

05,04

Особенности магнитной структуры поликристаллов $Y_3Fe_5O_{12}$, синтеризованных методом радиационно-термического спекания

© В.Г. Костишин¹, В.В. Коровушкин¹, А.Г. Налогин², С.В. Щербаков², И.М. Исаев¹,
А.А. Алексеев^{1,2}, А.Ю. Миронович¹, Д.В. Салогуб¹

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

² НПП „Исток“ им. Шокина, Фрязино Московск. обл., Россия

E-mail: drvgkostishyn@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 25 февраля 2020 г.

Принята к публикации 25 февраля 2020 г.

Методом мессбауэровской спектроскопии (МС) изучены образцы поликристаллического железиттриевого граната (ЖИГ), синтезированные по технологии радиационно-термического спекания (РТС) и стандартной керамической технологии (КТ). Подобран наилучший вариант разложения МС-спектров объектов исследования, представляющий собой моделирование экспериментального спектра пятью секстетами. Дополнительный пятый секстет обусловлен ионами Fe^{3+} , в окружении которых присутствуют кислородные вакансии, приводящие к искажению Fe-тетраэдров, что отражается на увеличении квадрупольного расщепления Fe^{3+} . Обнаружено увеличение плотности s -электронов на ионах Fe в искаженных тетраэдрах, приводящее к уменьшению изомерного химического сдвига δ ионов Fe до значения, близкого к значению δ у ионов Fe^{4+} . Показано, что оптимальная кристаллическая структура реализуется у поликристаллов $Y_3Fe_5O_{12}$ при их спекании методом РТС в диапазоне температур 1350–1400°C в течение времени от 40 до 60 min.

Ключевые слова: мессбауэровская спектроскопия, железиттриевый гранат, кристаллическая структура, технология радиационно-термического спекания, температура спекания, керамическая технология, изомерный химический сдвиг, квадрупольное расщепление.

DOI: 10.21883/FTT.2020.07.49467.646

1. Введение

Характеристики прибора сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники существенно зависят от качества применяемого функционального материала, и используемые в них ферриты не являются исключением [1]. Несмотря на богатую историю применения ферритовых материалов, до сих пор проводятся исследования по совершенствованию технологии их синтеза, так как используемый метод промышленного производства поликристаллических ферритов — керамическая технология — обладает некоторыми ограничениями. К недостаткам метода можно отнести высокие временные затраты и энергоёмкость, относительно низкую воспроизводимость параметров ферритов, обусловленную, в основном, температурным градиентом в печах спекания.

В последние десятилетия активно изучается возможность избежать указанных недостатков путем применения метода РТС, состоящего в нагреве и последующем спекании сырых прессованных заготовок феррита в пучке высокоэнергетических электронов [2]. Такой метод позволяет нагревать материал быстро и одновременно по всему объёму. Возможности технологии РТС в большей степени изучались на ферритах-шпинелях [3–5]. Недавно преимущества технологии РТС перед керамической были продемонстрированы на примере гексаго-

нальных ферритов бария типа M . При этом удельная намагниченность насыщения растёт почти на 4.0%, коэрцитивная сила почти на 5%, плотность ρ — почти на 1.4% и степень магнитной текстуры f — более, чем на 4.5 % [6,7]. Если технология РТС в некоторой степени отработана на ферритах-шпинелях и гексаферритах, то на ферритах-гранатах такая отработка делает только первые шаги.

С учётом вышеизложенного, отработка технологии РТС ферритов-гранатов представляется интересной и востребованной темой для исследования. Наиболее известным и используемым материалом из этого класса является ЖИГ. Данный феррит достаточно хорошо изучен в силу своей востребованности, поэтому не сложно сделать выводы о качестве РТС-образцов, сравнив их характеристики с большим числом литературных данных.

В настоящей работе большая часть внимания уделена мессбауэровским исследованиям, позволяющим установить степень совершенства структуры поликристаллических образцов ЖИГ, синтезированных по РТС-технологии. Этот метод исследования довольно однозначно определяет две позиции ионов Fe^{3+} в кристаллической решетке: октаэдрическую a - и тетраэдрическую d -позицию, определяющимися экспериментально в МС-спектре двумя секстетами [8]. Однако, на прак-

тике в спектрах зачастую выделяются три секстета: один от ионов Fe^{3+} в d -позициях и двух секстетов Fe^{3+} -позиций a_1 и a_2 [9–11]. Наличие двух секстетов от ионов a -позиции авторы объясняют тем, что в элементарной ячейке граната существуют два типа октаэдров, имеющих симметрию третьего порядка вдоль направления $\langle 111 \rangle$, но повернутых в противоположные стороны на углы $\alpha = 28.6^\circ$ и являющихся неэквивалентными [10]. В более поздних работах авторы [12,13] выделили в спектре феррита-граната четыре секстета, объясняя это тем, что, имея общие ионы кислорода в узлах, две октаэдрические подрешетки создают две тетраэдрические подрешетки d_1 - и d_2 -, довольно близкие по своим параметрам и не всегда разрешаемые.

В связи с этим, целью настоящей работы стало выявление тонких особенностей структуры ЖИГ, катионного распределения в них, установление зависимости совершенства кристаллической структуры от температуры и времени синтеза при РТС, а также сравнение технологических параметров синтеза РТС и керамической технологии.

