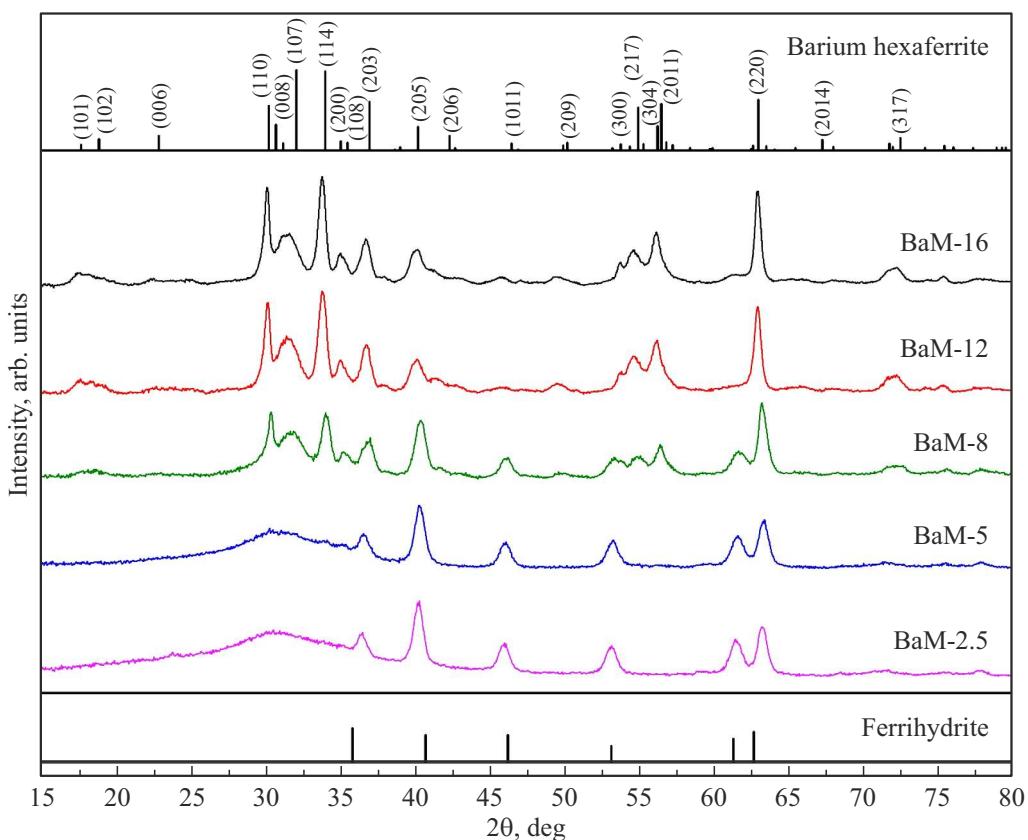


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы порошков, полученных при разных соотношениях OH/NO_3 .

