

УДК 544.032+544.034:[54.31+54.052]

Оригинальная статья

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТУРЫ В МАТЕРИАЛАХ НА ОСНОВЕ ГЕКСАФЕРРИТА СТРОНЦИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ ИЗ НИТРАТ-ОРГАНИЧЕСКИХ ПРЕКУРСОРОВ

А.А. Остроушко¹, М.О. Тонкушина¹, Т.Ю. Жуланова^{1,2}, Е.В. Кудюков¹, А.Я. Голуб¹,
О.В. Русских¹

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19
alexander.ostroushko@urfu.ru

²ФГБУН «Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения
Российской академии наук»
620066, Россия, Екатеринбург ул. Академическая, 20

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.1017

Аннотация: Изучены процессы получения гексаферрита стронция (материал постоянных магнитов) в реакциях горения с последующей термообработкой нитрат-органических прекурсоров, содержащих глицин или поливиниловый спирт. Образование железо-глициновых комплексов органических компонентов прекурсоров оказывает влияние на формирование морфологии получаемых образцов. При использовании глицин-содержащих систем в ходе горения возникает разветвленная волокнистая текстура материала с протяженными внутренними полостями, где имеются удлиненные оксидные частицы. Такие образцы обладают более высокой коэрцитивной силой, внешнее магнитное поле существенного влияния на формирование текстуры в ходе горения не оказывает. Установлено наличие генерирования зарядов в прекурсорах при их горении, что проявляется в появлении разности потенциалов земля – прекурсор. В данном случае возникновение меньших по интенсивности зарядов позволяет получить образцы с более высокой намагниченностью, а также с большей способностью к повышению магнитных характеристик при дальнейшей термомагнитной обработке.

Ключевые слова: гексаферрит стронция, синтез, нитрат-органические прекурсоры, магнитные свойства, текстурирование.

1. Введение

Вряд ли есть необходимость подробно объяснять практическую применимость магнитных материалов на основе гексаферритов со структурой типа магнетоплюмбита, в частности, сложных оксидов на основе гексаферрита стронция $SrFe_{12}O_{19}$ [1]. Помимо стандартной керамической технологии получения таких материалов используются приемы, основанные на применении в качестве исходных веществ солевых форм соответствующих металлов. При этом целевые сложные оксиды могут быть синтезированы по разным вариантам, например, золь-гель методом, соосаждением и пр. Заметное место в области синтеза сложнооксидных материалов, в том числе различных типов ферритов, занимают методики типа Solution Combustion Synthesis, при реализации которых происходит горение прекурсоров, главным образом нитрат-органических [2]. В некоторых случаях используются и другие реакции

горения, в том числе в условиях приложения внешнего магнитного или электрического поля [3, 4], что относится также и к формированию оксидных материалов, относящихся не только к классу ферритов.

На ход синтеза сложнооксидных материалов из органико-неорганических прекурсоров (в частности, нитрат-содержащих) и его результаты существенное влияние оказывают такие факторы, как состав исходной композиции, процессы, которые могут протекать на стадии приготовления таких прекурсоров. К вышеназванным процессам можно отнести комплексообразование, окислительно-восстановительные взаимодействия и др. [5]. Так окислительно-восстановительные реакции, в том числе катализируемые ионами переходных металлов из состава сложного оксида, могут происходить в прекурсорах в виде растворов, пленок. Комплексообразование ионов металлов с органическими компонентами обычно повышает однородность прекурсоров за счет влияния на процессы кристаллизации солей при удалении растворителя [5]. В литературе имеются примеры получения материалов на основе оксидов железа с использованием комплексов на основе полимеров [6]. Взаимодействие компонентов собственно в условиях горения обуславливает возможность генерирования электрических зарядов в прекурсорах [7], приводящего к взаимному отталкиванию получаемых наночастиц, что сильно сказывается на морфологии и свойствах материалов. Причиной генерирования зарядов является ионизация и удаление в газовую среду ионизированных молекулярных группировок. По этим мотивам представляет интерес изучение особенностей поведения конкретных систем, например, нитрат-органических. В настоящей работе исследованы прекурсоры синтеза гексаферрита стронция, включающие помимо соответствующих нитратов также поливиниловый спирт и глицин.

2. Экспериментальная часть

Исходными веществами для получения изученных прекурсоров при синтезе гексаферрита стронция $SrFe_{12}O_{19}$ служили следующие реагенты: нитрат стронция $Sr(NO_3)_2$ и нитрат железа $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ квалификации «ч.д.а.»; среднемолекулярный поливиниловый спирт (ПВС) с содержанием остаточных ацетатных групп не более 2%, обладающий вязкостью 4%-го водного раствора 11 сПз при комнатной температуре; глицин квалификации «х.ч.». Состав прекурсоров был рассчитан по стехиометрии реакции горения с образованием в качестве газообразных продуктов азота, диоксида углерода и воды ($\varphi=1$) или с удвоенным количеством глицина ($\varphi=2$). При этом мольное соотношение глицин/ионы железа составило 1,8 ($\varphi=1$) и 3,6 ($\varphi=2$). Исходные компоненты растворяли в дистиллированной воде. Полученные прекурсоры использовали в двух вариантах: получали

из них твердые композиции путем высушивания на воздухе, либо непосредственно упаривали в керамической чашке до начала процессов горения.