2. Объекты исследования и методика эксперимента

Используемая в работе технологическая схема получения методом РТС поликристаллических ЖИГ представлена на рис. 1.

РТС образцов проводили на воздухе в пучке быстрых электронов на импульсном линейном ускорителе ИЛУ-6 (энергия электронов $E_e = 2.5$ MeV, ток в пучке $I = 400$ mA, длительность импульса $t = 500$ μ s, частота следования импульсов $f = 7-15$ Hz) ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Средняя мощность облучения в режиме изотермического обжига ~ 3 kGy/s. В пределах действия одного импульса мощность дозы составляла 800 kGy/s [14,15].

В табл. 1 представлена информация о технологических режимах образцов $Y_3Fe_5O_{12}$, полученных методом РТС.

Значения температур и времени спекания образцов $Y_3Fe_5O_{12}$ при использовании технологии РТС выбирались авторами, исходя из имеющегося опыта по спе-

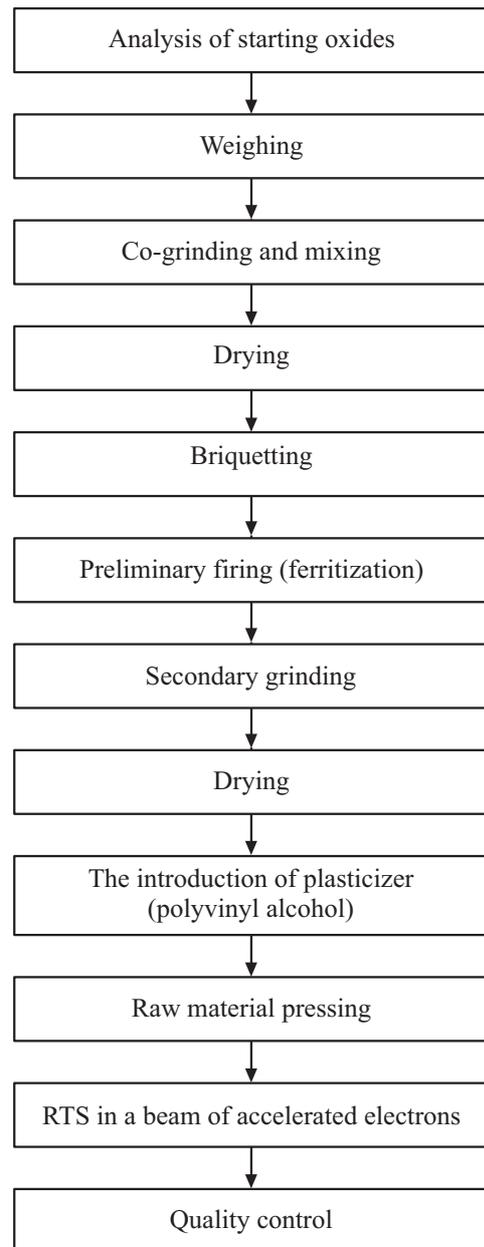


Рис. 1. Технологическая схема получения в работе поликристаллических ферритов-гранатов $Y_3Fe_5O_{12}$.

Таблица 1. Технологические режимы РТС образцов $Y_3Fe_5O_{12}$

№ образца	Температура спекания T_{sint} , °C	Время спекания t_{sint} , min	Скорость нагрева V , °C/min
1	1300	60	50
2	1350	60	50
3	1400	40	50
4	1400	5	50
5	1450	40	50
6	1500	5	50

канию ферритов-шпинелей и гексаферритов [3–7,13], а также, исходя из опыта томской научной школы [2,14].

Также были синтезированы образцы по КТ [16–18] при температуре спекания 1500°C в течение 10 h (в соответствии с технологией, применяемой на НПШ „Исток им. Шокина“).

Образцы были изготовлены в виде колец (размеры: внешний диаметр $D_{outer} = 18.3$ mm, внутренний диаметр $D_{inner} = 8.8$ mm и высота $h = 6.8$ mm), а также в виде призм с размерами $50 \times 30 \times 10$ mm. Для проведения мессбауэровских исследований из призм нарезали пластинки, шлифовали их и полировали. После окончания

механической обработки толщина пластинок составляла 200–220 μm .

Мёссбауэровские спектры ферритов-гранатов регистрировали на спектрометре Ms-1104Em с источником γ -излучения Co^{57} в матрице хрома при комнатной температуре. Обработка спектров осуществлялась с использованием программы Univem Ms. Изомерный химический сдвиг определялся относительно α -Fe.

Ферриты-гранаты имеют объемно-центрированную кубическую кристаллическую решетку в которой содержится 96 ионов O^{2-} и 64 иона металла. Крупные ионы с координационным числом 8 занимают позиции (с). Таких мест в элементарной ячейке 24. 16 ионов располагаются в октаэдрических позициях (а) и 24 иона в тетраэдрических позициях (d). Согласно этому распределению отношение $\text{Fe}(d)/\text{Fe}(a) = 1.5$. Поскольку мессбауэровская спектроскопия позволяет довольно однозначно определять координацию и валентность ионов Fe, то отношение площадей от тетраэдрических ионов Fe^{3+} к октаэдрическим ионам Fe^{3+} равно 1.5 для стехиометрического состава, должно определять совершенство структуры феррита-граната, а отклонение от этого отношения наличие изоморфных замещений в структуре или ее дефектность.

3. Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что температура 1500°C является чрезвычайно высокой для $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ при использовании технологии РТС: уже при спекании в течение 5 min образец расплавляется (см. рис. 2, справа). В то же время, температура РТС 1300°C является низкой для получения ЖИГ: спекание в течение одного часа при данной температуре практически не меняет цвет сырой заготовки (см. рис. 2, слева).

Из расплавленной заготовки ($T_{\text{сint}} = 1500^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 5 \text{ min}$) не удалось получить тонкого образца для проведения мёссбауэровских исследований.

Мёссбауэровские спектры образцов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, синтезированных по технологии РТС представлены на рис. 3, а–е, по технологии КТ — на рис. 3, f.

Математическая обработка спектров по программе „Univem“ на 3 и 4 секстета не показала достаточно приемлемого результата ни по χ^2 , ни по разности экспериментального спектра и модели. Получаемые значения χ^2 в пределах от 2.5–3.0, а также выделение пиков на разностной линии экспериментальной кривой и результата обработки потребовали введения дополнительного секстета и снятия ограничения на получаемые параметры спектров. В результате удалось уменьшить χ^2 до 1.3–1.6 и достичь приемлемой разности экспериментального спектра и расчетного, которая является, как и χ^2 , критерием правильности подгонки, что можно наблюдать на приведенных рисунках. При этом секстеты С1 и С2, согласно значениям химического сдвига δ (табл. 2) относятся к ионам Fe^{3+}

октаэдрической позиции, а секстеты С3 и С4 — к тетраэдрической позиции, как это следует из работы [12] и в соответствии с систематикой по изомерному сдвигу [19]. Однако, изомерный сдвиг секстета С5 имеет значения δ , которые, согласно [19], близки значениям этого параметра МС-спектра для ионов Fe^{4+} . Это возможно вследствие уменьшения плотности электронов на ядрах ионов Fe при наличии кислородных вакансий. Будучи положительно заряженными, кислородные вакансии частично оттягивают электронную плотность от ионов Fe^{3+} на себя. При этом образуются ионы Fe с валентностью больше „ $3^{+\epsilon}$ “. Так как в кристаллической решетке $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ расстояние от иона O^{2-} к иону $\text{Fe}^{3+}(d)$ равно 1.88 Å и меньше расстояния от иона O^{2-} к иону $\text{Fe}^{3+}(a)$, которое равно 2.00 Å (см. рис. 4) [9], то вследствие электростатического взаимодействия эффект перетягивания электронной плотности от иона Fe^{3+} к вакансии кислорода $V_{\text{O}^{2-}}^{2+}$ ($V_{\text{O}^{2-}}^+$) будет больше выражен для ионов $\text{Fe}^{3+}(d)$.

С этим согласуется величина квадрупольного расщепления (Δ) для ионов Fe^{3+} секстета С5, которое варьирует в пределах 0.29–0.41 mm/s, против –0.01–0.08 mm/s для секстетов С3 и С4 [20].

При подготовке шихты в исходных компонентах оксидах Y_2O_3 и Fe_2O_3 посторонние примеси отсутствовали, следовательно, причиной наблюдаемых заниженных отношений S_d/S_a , где S_d и S_a — площади секстетов от ионов Fe^{3+} в тетраэдрических и октаэдрических позициях, соответственно, (табл. 2, рис. 5) могут являться катионные или анионные вакансии. При катионных вакансиях должна появляться самостоятельная фаза оксида железа. Однако, секстет С5 характеризует ионы Fe в тетраэдрической координации и принадлежит непосредственно ферриту-гранату. Наиболее вероятной причиной заниженного значения отношения S_d/S_a и понижения изомерного сдвига, а также дополнительного секстета С5 являются кислородные вакансии. Такое объяснение согласуется с результатами авторов работы [21] при низких значениях отношения S_d/S_a .

В элементарной ячейке кристаллической решетки граната $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ионов O^{2-} в полтора раза больше, чем ионов Y^{3+} и ионов Fe^{3+} вместе взятых. Кроме этого, из всех ионов, входящих в элементарную ячейку ЖИГ, ион кислорода обладает самой меньшей массой. Вследствие этого, под воздействием быстрых электронов максимальное количество дефектов при РТС будет образовываться в кислородной подрешетке.

При этом за счет кислородных вакансий увеличивается амплитуда тепловых колебаний ионов Fe^{3+} , что приводит к уменьшению вероятности резонансного эффекта и, соответственно, к уменьшению отношения S_d/S_a .

Кроме изучения чисто структурных особенностей поликристаллов $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ по их мессбауэровским спектрам, представляет интерес рассмотреть влияние температуры и времени РТС на степень совершенства структуры данного феррита при разных технологических ре-



Рис. 2. Внешний вид образцов $Y_3Fe_5O_{12}$: слева — заготовка после спекания ($T_{\text{сint}} = 1300^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 60 \text{ min}$); справа — расплавленная заготовка ($T_{\text{сint}} = 1500^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 5 \text{ min}$).