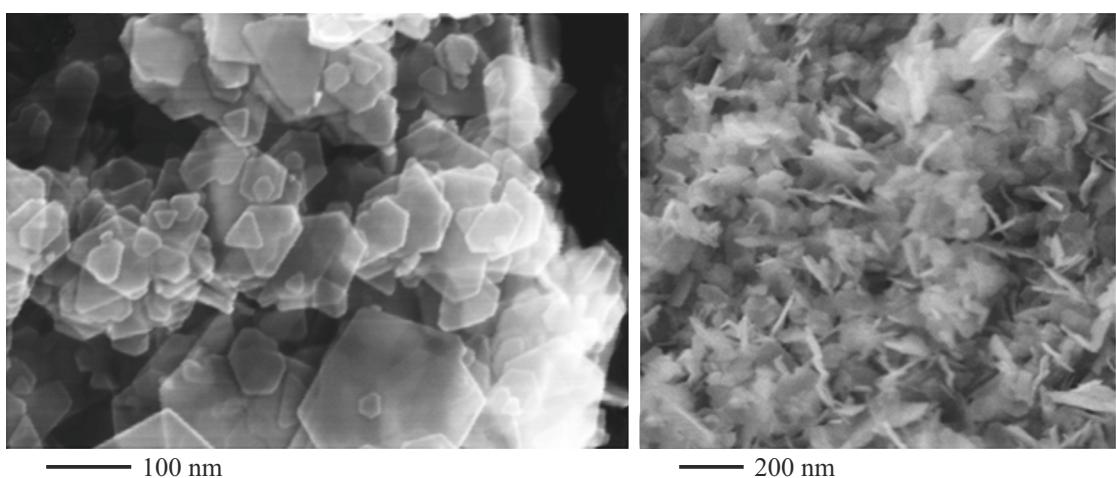


Рис. 2. Электронные микрофотографии образца BaM-16.

BaM-5 присутствует аморфное гало на 31° . Оно может быть связано с наличием в образцах ферригидрита особенно мелкой фракции. По количеству рефлексов на дифрактограмме исследователи выделяют два „вида“ ферригидрита — 2-линейчатый и 6-линейчатый. Считается, что в основном различие между этими видами обусловлено размерами частиц [34]. Таким образом, можно предположить, что в образцах присутствуют частицы различных размеров, что и приводит к та-

кому виду дифрактограмм. При этом центр наиболее интенсивного пика (гало) 2-линейчатого ферригидрита ожидается обнаружить на 35° . Однако, допирание различными элементами способно вызывать смещение центра гало, в том числе и на несколько градусов [35]. Так как в растворе присутствует большое количество ионов бария, можно предположить, что они попадают в структуру ферригидрита. Этим можно объяснить сдвиг гало 2-линейчатого ферригидрита в сторону меньших

углов, а также изменение соотношений интенсивностей рефлексов 6-линейчатого ферригидрита (по сравнению с литературными данными).

Ширины различных рефлексов гексаферрита неодинаковы, что свидетельствует об анизотропной форме частиц. Это особенно заметно в диапазоне углов 2θ от 30 до 35°: рефлекс (110) является наиболее узким, (107) — наиболее широким, а (114) занимает промежуточное положение. Такая конфигурация отражает пластинчатую форму кристаллитов, при которой кристаллографическая ось c направлена по нормали к плоскости пластиинки, а оси a и b лежат в ней. Это согласуется с электронными микрофотографиями образца BaM-16, представленными на рис. 2. Полученные пластинчатые кристаллиты гексаферрита имеют толщину не более 20 nm и ширину от 20 до 200 nm.

Несмотря на то что дифрактограммы образцов BaM-12 и BaM-16 практически идентичны, фактически фазовый состав этих порошков может отличаться. Известно, что метод рентгеновской дифракции имеет ограничения, связанные с размерами области когерентного рассеяния и степенью кристалличности образцов. Так, крайне малые частицы ферригидрита со слабоупорядоченной структурой могут не проявляться на дифрактограммах. Поэтому для уточнения фазового состава порошков использовалась мёссбауэровская спектроскопия, имеющая большее разрешение, нежели метод рентгеновской дифракции.

Мёссбауэровские спектры образцов представлены на рис. 3, а их параметры — в таблице. Спектр образца BaM-2.5 представляет собой дублет с параметрами, соответствующими спектру ферригидрита (изомерный сдвиг $IS = 0.35$ mm/s, квадрупольное расщепление $QS = 0.67$ mm/s) [36]. Спектры порошков BaM-12 и BaM-16 обладают сверхтонкой магнитной структурой, очевидно, обусловленной ионами железа в решетке BaM. Спектры были разложены на 7 секстетов, что отличается от количества, необходимого для спектра чистого $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ [37]. Кроме того, параметры полученных секстетов отличаются от известных в литературе [37]: особенно выделяются более низкие значения магнитных полей на ядрах ^{57}Fe . Также следует отметить относительно большую ширину линий компонент. Все эти особенности могут быть обусловлены двумя факторами. Во-первых, малыми размерами частиц и, соответственно, большим вкладом поверхности. Во-вторых, наличием существенного количества дефектов кристаллической решетки. Действительно, размеры области когерентного рассеяния, рассчитанные по ширине рентгеновских рефлексов, составляют 23 и 7 nm в направлениях [100] и [001], соответственно. Это значительно меньше реальных размеров кристаллов, наблюдавшихся на рис. 2. Такое несоответствие является признаком высокой степени дефектности кристаллической структуры, которая влияет на вид рентгеновских дифрактограмм и мёссбауэровских спектров. Среди 7 секстетов по изомерному сдвигу можно однозначно определить, что