Электронно-микроскопические изображения образцов получали на сканирующем электронном микроскопе AURIGA CrossBeam. Порошковую рентгенографию образцов для изучения их фазового состава реализовали с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance (Германия) в $Cu_{K\alpha}$ излучении ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$). Контроль интенсивности генерирования зарядов путем измерения разности потенциалов земля – прекурсор проводили при помощи измерителя параметров электростатического поля ИПЭП-1, помещая в реакционный сосуд с прекурсором электрод из инертного проводящего материала и выводя этот электрод на металлический экран. Электронные спектры поглощения фиксировали на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 в кюветах с толщиной поглощающего слоя 1 см. Инфракрасная спектроскопия (спектры неполного внутреннего отражения) была реализована с использованием спектрометра Nicolet 6700 (ThermoScientific). Измерения магнитных характеристик компактизированных образцов проводили на вибрационном магнитометре LakeShore VSM 7407.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Приготовленные растворы прекурсора, содержащего нитраты железа и стронция, а также глицин, отличались интенсивной красно-коричневой окраской, обусловленной образованием железо-глициновых комплексов [8], аналогичные растворы с ПВС такой интенсивной окраской не обладали. Хотя для ПВС комплексообразование с ионами железа также проявляется [9] с образованием менее прочных комплексов. В присутствии стронция интенсивность максимума поглощения комплекса железо-глицин немного снижалась, по-видимому, за счет конкурентного образования некоторого количества бесцветного комплекса стронций-глицин [10]. Так как доля стронция в прекурсорах для синтеза гексаферрита стронция мала, то в дальнейшем комплексообразование более детально изучалось для железо-содержащих растворов. На рис. 1 приведены спектры электронного поглощения растворов нитрата железа с глицином (см. рис. 1 а, б) и ПВС (см. рис. 1 в). Можно предположить, исходя из положения изломов (см. рис. 1 б), последовательное образование комплексов железа с глицином от 1:1 и 1:2 до 1:3 (не путать с $\varphi = 1; 2$). Дальнейший рост оптической плотности связан с увеличением pH растворов и изменением формы комплексов с соотношением 1:3 [11].

При удалении растворителя путем сушки на воздухе поведение прекурсоров с глицином и ПВС существенно различалось. В первом

случае формировались достаточно крупные кристаллы (см. рис. 2), некоторые из них достигали размера до нескольких сантиметров. В пленках такие кристаллы могут образовывать протяженные плоско-дендритные формы (см. рис. 2). Рентгенографические исследования (см. рис. 3) подтверждают наличие кристаллической структуры комплексов, которая отличается от структуры исходного глицина. Прекурсоры с ПВС не обладали кристаллической структурой.