Таблица 2. Параметры мессбауэровских спектров тонких пластин ферритов-гранатов $Y_3Fe_5O_{12}$, синтезированных по технологиям РТС и КТ

Синтез образца, $T^\circ\text{C}$, время	Компонента спектра	Изомерный сдвиг, δ , mm/s	Квадрупольное расщепление Δ , mm/s	Магнитные поля $H_{\text{эф}}$, kOe	Площади компонент, rel.%	Ширина линии Γ , mm/s	Отношение площадей, S_d/S_a
РТС, 1300°C , 1 h	C1-(Fe^{3+}) _{VI}	0.38	0.16	487	31.0	0.32	1.41
	C2-(Fe^{3+}) _{VI}	0.39	-0.46	481	10.5	0.33	
	C3-(Fe^{3+}) _{IV}	0.16	-0.01	396	32.2	0.33	
	C4-(Fe^{3+}) _{IV}	0.09	0.05	386	14.3	0.58	
	C5-(Fe^{3+}) _V	-0.02	0.38	224	11.9	0.28	
РТС, 1350°C , 1 h	C1-(Fe^{3+}) _{VI}	0.38	0.16	490	26.6	0.33	1.49
	C2-(Fe^{3+}) _{VI}	0.36	-0.33	484	13.6	0.41	
	C3-(Fe^{3+}) _{IV}	0.14	0.03	398	43.9	0.47	
	C4-(Fe^{3+}) _{IV}	0.14	-0.14	373	12.5	0.48	
	C5-(Fe^{3+}) _V	-0.01	0.32	221	3.4	0.24	
РТС, 1400°C , 40 min	C1-(Fe^{3+}) _{VI}	0.38	0.16	489	27.2	0.35	1.48
	C2-(Fe^{3+}) _{VI}	0.39	-0.39	484	13.2	0.40	
	C3-(Fe^{3+}) _{IV}	0.14	0.02	397	48.8	0.48	
	C4-(Fe^{3+}) _{IV}	0.18	0.00	364	6.2	0.53	
	C5-(Fe^{3+}) _V	-0.05	0.46	222	4.6	0.27	
РТС, 1450°C , 5 min	C1-(Fe^{3+}) _{VI}	0.38	0.16	487	29.8	0.33	1.43
	C2-(Fe^{3+}) _{VI}	0.38	-0.43	482	11.3	0.34	
	C3-(Fe^{3+}) _{IV}	0.16	0.00	396	42.6	0.39	
	C4-(Fe^{3+}) _{IV}	0.18	0.08	355	5.3	0.40	
	C5-(Fe^{3+}) _V	0.01	0.29	223	11.0	0.32	
РТС, 1450°C , 40 min	C1-(Fe^{3+}) _{VI}	0.39	0.16	487	28.6	0.33	1.43
	C2-(Fe^{3+}) _{VI}	0.39	-0.43	481	12.5	0.37	
	C3-(Fe^{3+}) _{IV}	0.16	0.00	396	42.7	0.40	
	C4-(Fe^{3+}) _{IV}	0.16	0.04	356	5.7	0.40	
	C5-(Fe^{3+}) _V	-0.04	0.41	224	10.5	0.27	
КТ, 1500°C , 10 h	C1-(Fe^{3+}) _{VI}	0.38	0.15	487	30.6	0.30	1.45
	C2-(Fe^{3+}) _{VI}	0.39	-0.44	481	12.2	0.30	
	C3-(Fe^{3+}) _{IV}	0.16	-0.01	396	44.3	0.36	
	C4-(Fe^{3+}) _{IV}	0.17	0.05	360	4.5	0.42	
	C5-(Fe^{3+}) _V	-0.01	0.33	223	10.3	0.26	