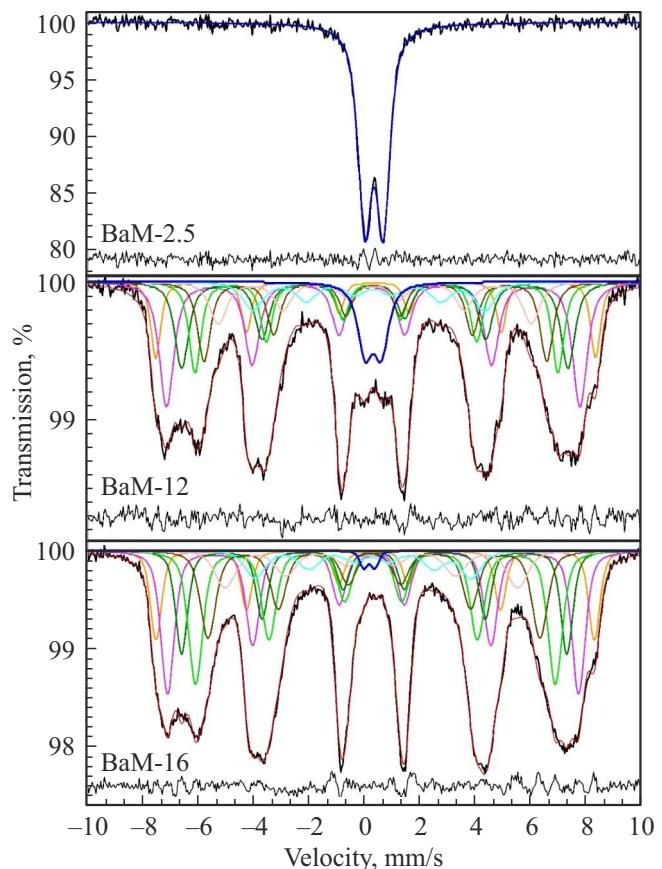


Рис. 3. Мёссбауэровские спектры порошков BaM-2.5, BaM-12 и BaM-16.

компоненты C2 относятся к железу в позиции $4f_1$. Судя по величинам магнитных полей (H_{eff}), секстеты C1 и C3 соответствуют железу в позициях $2a/4f_2$. С одной стороны, секстет C3, как характеризующийся меньшей величиной H_{eff} , следует отнести к позиции $2a$, а C1 — к $4f_2$. С другой стороны, в этом случае возникает несогласие по относительным площадям: теоретическое значение для $2a$ составляет 8.3 %, а для $4f_2$ — 16.7 %. Это противоречие не позволяет однозначно установить соответствие секстетов C1 и C3 позициям $2a$ и $4f_2$. Секстеты C4 и C5 в соответствии с их параметрами следует отнести к неэквивалентным положениям позиции $12k$. Секстеты C6 и C7 являются плохо разрешенными, а также характеризуются нестандартными для гексаферрита значениями параметров, в силу чего их интерпретация затруднительна. Также из-за сильного перекрытия с другими компонентами в спектре не удалось выделить секстет, соответствующий позиции $2b$.

Кроме секстетов, в спектрах образцов BaM-12 и BaM-16 также присутствует дублет. Интенсивности дублета — главное отличие между данными спектрами. В случае BaM-12 дублет можно выделить явно, и он вносит значительный вклад в спектр (6.8 %). Напротив, площадь дублета в образце BaM-16 пренебрежимо мала (< 1 %). Параметры дублета в спектре BaM-12 соот-