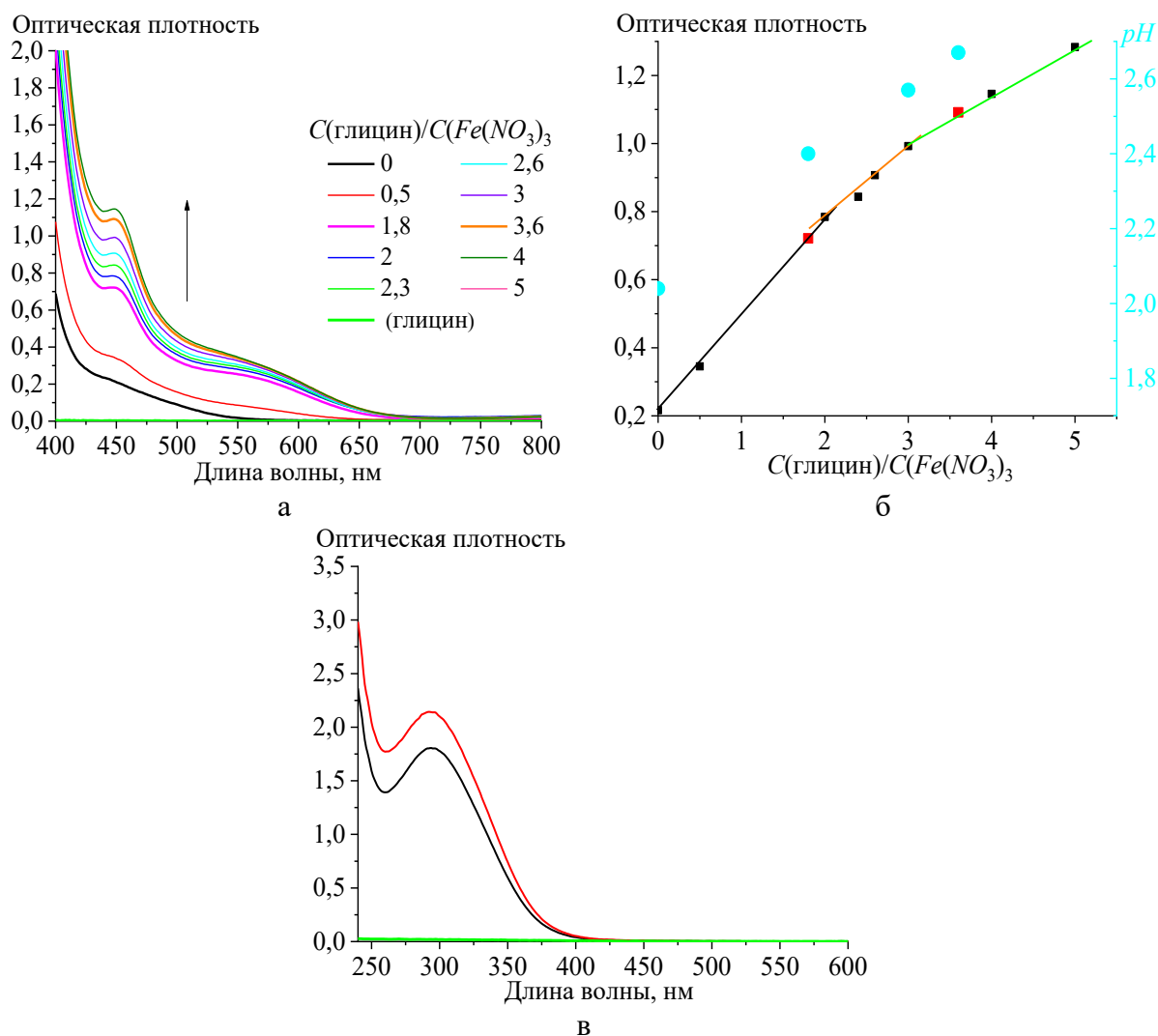


Рис. 1. Спектры электронного поглощения растворов нитрата железа и глицина при разных молярных соотношениях компонентов (а); оптическая плотность на длине волны 448 нм (б) – красные точки: соотношение компонентов в реальных прекурсорах для $\varphi = 1$ и 2, а также pH таких растворов; (в) спектры растворов с ПВС (нитрат железа 0,001М, ПВС 0,00158М).

Рис. 4 иллюстрирует инфракрасные спектры прекурсоров, где взаимодействие глицина с нитратами железа и стронция проявляется следующим образом. При соотношении в прекурсоре с $\varphi = 1$ наблюдается смещение валентного колебания $\nu(\text{Fe}-\text{O})$ $756 \rightarrow 776 \text{ см}^{-1}$, в то время как

736 см^{-1} ($\nu(\text{Sr}-\text{O})$) остается неизменным. Для образца комплекса с $\varphi = 2$ обе эти полосы исчезают. Полосы 1044 см^{-1} $\nu(\text{Fe}-\text{O})$ и 1054 см^{-1} $\nu(\text{Sr}-\text{O})$ перекрываются с полосой для глицина. Колебания $\nu(\text{N}-\text{O})$ 1295 см^{-1} в нитрате железа и 1336 см^{-1} в нитрате стронция дают одну широкую полосу, также перекрывающуюся с полосой у глицина. В спектре глицина при комплексообразовании колебания в области отпечатков пальцев $500, 557, 607\text{ см}^{-1}$ обнаруживаются при $542, 568, 586, 630\text{ см}^{-1}$, соответственно.

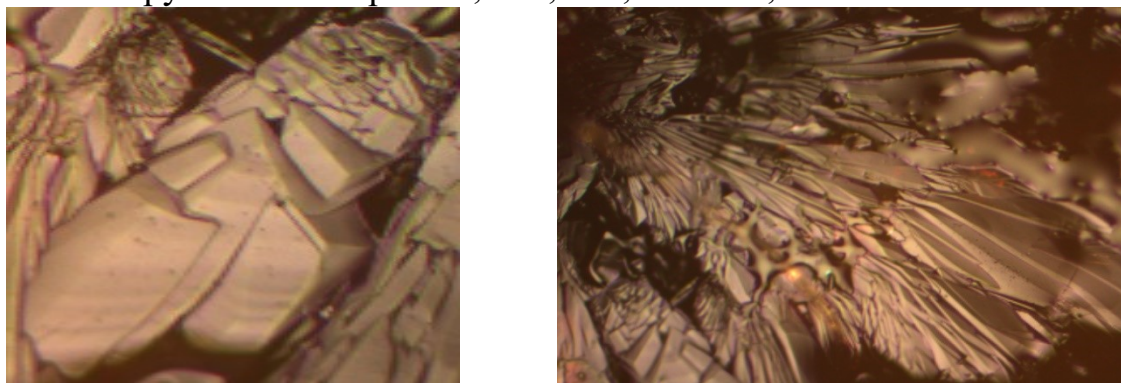


Рис. 2. Кристаллы железо-глицинового комплекса: отдельный кристалл и плоско-дендритные образования.

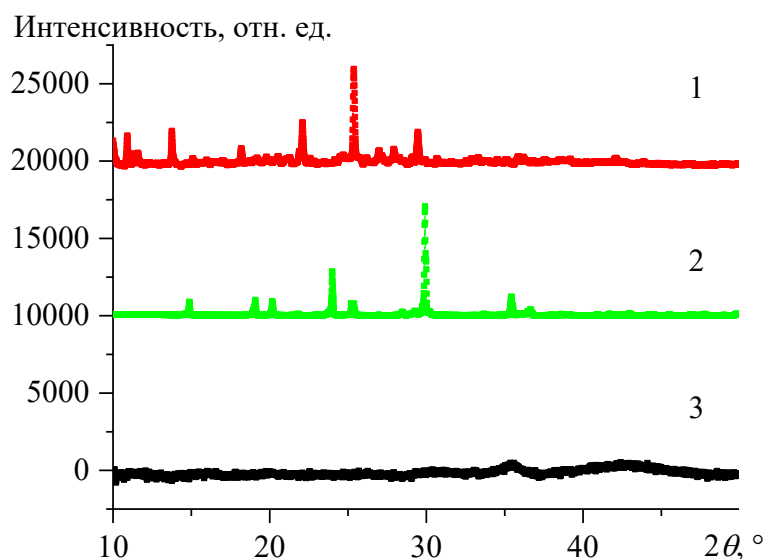


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы железо-глицинового комплекса (глицин-содержащий прекурсор для синтеза $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\varphi = 1$) (1); глицина (2); ПВС-содержащего прекурсора для синтеза $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, $\varphi = 1$) (3).