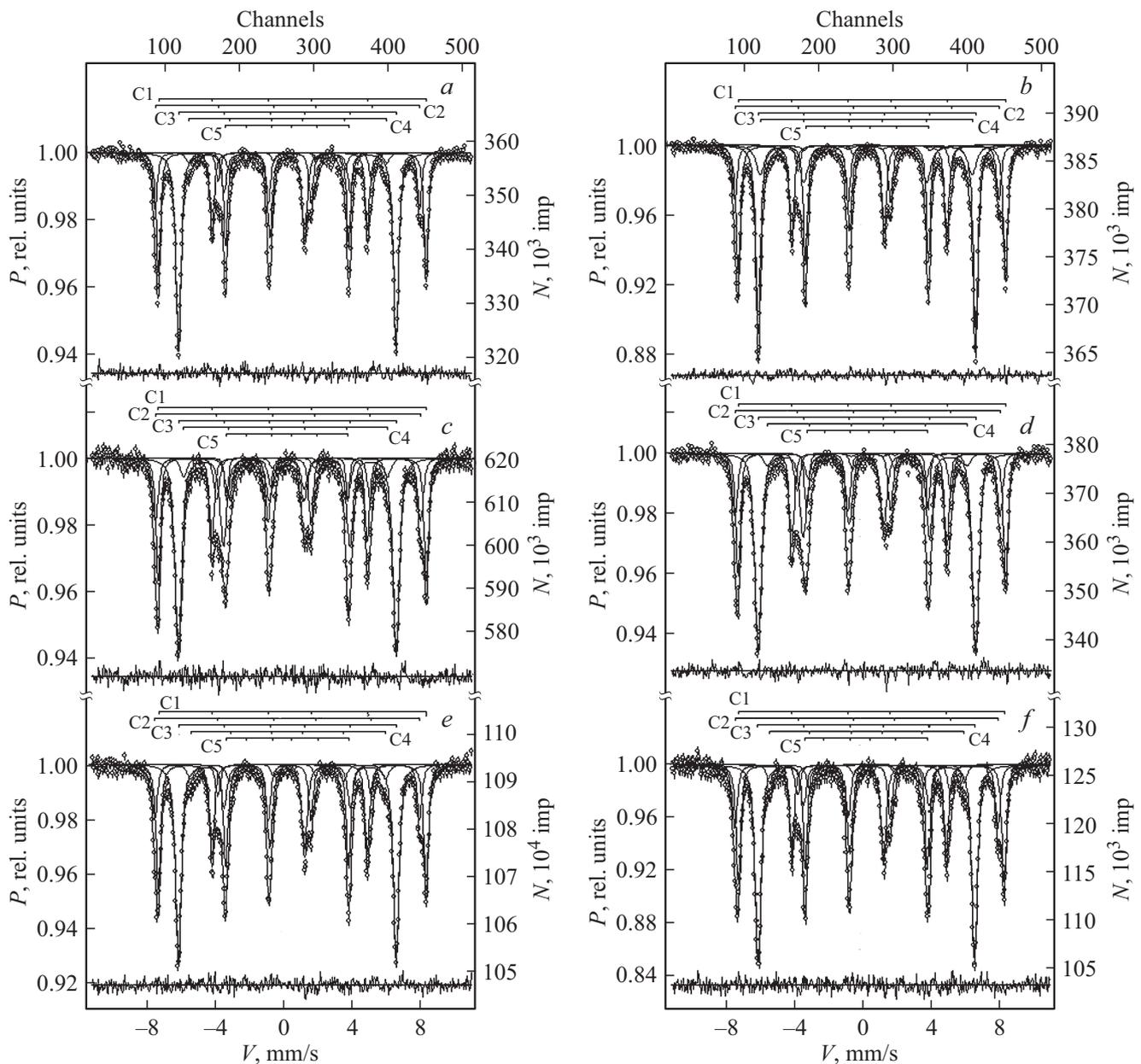


Рис. 3. Мёсбауэровские спектры тонких пластин поликристаллических ферритов-гранатов $Y_3Fe_5O_{12}$, синтезированных: по технологии РТС (*a–e*); по керамической технологии (*f*). (*a*) РТС ($T_{\text{сint}} = 1300^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 60$ min); (*b*) РТС ($T_{\text{сint}} = 1350^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 60$ min); (*c*) РТС ($T_{\text{сint}} = 1400^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 40$ min); (*d*) РТС ($T_{\text{сint}} = 1450^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 5$ min); (*e*) РТС ($T_{\text{сint}} = 1450^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 40$ min); (*f*) КТ ($T_{\text{сint}} = 1500^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 600$ min).

жимах получения. Это можно оценить, как указывалось выше, по соотношению заселенностей тетраэдрических и октаэдрических позиций ионами Fe^{3+} , отражающихся в площадях соответствующих секстетов. При этом теоретическое отношение S_d/S_a в ферритах-гранатах с совершенной структурой должно равняться 1.5. Увеличение этого отношения может происходить при изоморфных замещениях ионов Fe^{3+} в октаэдрических позициях или вакансиями в них, а уменьшение — или замещениями в тетраэдрических позициях, или катионными, а также анионными вакансиями.

На рис. 5 представлена зависимость отношения S_d/S_a от температуры РТС для объектов исследования.

Как видно из данных мёсбауэровских исследований (рис. 5 и табл. 2), оптимальная кристаллическая и магнитная структура $Y_3Fe_5O_{12}$ образуется при температурах РТС 1350 и 1400 $^\circ\text{C}$ и времени спекания в течение $t_{\text{сint}} = 40–60$ min.

Характерно, что подобные зависимости $S_d/S_a = f(T_{\text{RTS}}, ^\circ\text{C})$ вид имеют и зависимости от температуры РТС квадрупольного расщепления $\Delta(\text{mm/s}) = f(T_{\text{RTS}}, ^\circ\text{C})$, площади компоненты $S_{\text{comp}}(\text{rel.}\%) =$