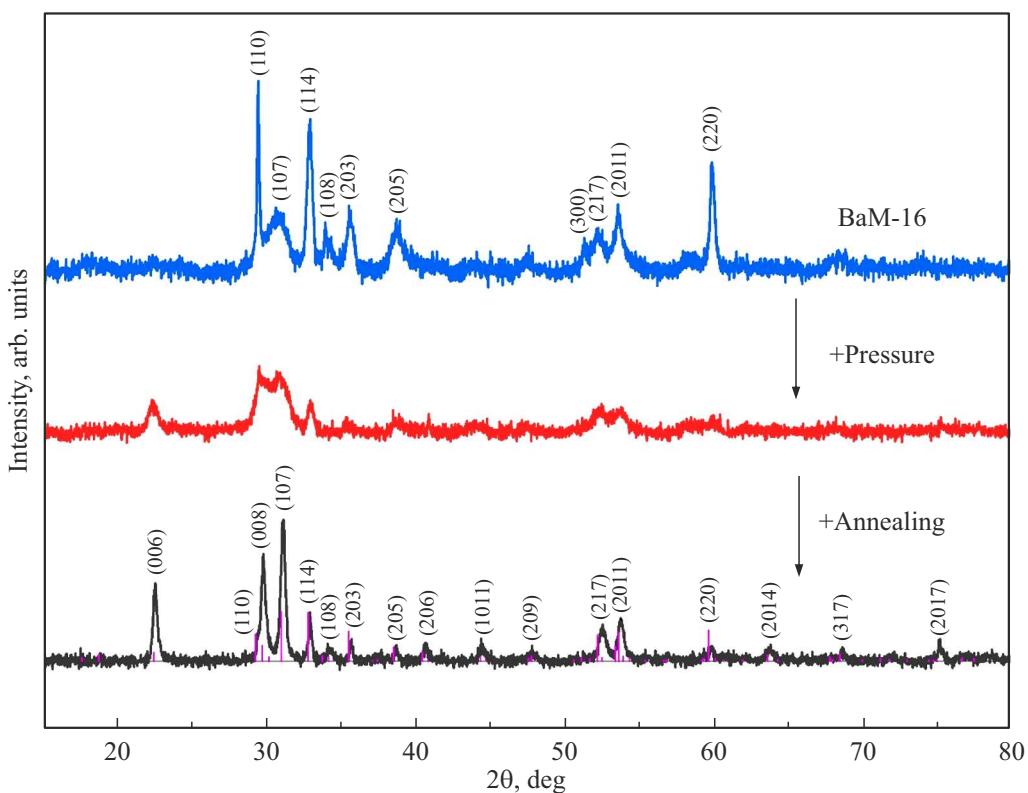


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы образца BaM-16 после прессования и отжига.

ветствуют таковым для BaM-2.5. Таким образом можно заключить, что в образце BaM-12 присутствует фракция ферригидрита, неразличимая на рентгеновских дифрактограммах. В случае BaM-16 параметры дублета отличаются. С одной стороны, это может быть обусловлено неточностью подгонки вследствие низкой интенсивности резонансных линий. С другой стороны, возникновение такого дублета может быть вызвано не присутствием ферригидрита, а вкладом от наиболее дефектных областей у поверхности частиц гексаферрита. Так или иначе, из результатов мёссбауэровской спектроскопии следует, что образец BaM-16 содержит гораздо большее количество гексаферрита по сравнению с BaM-12.

В связи с полученными результатами для дальнейших экспериментов использовался образец BaM-16. На рис. 4 представлены дифрактограммы порошка BaM-16 до прессования, а также спрессованной из него таблетки до и после ее отжига при 900 °C. Как можно заметить, прессование приводит к существенному преобразованию дифрактограммы. В первую очередь следует отметить появление рефлекса (006). Далее, выравниваются интенсивности рефлексов (110) и (107). Интенсивности остальных рефлексов по отношению к (107) заметно снижаются, а часть рефлексов пропадает. Все эти изменения свидетельствуют об упорядочении частиц и формировании текстуры (001).

Отжиг феррита, по-видимому, способствовал устранению дефектов и увеличению области когерентного

рассеяния, что привело к сужению рентгеновских рефлексов. Это позволило оценить соотношение интенсивностей различных пиков и более достоверно охарактеризовать текстуру образца.