В образце $\varphi = 1$ проявляется полоса на 500 см^{-1} , по-видимому, относящаяся к свободному глицину. Также при этом наблюдается смещение полос колебаний $\delta(\text{CN})$ $1121 \rightarrow 1115\text{ см}^{-1}$, $1435 \rightarrow 1461\text{ см}^{-1}$, $\delta(\text{NH}_3^+)$ $1484 \rightarrow 1505\text{ см}^{-1}$, $\nu(\text{COO})$ $1570 \rightarrow 1597\text{ см}^{-1}$, а у образца $\varphi = 2$: $\delta(\text{NH}_3^+)$ $1626 \rightarrow 1636\text{ см}^{-1}$. Сохраняют положение полосы колебаний $\delta(\text{COO})$ 684 см^{-1} , $\delta(\text{OH})$ 1041 см^{-1} ; полосы $\nu(\text{CNN})$ 888 см^{-1} и $\delta(\text{NH}_2)$ 926 см^{-1} дают общий

максимум при 904. Комплексообразование с нитратами металлов в ПВС проявляется в смещении колебаний $\nu(C-C)$ 833→799 см^{-1} , $\delta(CH$ и $OH)$ 1420→1400 см^{-1} . Другие полосы большей частью перекрываются и об их изменениях судить затруднительно.

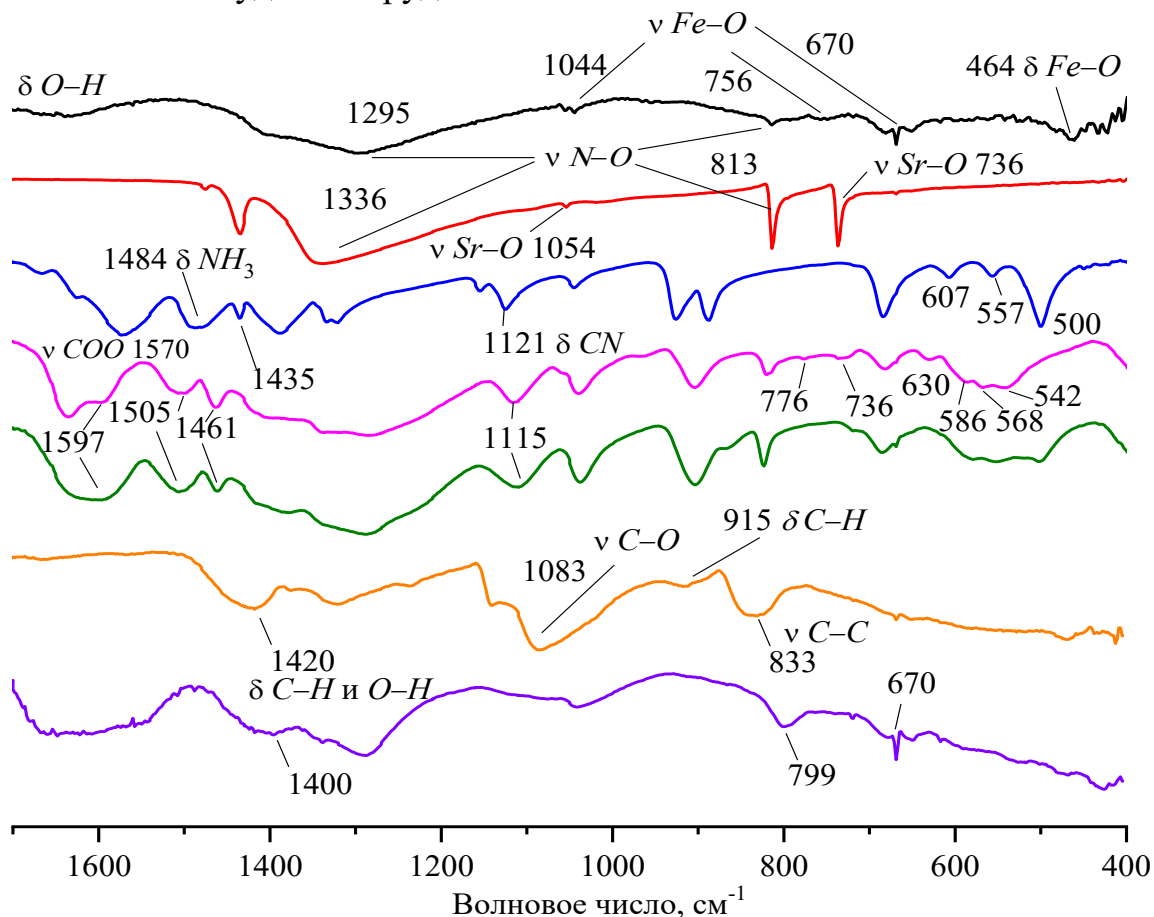


Рис. 4. Инфракрасные спектры сверху вниз: нитрат железа; нитрат стронция; глицин; глицин-содержащий прекурсор для синтеза гексаферрита стронция ($\phi = 1$); глицин-содержащий прекурсор для синтеза гексаферрита стронция ($\phi = 2$); ПВС; композиция ПВС-нитрат железа.