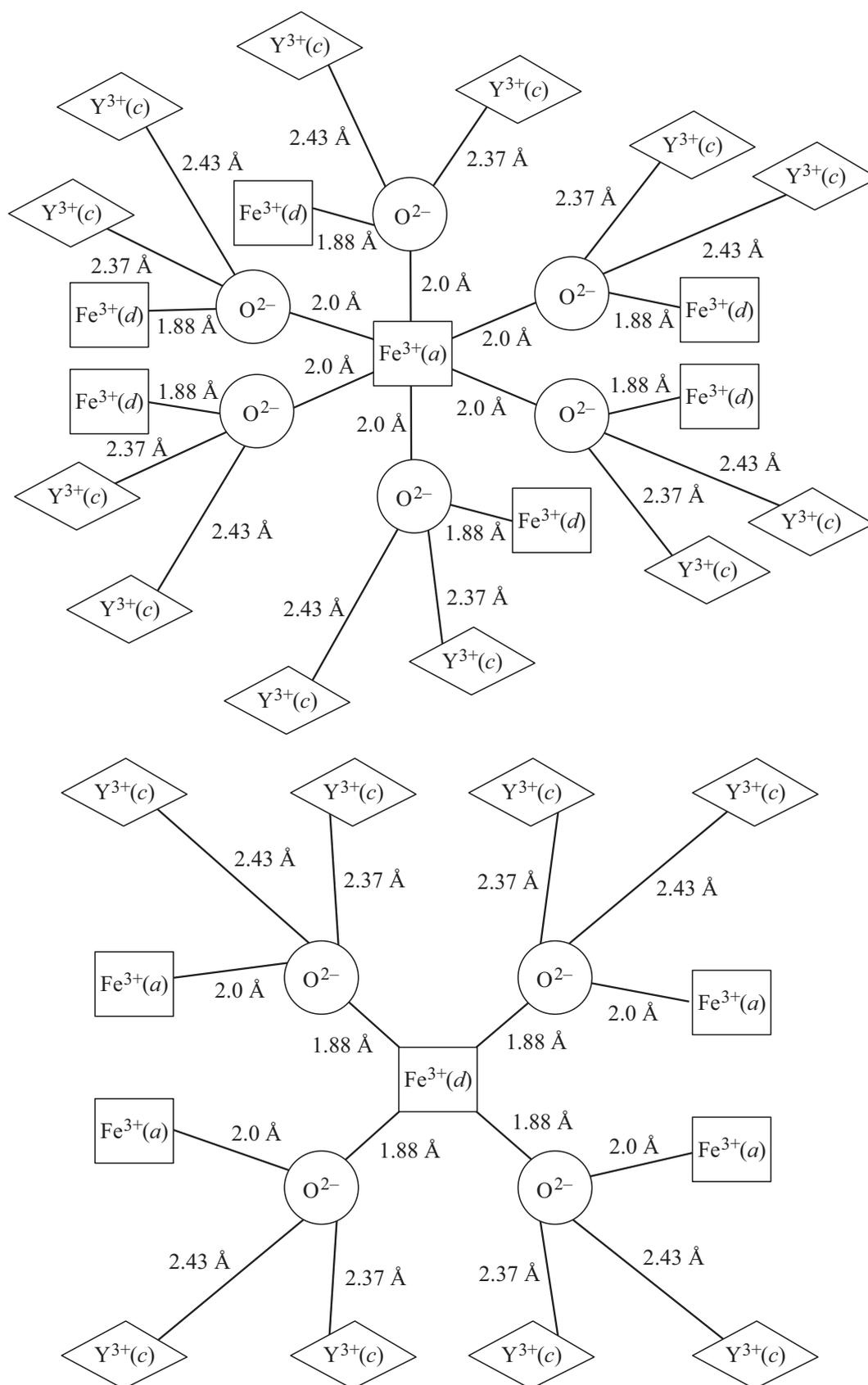


Рис. 4. Схематическое изображение ближайших соседей катионов, связанных с ионом Fe³⁺ в структуре стехиометрического Y₃Fe₅O₁₂ через ионы O²⁻: вверху — для Fe^{3+(a)} — иона, внизу — для Fe^{3+(d)} — иона.

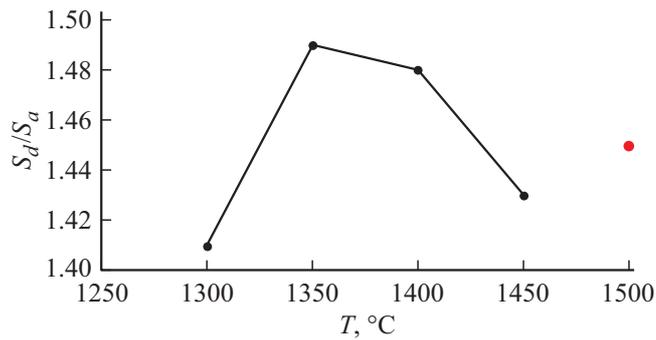


Рис. 5. Отношение площади секстетов тетраэдрической подрешетки к площади секстетов октаэдрической подрешетки в мёссбауэровских спектрах поликристаллических образцов $Y_3Fe_5O_{12}$ в зависимости от температуры РТС. Черной точкой представлено значение S_d/S_a для КТ ($T_{\text{сint}} = 1500^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сint}} = 600 \text{ min}$).