В порошковой дифрактограмме изотропного гексаферрита наиболее интенсивными являются рефлексы (114) и (107). В случае пика (114) можно сказать, что его наличие и интенсивность отражают изотропность образца. Пик (107) нельзя оценивать аналогично, так как в случае текстуры типа (001) он может быть обусловлен кристаллитами, отклоненными на небольшой угол от оси ориентировки. Стоит отметить, что такие зерна все равно будут вносить вклад в анизотропию магнитных свойств. В исследуемом образце присутствуют оба пика, но в отличие от изотропного порошка, в котором интенсивности этих рефлексов должны быть практически равны, в данном случае рефлекс (114) практически в 3 раза слабее, чем (107). Для демонстрации несоответствий на дифрактограмму образца наложена штрих-дифрактограмма изотропного порошка гексаферрита бария, нормированная по рефлексу (114). Можно заметить, что интенсивности некоторых других пиков также отличаются от ожидаемых для изотропного образца. Так, отношения интенсивностей рефлексов (006) и (008) к интенсивности (107) для изотропного порошка составляют порядка 0.1 и 0.17 соответственно. В полученном образце эти значения возрастают до 0.55 и 0.76 соответственно. Это позволяет считать образец

частично текстурированным и ожидать проявления анизотропии его магнитных свойств.

На рис. 5, *a* представлены петли магнитного гистерезиса порошка BaM-16 до и после отжига при 900 °C. Магнитные параметры отожженного порошка хорошо согласуются с известными значениями для гексаферрита бария (намагниченность насыщения $M_s = 60$ emu/g, остаточная намагниченность $M_r = 24$ emu/g, коэрцитивная сила $H_c = 3.6$ kOe). Феррит, полученный непосредственно из автоклава, несмотря на то, что проявляет магнетизм, значительно уступает по всем параметрам отожженному образцу: $M_s = 18$ emu/g, $M_r = 3.7$ emu/g, $H_c = 0.35$ kOe. По-видимому, такие различия обусловлены большим количеством дефектов кристаллической решетки гидротермально синтезированного феррита, о чем свидетельствуют уширение рентгеновских рефлексов и мёссбауэровских пиков, а также наличие дополнительных компонент мёссбауэровского спектра. Отжиг устраняет дефекты, что приводит к значительному увеличению магнитных характеристик.

На рис. 5, *b* представлены петли магнитного гистерезиса полученной из порошка BaM-16 таблетки, отожженной при 900 °C. Измерения проводились в магнитном поле, приложенном перпендикулярно и параллельно

Параметры мёссбауэровских спектров полученных образцов *

OH/NO ₃	Компонента спектра	IS , mm/s	QS , mm/s	H_{eff} , kOe	S , %	Γ , mm/s
BaM-2.5	Ферригидрит	0.35	0.67	—	100	0.58
BaM-12	C1 — $2a/4f_2$	0.35	0.07	492	12.1	0.49
	C2 — $4f_1$	0.28	0.07	462	20.3	0.56
	C3 — $2a/4f_2$	0.35	0.03	430	16.5	0.56
	C4 — $12k$	0.35	0.13	401	15.6	0.53
	C5 — $12k\text{-}2$	0.38	-0.04	373	15	0.7
	C6	0.22	-0.02	325	7	0.87
	C7	0.05	-0.38	231	6.7	0.87
	Ферригидрит	0.33	0.66	—	6.8	0.67
BaM-16	C1 — $2a/4f_2$	0.36	0.06	490	11.4	0.48
	C2 — $4f_1$	0.29	0.05	460	21.9	0.58
	C3 — $2a/4f_2$	0.34	0.02	431	14.2	0.52
	C4 — $12k$	0.36	0.08	402	21.7	0.62
	C5 — $12k\text{-}2$	0.35	-0.02	371	15.3	0.66
	C6	0.24	0.03	327	8.5	0.87
	C7	0.1	-0.31	242	6.2	0.87
	Дублет	0.17	0.4	—	0.8	0.34

* IS , QS , H_{eff} , Γ и S соответственно изомерный сдвиг, квадрупольное расщепление, эффективное магнитное поле на ядрах Fe⁵⁷, ширина линии и относительная площадь компоненты.