Отличалось и дальнейшее поведение полученных твердых прекурсоров при хранении их на воздухе. Системы, включавшие глицин, были достаточно стабильны, тогда как в прекурсорах с ПВС происходил «холодный» пиролиз, т.е. наблюдалось превращение пленочного образца в светлую порошкообразную массу. Ионы железа обладают высокими каталитическими свойствами в подобных композициях практически уже при комнатной температуре [12] за счет обратимого изменения их степени окисления. Это катализирует взаимодействие нитрат-ионов, как окислителя с поливиниловым спиртом. Композиция постепенно разрушается с выделением газообразных веществ, как собственно при горении. Интересно отметить, что измерение зарядов на таком, разрушавшемся при комнатной температуре образце, в ходе его

термообработки были существенно ниже, чем на образце прекурсора с ПВС, подвергнутого упариванию растворителя в реакционном сосуде с последующим горением. В первом случае для одинаковых образцов разность потенциалов земля – прекурсор составляла, например, лишь 4 В, а во втором достигала значения 18 В. Но это закономерно, учитывая, что заряды в прекурсоре генерируются за счет возникновения с определенной вероятностью и уноса в окружающую среду ионизированных молекулярных группировок [7]. Устойчивость прекурсоров с глицином была обусловлена снижением окислительно-восстановительного потенциала ионов железа в паре Fe^{3+} / Fe^{2+} при комплексообразовании. Каталитические свойства ионов железа при этом уменьшались.

В ходе горения твердых прекурсоров, из которых была предварительно удалена путем сушки вода, для систем с глицином наблюдали образование макроскопической текстуры получаемых продуктов похожей на мох ягель (см. рис. 5). Фрактальные структуры наблюдаются в сложнооксидных образцах, в частности, манганитах лантана, на микроуровне [7]. В данном случае такие структуры обладают значительно большими размерами. Электронно-микроскопические исследования (рис. 6) полученных ягелеподобных образцов продемонстрировали наличие протяженных оксидных частиц во внутренней части волокон (см. рис. 6). Результаты рентгенофазового анализа образцов глицин-нитратных прекурсоров (стехиометрическое соотношение по реакции горения $\varphi = 1$) после их сжигания и термообработки при 650 и 800°C показали, что в указанных образцах обнаруживаются помимо гексаферрита стронция фазы оксида железа Fe_2O_3 и $Sr_4Fe_6O_{13}$, а образцы с ПВС закономерно содержат кроме $SrFe_{12}O_{19}$ еще Fe_3O_4 (650°C) и Fe_2O_3 (650 и 800°C), в том числе в форме маггемита. Дополнительные фазы, включающие стронций, в данном случае идентифицируются плохо, по-видимому, ввиду их низкой кристалличности. Помимо прочих причин отличия систем с глицином и ПВС следует учитывать, что характер термической деструкции глицина [13] имеет отличия от процессов деструкции ПВС [14].

В качестве одной из причин наличия ягелеподобной структуры можно предположить наличие у образцов с глицином кристаллической структуры, которая при горении может задавать векторы возникновения ассоциированных за счет магнитного взаимодействия частиц оксидов железа. Однако, приготовление образцов в глицин-нитратной системе путем упаривания растворов в чашке без предварительной кристаллизации, в принципе, приводит также к возникновению дендритных образований после горения. Таким образом, большее значение может, вероятно, иметь возможность взаимной ориентации молекул

железо-глицинового комплекса (в том числе при формировании твердой фазы в условиях горения), фазовый состав получаемых при горении наночастиц, поскольку известно, что оксид железа при термообработке склонен к образованию игольчатых форм [15]. Протяженную форму могут, по-видимому, наследовать и синтезируемые частицы гексаферрита.

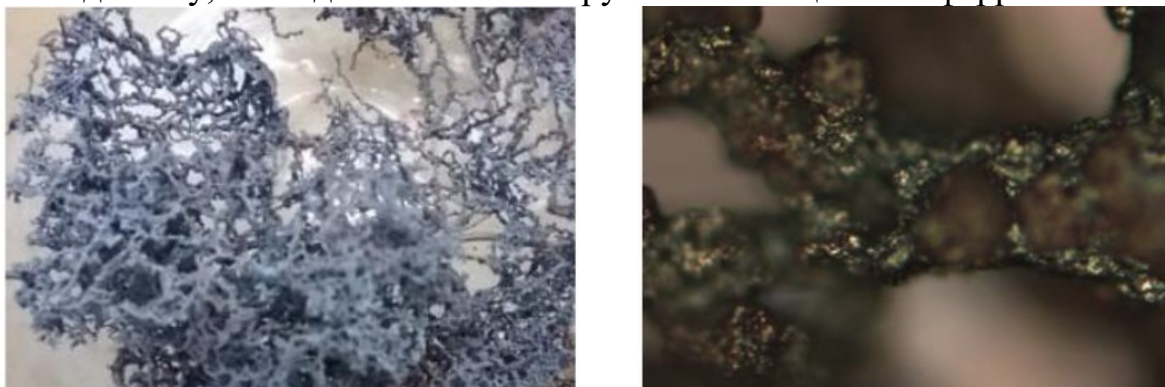


Рис. 5. Образцы, полученные в результате горения глицин нитратных прекурсоров гексаферрита стронция.