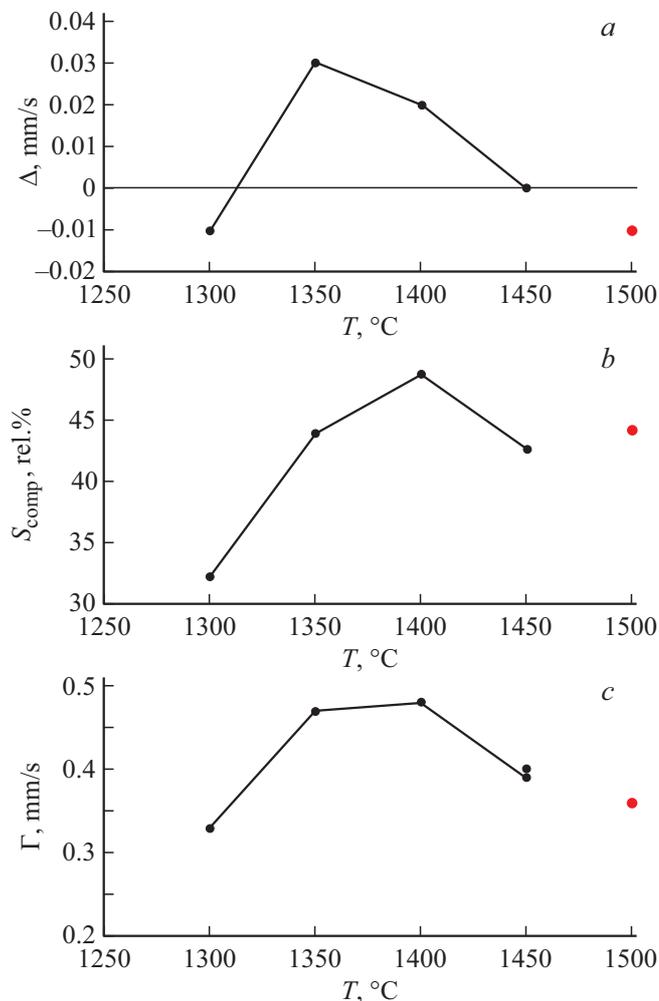


Рис. 6. Зависимость параметров МС-спектра секстета С3 образцов поликристаллического $Y_3Fe_5O_{12}$ в зависимости от температуры РТС: *a* — квадрупольное расщепление Δ (mm/s); *b* — площадь компоненты S_{comp} (rel.%); *c* — ширина линии Γ (mm/s). Черной точкой представлено значение определенного параметра МС-спектра секстета С3 для КТ ($T_{\text{сн}} = 1500^\circ\text{C}$ и $t_{\text{сн}} = 600 \text{ min}$).

$= f(T_{\text{RTS}}, ^\circ\text{C})$ и ширины линии $\Gamma(\text{mm/s}) = f(T_{\text{RTS}}, ^\circ\text{C})$ для секстета С3 объектов исследования (см. рис. 6, *a, b* и *c*).

Влияние температуры синтеза на степень совершенства структуры можно проследить по образцам, синтезированным при 1300 и 1350 $^\circ\text{C}$ и времени синтеза 1 h. Если при 1300 $^\circ\text{C}$ отношение S_d/S_a всего лишь составляет 1.41, то при 1350 $^\circ\text{C}$ — 1.49. Это уже совершенная структура феррита-граната. Это отражается и на интегральных интенсивностях секстета С5, отображенных через его площадь. Если при температуре синтеза 1300 $^\circ\text{C}$ и несовершенной структуре феррита-граната площадь С5 11.9 rel.%, то при 1350 $^\circ\text{C}$ — 3.4 rel.%. Совершенная структура феррита-граната сохраняется и при температуре синтеза 1450 $^\circ\text{C}$ и времени синтеза 40 min.

Зависимость совершенства структуры от времени синтеза можно проследить на образцах, синтезированных РТС при 1450 $^\circ$ в течение 5 и 40 min. При этом можно отметить, что время в данном случае особо не влияет на степень совершенства структуры в отличие от температуры, поскольку при температуре 1450 $^\circ\text{C}$ можно наблюдать уменьшение соотношения S_d/S_a и нарушения структуры феррита.

Продоланное сопоставление температурных и временных условий синтеза ферритов-гранатов позволяет сделать вывод, что оптимальной температурой синтеза по технологии РТС является температура 1350–1400 $^\circ\text{C}$ и время синтеза от 40 до 60 min.

Сравнение полученных результатов по структурному совершенству ферритов-гранатов, полученных путем РТС с образцом тонкой пластины феррита-граната, полученного по КТ при 1500 $^\circ\text{C}$ и 10 h (рис. 3, *f*; табл. 2) показало результат не лучше, чем при технологии РТС.

4. Заключение и выводы

В работе методом мёссбауэровской спектроскопии впервые изучена магнитная структура поликристаллических образцов $Y_3Fe_5O_{12}$, полученных методом РТС. Проведено сравнение качества образцов ЖИГ, полученных по технологии РТС и традиционной КТ. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Исследование особенностей структуры ферритов-гранатов методом мессбауэровской спектроскопии показало, что наилучшим вариантом разложения спектров является вариант из пяти секстетов, обеспечивающий минимум χ^2 и разность экспериментальной кривой и модели разложения.

2. Дополнительный пятый секстет обусловлен ионами $Fe(d)$ в ближайшем окружении которых присутствуют кислородные вакансии, приводящие к искажению Fe-тетраэдров, что отражается на увеличении квадрупольного расщепления Fe^{3+} .

3. Обнаружено увеличение плотности s-электронов на ядрах ионов Fe в искаженных тетраэдрах, приводящее к

уменьшению изомерного химического сдвига ионов Fe к значениям δ , близким для ионов Fe^{4+} .