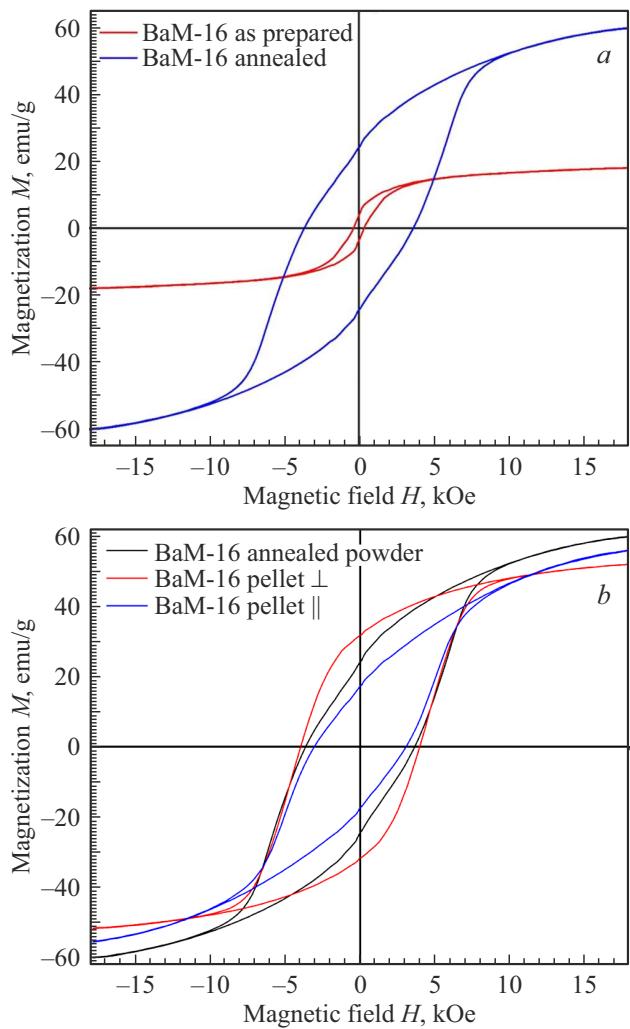


Рис. 5. Петли магнитного гистерезиса: *a* — порошка BaM-16 до и после отжига; *b* — порошка и таблетки BaM-16 после отжига.

плоскости таблетки. Для сравнения, на рис. 5, *b* показана петля гистерезиса отожженного порошка. Различия представленных петель гистерезиса являются свидетельством анизотропного характера магнитных свойств образца. В частности, петля порошка, который в первом приближении можно считать изотропным, характеризуется коэффициентом прямоугольности 0.4. В случае таблетки это значение зависит от положения образца относительно приложенного поля и составляет 0.3 или 0.61 для параллельной или перпендикулярной ориентации, соответственно. Аналогично изменяется коэрцитивная сила: у порошка она составляет 3.6 kOe, а у таблетки 3.96 или 3.06 kOe. Полученные результаты демонстрируют, что в таблетке BaM-16 есть ось легкого намагничивания, направленная по нормали к плоскости образца, и ось трудного намагничивания, параллельная плоскости образца. Эти данные согласуются со сделанными выше выводами о наличии в таблетке гексаферрита текстуры, наведенной одноосным прессованием порошка.

4. Заключение

Экспериментально подтверждено, что соотношение OH/NO_3 является критическим параметром гидротермального синтеза гексаферрита бария. Формирование однофазного порошка $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ происходит только при значительном избытке щелочи ($\text{OH}/\text{NO}_3 > 16$).

В результате комплексного анализа методами рентгеновской дифракции, мёссбауэровской спектроскопии, магнитометрии и электронной микроскопии установлено, что образец, полученный при значении $\text{OH}/\text{NO}_3 = 16$, состоит из нанопластиночек гексаферрита бария толщиной до 20 nm и диаметром от 20 до 200 nm с высокой степенью дефектности кристаллической структуры. Отжиг при 900 °C устранил дефекты и значительно улучшил магнитные характеристики порошка: намагниченность насыщения повышается с 18 до 60 emu/g, остаточная намагниченность с 3.7 до 24 emu/g, а коэрцитивная сила с 0.35 до 3.6 kOe.