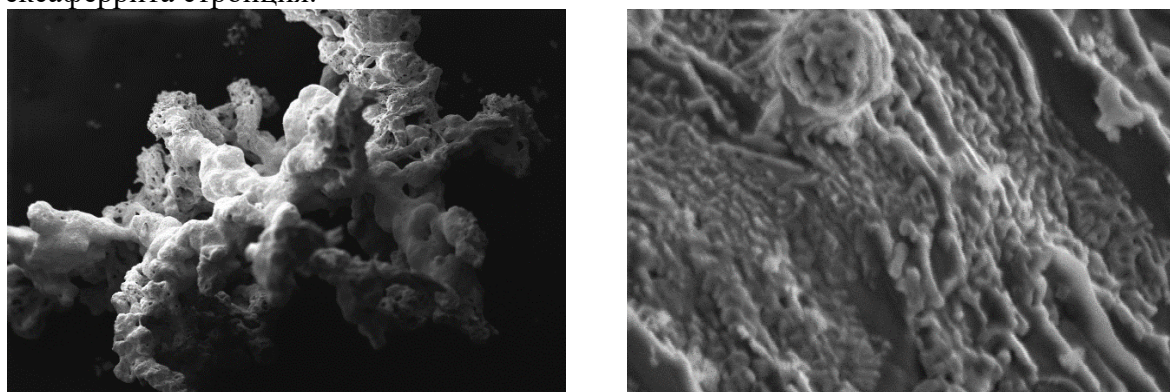


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение глицин-нитратного прекурсора после его горения: а – вид снаружи (масштаб 200 мкм), б – внутренняя часть образовавшейся «нити» (масштаб 1 мкм).

В ходе последующей термообработки образцов, судя по данным электронной микроскопии, обнаруженные фрактальные структуры сохранялись. Синтез и отжиг в магнитном поле напряженностью 3 кЭ существенного влияния на возникающую текстуру образцов не оказывал, однако повышал значение коэрцитивной силы полученных образцов. Практически однофазные образцы гексаферрита стронция были получены уже при относительно низкой температуре 800°C из прекурсоров, включавших двукратный избыток ПВС или глицина ($\varphi = 2$) относительно стехиометрии реакции горения в расчете на образование молекулярного азота, диоксида углерода, паров воды. Измеренные значения разности потенциалов земля – прекурсор, коррелирующей с интенсивностью генерирования зарядов, для $\varphi = 2$ были ниже, чем при $\varphi = 1$ (соответственно 4 и 53 В для ПВС 1 и 6 В для глицина). Ягелеподобные структуры при количестве глицина в расчете на $\varphi = 2$ после горения

прекурсоров не наблюдали. Поэтому к возможным причинам их возникновения может быть отнесено и наличие зарядов (взаимного отталкивания наночастиц). Магнитные свойства (см. Таблицу 1) характеризуют отожженные образцы, полученные в глициновой системе с $\varphi = 1$, как более высококоэрцитивные по сравнению с $\varphi = 2$, чему способствует, по-видимому, образование протяженных частиц. Хотя намагниченность образцов с $\varphi = 1$ была ниже. Возможно это связано со снижением однородности материала при формировании гексаферрита в ягелеподобных структурах за счет пространственного разобщения фаз, содержащих железо и стронций, имеющих в том числе разную устойчивость глициновых комплексов.

Таблица 1. Магнитные характеристики образцов.

Образец	M_s (77К), Гс·см ³ ·Г ⁻¹	M_s (300К), Гс·см ³ ·Г ⁻¹	M_r (77К), Гс·см ³ ·Г ⁻¹	M_r (300К), Гс·см ³ ·Г ⁻¹	M_r / M_s (77К)	M_r / M_s (300К)	H_c (77К), кЭ	H_c (300К), кЭ
1	63	46	34	25	0,53	0,53	5,07	5,52
2	71	50	39	28	0,54	0,55	4,19	4,80
3	77	55	42	30	0,55	0,55	4,64	5,23
4	92	66	49	35	0,53	0,53	5,13	5,70

*Синтез из прекурсоров с глицином $\varphi = 1$ (1), $\varphi = 2$ (2); прекурсоров с ПВС $\varphi = 1$ (3), $\varphi = 2$ (4).

Оценка влияния интенсивности генерирования зарядов при горении прекурсоров в системе с ПВС показывает, что более высокие магнитные характеристики достигаются при относительно низких зарядах, это необходимо учитывать, выбирая условия синтеза. Оптимизировать магнитные свойства образцов в системе с ПВС дополнительно удалось за счет проведения промежуточной текстурирующей термообработки, например, при 500°C с нагреванием прекурсоров после сжигания в магнитном поле. Для образцов с $\varphi = 2$ (окончательный отжиг 900°C) коэрцитивная сила достигла значения 6400 Э при достигнутом уровне намагниченности, а для $\varphi = 1$ она осталась на уровне 5200 Э.