4. Сопоставление температурных и временных условий синтеза ферритов-гранатов по технологии РТС показало, что оптимальной температурой синтеза является температура 1350–1400°C и время синтеза от 40 до 60 min. Характерно, что при РТС влияние температуры синтеза — более существенно, чем влияние времени синтеза.

5. Сравнение результатов по структурному совершенству ЖИГ, полученных по РТС с образцом ЖИГ, полученного по КТ (при 1500°C и 10 h спекания), показало, что технология РТС позволяет получить образцы лучшего качества.

Благодарности

Авторы выражают благодарность к.т.н., нач. отдела ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера А.А. Брызгину, к.т.н., с.н.с. ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера М.В. Коробейникову и к.х.н., с.н.с. Института химии и механохимии СО РАН М.А. Михайленко за проведение РТС образцов $Y_3Fe_5O_{12}$.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (соглашение № 19-19-00694 от 06.05.2019 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А. Устинов, В. Кочемасов, Е. Хасьянова. *Электроника: НТБ* **148**, 86 (2015).
- [2] А.П. Суржиков, А.М. Пригулов. Энергоатомиздат, М. (1998). 217 с.
- [3] В.Г. Костишин, В.Г. Андреев, В.В. Коровушкин, Д.Н. Читанов, Н.А. Юданов, А.Т. Морченко, А.С. Комлев, А.Ю. Адамцов, А.Н. Николаев. *Неорган. материалы* **50**, 1387 (2014).
- [4] В.Г. Костишин, В.Г. Андреев, Л.В. Панина, Д.Н. Читанов, Н.А. Юданов, А.С. Комлев, А.Н. Николаев. *Неорган. материалы* **50**, 1266 (2014).
- [5] В.Г. Костишин, В.В. Коровушкин, Л.В. Панина, В.Г. Андреев, А.С. Комлев, Н.А. Юданов, А.Ю. Адамцов, А.Н. Николаев. *Неорган. материалы* **50**, 1352 (2014).
- [6] И.М. Исаев, В.Г. Костишин, Д.Н. Читанов, М.П. Мезенцева, Е.А. Белоконь. Способ получения гексагонального изотропного феррита $BaFe_{12}O_{19}$ методом радиационно-термического спекания. Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ „МИСиС“ № 62-219-2016 ОИС от 20 декабря 2016 г.
- [7] И.М. Исаев, В.Г. Костишин, С.В. Щербаков, А.Г. Налогин, В.В. Коровушкин. Способ получения ферритовых изделий. Патент РФ № 2664745. Приоритет 29.12.2016.
- [8] A.M. van der Kraan, J.J. van Loef Intern. Conf. Mossbauer effect. Tihany (Hungary). (1969).
- [9] В.Г. Костишин, В.В. Медведь, Л.М. Летюк. *Неорган. материалы* **35**, 222 (1999).
- [10] И.С. Любутин. Изучение магнитных свойств и кристаллохимии ферритов-гранатов с помощью мессбауэровской спектроскопии. *Физика и химия ферритов*. Изд-во МГУ, М. 68 (1973).
- [11] D.V.M. Paiva, M.A.S. Silva, T.S. Ribeiro, I.F. Vasconcelos, A.S.B. Sombra, J.C. Góes, P.B.A. Fachine. *J. Alloy. Comp.* (2015). V. 644. P. 763.
- [12] В.В. Коровушкин, В.Г. Костишин, М.А. Степович, М.Н. Шипко. *Изв. РАН. Сер. физ.* **80**, 1643 (2016).
- [13] S.K.S. Patel, J.-H. Lee, B. Bhoi, J.T. Lim, C.S. Kim, S.-K. Kim. *J. Magn. Magn. Mater.* (2018). V. 452. P. 48.
- [14] А.П. Суржиков, А.М. Пригулов. Радиационно-термическое спекание ферритовой керамики. Энергоатомиздат, М. (1998). 217 с.
- [15] И.М. Исаев. Радиационно-термическое спекание в пучке быстрых электронов поликристаллических гексагональных ферритов $BaFe_{12}O_{19}$ и $BaFe_{12-x}(Al,Ni,Ti,Mn)_xO_{19}$ для постоянных магнитов и подложек микрополосковых приборов СВЧ электроники. Дис. канд. наук. Москва (2017).
- [16] Л.М. Летюк, В.Г. Костишин, А.В. Гончар. *Технология ферритовых материалов магнитоэлектроники*. МИСиС, М. (2005). 352 с.
- [17] Г.И. Журавлев. *Химия и технология ферритов*. Химия, Л. (1970). 192 с.
- [18] Б.Е. Левин, Л.М. Третьяков, Л.М. Летюк. *Физико-химические основы получения, свойства и применение ферритов*. Металлургия, М. (1979). 472 с.
- [19] F. Menil. *J. Phys. Chem. Solids* **46**, 763 (1985).
- [20] L.R. Walker, G.K. Wertheim, V. Jaccarino. *Phys. Rev. Lett.* **6**, 98 (1961).
- [21] В.Г. Костишин, В.Х. Костюк, М.Н. Шипко, М.А. Степович. *Изв. РАН. Сер. физ.* **76**, 681 (2012).

Редактор Т.Н. Василевская