Установлено, что одноосное прессование полученного порошка гексаферрита бария приводит к частичной ориентации пластинчатых частиц и формированию в заготовке текстуры типа (001). Образец, полученный одноосным прессованием данного порошка с последующим отжигом, демонстрирует выраженную анизотропию магнитных свойств. При измерении в направлении, перпендикулярном плоскости таблетки, наблюдаются повышенные значения коэрцитивной силы (3.96 kOe) и коэффициента прямоугольности петли гистерезиса (0.61) по сравнению с измерением в параллельном направлении (3.06 kOe и 0.31) и с порошком (3.6 kOe и 0.4).

Таким образом, в работе продемонстрирована эффективность представленного подхода к получению анизотропной керамики $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, заключающегося в гидротермальном синтезе дискретных частиц с пластинчатой морфологией, их последующем уплотнении одноосным прессованием и отжигом. Полученные результаты открывают перспективы для создания новых материалов на основе гексаферрита бария для постоянных магнитов и СВЧ-устройств.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-13-00268).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.A. Vinnik, A.Yu. Starikov, V.E. Zhivulin, K.A. Astapovich, V.A. Turchenko, T.I. Zuban, S.V. Trukhanov, J. Kohout, T. Kmječ, O. Yakovenko, L. Matzui, A.S.B. Sombra, D. Zhou, R.B. Jotania, C. Singh, A.V. Trukhanov. Ceram. Int. **47**, 12, 17293 (2021).
- [2] К.П. Гафарова, В.Е. Живулин, С.А. Гудкова, Г.П. Вяткин, Л.А. Песин, Д.П. Шерстюк, Д.А. Винник. ЖСХ **65**, 9, 132001 (2024).
- [3] В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, К.В. Похолок, А.В. Труханов, И.М. Исаев, А.Ю. Миронович, М.А. Дарвиш. ФТТ **63**, 10, 1496 (2021).
- [4] В.В. Коровушкин, М.Н. Шипко, В.Г. Костишин, И.М. Исаев, А.Ю. Миронович, С.В. Труханов, А.В. Труханов. Неорг. материалы **55**, 10, 1065 (2019).
- [5] Д.П. Шерстюк, А.И. Ковалева, А.Р. Зыкова, В.Е. Живулин, Д.Е. Живулин, Д.А. Винник. ЖСХ **66**, 1, 139712 (2025).
- [6] D.V. Wagner, K.V. Kareva, V.A. Zhuravlev, O.A. Dotsenko, R.V. Minin. Inventions **8**, 1, 26 (2023).
- [7] P. Xu, X. Han, M. Wang. J. Phys. Chem. C **111**, 16, 5866 (2007).
- [8] V.G. Kostishin, A.Yu. Mironovich, A.V. Timofeev, R.I. Shakiryanov, I.M. Isaev, G.A. Skorlupin, A.I. Ril. Mater. Today Commun. **31**, 103804 (2022).
- [9] C.-C. Huang, C.-N. Wang, C.-C. Mo, H.-H. Hsu, IEEE Trans. Magn. **58**, 4, 1 (2022).
- [10] Y. Li, Q. Liu, M. Qi, Y. Chen. J. Electron. Mater. **52**, 523 (2023).
- [11] V.G. Kostishin, A.Yu. Mironovich, A.V. Timofeev, I.M. Isaev, R.I. Shakiryanov, G.A. Skorlupin, A.I. Ril. Superlattices Microstruct. **158**, 107005 (2021).
- [12] F. Herrault, S. Cui, X.N. Guan, A.F. Gross. Microelectron. Eng. **236**, 111467 (2021).
- [13] A.Z. Eikeland, F.H. Gjørup, H.L. Andersen, M. Christensen. RSC Adv. **14**, 10790 (2024).
- [14] X. Jing, Y. Li, Q. Yin. Mater. Sci. Eng. B **99**, 1–3, 506 (2003).
- [15] I.J. Clark, T. Takeuchi, N. Ohtori, D.C. Sinclair. J. Mater. Chem. **9**, 1, 83 (1999).
- [16] Y. Zheng, E. Shi, S. Cui, W. Li, X. Hu. J. Am. Ceram. Soc. **83**, 10, 2634 (2000).
- [17] Y.A. Garanin, R.I. Shakiryanov, D.I. Shlimas, M.A. Saidulayeva, D.B. Borgekov, M.E. Kaliyekperov. Crystals **15**, 10, 904 (2025).
- [18] Y. Garanin, R. Shakiryanov, D. Borgekov, N. Volodina, D. Shlimas, M. Zdorovets. Sci. Rep. **15**, 1, 26165 (2025).
- [19] H. Vijayan, C.G. Knudsen, M.I. Mørch, M. Christensen. Mater. Chem. Front. **5**, 9, 3699 (2021).
- [20] E. Rezaie, A. Rezanezhad, L.S. Ghadimi, A. Hajalilou, N. Arsalan. Ceram. Int. **44**, 16, 20285 (2018).
- [21] M.L. Wang, Z.W. Shih, C.H. Lin. J. Cryst. Growth **114**, 3, 435 (1991).
- [22] M. Sajih, N.D. Bryan, F.R. Livens, D.J. Vaughan, M. Descostes, V. Phrommavanh, J. Nos, K. Morris. Geochim. Cosmochim. Acta **146**, 150 (2014).
- [23] J.C. Mendez, T. Hiemstra. Geochim. Cosmochim. Acta **286**, 289 (2020).
- [24] A.Y. Mironovich, V.G. Kostishin, G.A. Skorlupin, E.S. Savchenko, A.I. Ril. J. Cryst. Growth **656**, 128095 (2025).
- [25] D. Primc, M. Drofenik, D. Makovec. Eur. J. Inorg. Chem. **2011**, 25, 3802 (2011).
- [26] С.Е. Кушнир, А.И. Гаврилов, А.В. Григорьева, Д.Д. Зайцев, Б.Р. Чурагулов, П.Е. Казин. ISJAEЕ, 11(115), 45 (2012).
- [27] D. Makovec, D. Primc, S. Šturm, A. Kodre, D. Hanžel, M. Drofenik. J. Solid State Chem. **196**, 63 (2012).
- [28] M. Drofenik, I. Ban, G. Ferk, D. Makovec, A. Žnidaršič, A. Jagličić, D. Lisjak. J. Am. Ceram. Soc. **93**, 6, 1602 (2010).
- [29] Y. Li, A. Xia, C. Jin. J. Mater. Sci. Mater. Electron. **27**, 10, 10864 (2016).