4. Заключение

В ходе исследований обнаружено интересное явление формирования в ходе горения глицин-нитратных прекурсоров текстурированных в виде волокон на макро- и микроуровне образцов гексаферрита стронция, которые сохраняются в результате термообработки и дают повышение коэрцитивной силы материала. Это явление обусловлено, по-видимому, образованием в прекурсорах устойчивых железо-глициновых комплексов, внешнее магнитное поле не оказывает заметного влияния на такую текстуру. В зависимости от состава прекурсоров в них возникают при горении электрические заряды и устанавливается разность потенциалов земля – прекурсор. Экспериментальные данные показывают, что в данном

случае при относительно невысоком уровне зарядов могут быть получены материалы, обладающие более высокой намагниченностью, связанной с формированием магнитной структуры собственно сложнооксидных кристаллитов. Эти материалы способны к повышению своих характеристик при дальнейшей термомагнитной обработке.

Изучение полученных образцов проводилось с использованием оборудования Уральского центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии». Исследования выполнены при финансировании по гранту Российского научного фонда (проект № 22-23-00718).

Библиографический список:

1. **Luo, H.** Physical and magnetic properties of highly aluminum doped strontium ferrite nanoparticles prepared by auto-combustion route / H.Luo, B.K.Rai, S.R. Mishra et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – V. 324. – I. 17. – P. 2602-2608. DOI:10.1016/j.jmmm.2012.02.106.
2. **Lomanova, N.A.** Magnetic characteristics of nanocrystalline BiFeO₃-based materials prepared by solution combustion synthesis / N.A. Lomanova, M.V. Tomkovich, D.P. Danilovich et al. // *Inorganic Materials*. – 2020. – V. 56. – I. 12. – P. 1271-1277. DOI: 10.1134/S0020168520120110.
3. **Affleck, L.** Microstructural aspects of the self-propagating high-temperature synthesis of hexagonal barium ferrites in an external magnetic field / L. Affleck, M.D. Aguas, L.P. Parkin et al. // *Journal of Materials Chemistry*. – 2000. – V. 10. – I. 8. – P. 1925-1932. DOI: 10.1039/B002431G.
4. **Gubin, S.P.** Magnetic nanoparticles: preparation methods, structure / S.P. Gubin, Yu.A. Koksharov, G.B. Khomutov, G.Yu. Yurkov // *Russian Chemical Reviews*. – 2005. – V. 74. – № 6. – P. 489-520. DOI 10.1070/RC2005v074n06ABEH000897.
5. **Ostroushko, A.A.** Oxide material synthesis by combustion of organic-inorganic compositions / A.A. Ostroushko, O.V. Russkikh // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. – 2017. – V. 8. – I. 4. – P. 476-502. DOI: 10.17586/2220-8054-2017-8-4-476-502.
6. **Das, P.** Facile synthesis of pseudo-peanut shaped hematite iron oxide nano-particles and their promising ethanol and formaldehyde sensing characteristics / P. Das, B. Mondala, K. Mukherjee // *RSC Advances*. – 2014. – V. 4. – I. 60. – P. 31879-31886. DOI: 10.1039/c4ra03098b.
7. **Ostroushko, A.A.** Determinative factors for the thermochemical generation of electric charges upon combustion of nitrate-organic precursors for materials based on lanthanum manganite and cerium dioxide / A.A. Ostroushko, T.Y. Maksimchuk, A.E. Permyakova, O.V. Russkikh // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2022. – V. 67. – I. 6. – P. 799-809. DOI: 10.1134/S0036023622060171.
8. **Zhi, M.** Complex formation constant of ferric ion with Gly, Pro-Hyp and Gly-Pro-Hyp / M. Zhi, Yu. Li, S.P. Santoso et al // *RSC Advances*. – 2018. – V. 8. – I. 48. – P. 27157-27162. DOI: 10.1039/c8ra04763d.
9. **Помогайло, А.Д.** Полимерные иммобилизованные металлокомплексные катализаторы. – М.: Наука, 1988. – 304 с.
10. **Teixeira, J.A.** Synthesis, thermal behavior in oxidative and pyrolysis conditions, spectroscopic and DFT studies of some alkaline earth metals *p*-aminobenzoate complexes using TG-DTA, DSC, PXRD and EGA (TG-FTIR) techniques / J.A. Teixeira, P.R. Fernandes, G. Isquibola et al. // *Thermochimica Acta*. – 2022. – V. 711. – Art. № 179184. DOI: 10.1016/j.tca.2022.179184.
11. **Djurdjevic, P.** The complexation between iron(III) ion and glycine in nitrate medium / P. Djurdjevic // *Transition Metal Chemistry*. – 1990. – V. 15. – I. 5. – P. 345-350. DOI: 10.1007/BF01177459.
12. **Ostroushko, A.A.** Catalytic activity of metal ions in redox processes in polymer-salt systems during synthesis of mixed oxides / A.A. Ostroushko // *Inorganic Materials*. – 2004. – V.40. – I. 3. – P. 259-263. DOI: 10.1023/B:INMA.0000020524.35838.de.
13. **Yablokov, V.A.** Thermal stability of amino acids / V.A. Yablokov, I.L. Smel'tsova, V.I. Faerman // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2013. – V. 83. – I. 3. – P.476-480. DOI: 10.1134/S1070363213030122.
14. **Ломакин, С.М.** Кинетические особенности термодеструкции поливинилового спирта в композициях с полиоксидом бора. Ч. 1. Кинетика термодеструкции / С.М. Ломакин, А.Ю. Шаулов, Е.В. Коверзанова и др. // *Химическая физика*. – 2019. – Т. 38. – № 4. – С. 74-83. DOI: 10.1134/S0207401X19040083.
15. **Ламберов, А.А.** Трансформация структуры оксида железа (III) при термическом нагреве на воздухе / А.А. Ламберов, Е.В. Дементьева, О.В. Кузьмина, Б.Р. Хазеев // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – V. 16. – № 1. – С. 37-41.