- [30] A.Z. Eikeland, J. Hölscher, M. Christensen. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, 13, 134004 (2021).
- [31] A. Ataie, I.R. Harris, C.B. Ponton. *J. Mater. Sci.* **30**, 6, 1429 (1995).
- [32] A.Y. Mironovich, V.G. Kostishin, R.I. Shakirzyanov, A.A. Mukabennov, S.A. Melnikov, A.I. Ril, H.I. Al-Khafaji. *J. Solid State Chem.* **316**, 123625 (2022).
- [33] N. Doebelin, R. Kleeberg. *J. Appl. Crystallogr.* **48**, 5, 1573 (2015).
- [34] F.M. Michel, L. Ehm, G. Liu, W.Q. Han, S.M. Antao, P.J. Chupas, P.L. Lee, K. Knorr, H. Eulert, J. Kim, C.P. Grey. *Chem. Mater.* **19**, 6, 1489 (2007).
- [35] G. Pieczara, M. Manecki, G. Rzepa, O. Borkiewicz, A. Gaweł. *Mater.* **13**, 18, 4113 (2020).
- [36] E. Murad. *Clay Miner.* **45**, 4, 413 (2010).
- [37] E.V. Pashkova, E.D. Solovyova, T.V. Kolodiazhnyi, V.P. Ivanitskii, A.G. Belous. *J. Magn. Magn. Mater.* **368**, 1 (2014).

Редактор А.Н. Смирнов