References:

1. Luo H., Rai B.K., Mishra S.R. et al. Physical and magnetic properties of highly aluminum doped strontium ferrite nanoparticles prepared by auto-combustion route, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, vol. 324, issue 17, pp. 2602-2608. DOI: 10.1016/j.jmmm.2012.02.106.
2. Lomanova N.A., Tomkovich M.V., Danilovich D.P. et al. Magnetic characteristics of nanocrystalline BiFeO₃-based materials prepared by solution combustion synthesis, *Inorganic Materials*, 2020, vol. 56, issue 12, pp. 1271-1277. DOI: 10.1134/S0020168520120110.
3. Affleck L., Aguas M.D., Parkin LP. et al. Microstructural aspects of the self-propagating high-temperature synthesis of hexagonal barium ferrites in an external magnetic field, *Journal of Materials Chemistry*, 2000, vol. 10, issue 8, pp. 1925-1932. DOI: 10.1039/B002431G.
4. Gubin S.P., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B., Yurkov G.Yu. Magnetic nanoparticles: preparation methods, structure, *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, no. 6, pp. 489-520. DOI: 10.1070/RC2005v074n06ABEH000897.
5. Ostroushko A.A., Russkikh O.V. Oxide material synthesis by combustion of organic-inorganic compositions, *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*, 2017, vol. 8, issue 4, pp. 476-502. DOI: 10.17586/2220-8054-2017-8-4-476-502.
6. Das P., Mondala B., Mukherjee K. Facile synthesis of pseudo-peanut shaped hematite iron oxide nanoparticles and their promising ethanol and formaldehyde sensing characteristics, *RSC Advances*, 2014, vol. 4, issue 60, pp. 31879-31886. DOI: 10.1039/c4ra03098b.
7. Ostroushko A.A., Maksimchuk T.Y., Permyakova A.E., Russkikh O.V. Determinative factors for the thermochemical generation of electric charges upon combustion of nitrate-organic precursors for materials based on lanthanum manganite and cerium dioxide, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, issue 6, pp. 799-809. DOI: 10.1134/S0036023622060171.
8. Zhi M., Li Y., Santoso S.P. et al. Complex formation constant of ferric ion with Gly, Pro-Hyp and Gly-Pro-Hyp, *RSC Advances*, 2018, vol. 8, issue 48, pp. 27157-27162. DOI: 10.1039/c8ra04763d.
9. Pomogailo A.D. *Polimernye immobilizovannye metallokompleksnye katalizatory* [Polymer immobilized metal complex catalysts]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 304 p. (In Russian).
10. Teixeira J.A., Fernandes R.P., Isquibola G. et al. Synthesis, thermal behavior in oxidative and pyrolysis conditions, spectroscopic and DFT studies of some alkaline earth metals *p*-aminobenzoate complexes using TG-DTA, DSC, PXRD and EGA (TG-FTIR) techniques, *Thermochimica Acta*, 2022, vol. 711, art. no. 179184. DOI: 10.1016/j.tca.2022.179184.
11. Djurdjevic P. The complexation between iron(III) ion and glycine in nitrate medium, *Transition Metal Chemistry*, 1990, vol. 15, issue 5, pp. 345-350. DOI: 10.1007/BF01177459.
12. Ostroushko A.A. Catalytic activity of metal ions in redox processes in polymer-salt systems during synthesis of mixed oxides, *Inorganic Materials*, 2004, vol. 40, issue 3, pp. 259-263. DOI: 10.1023/B:INMA.0000020524.35838.de.
13. Yablokov V.A., Smel'tsova I.L., Faerman V.I. Thermal stability of amino acids, *Russian Journal of General Chemistry*, 2013, vol. 83, issue 3, pp. 476-480. DOI: 10.1134/S1070363213030122.
14. Lomakin S.M., Shaulov A.Yu., Koverzanova E.V. et al. Kinetics of polyvinyl alcohol thermal degradation in the compositions with boron polyoxide: Part 1. Kinetics of thermal degradation, *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2019, vol. 13, issue 2, pp. 374-382. DOI: 10.1134/S1990793119020192.
15. Lamberov A.A., Dement'eva E.V., Kuz'mina O.V., Khazeev B.R. Transformatsiya struktury oksida zheleza (III) pri termicheskom nagreve na vozdukh [Transformation of the structure of iron oxide (III) during thermal heating in air], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan University of Technology], 2013, vol. 16, no. 1, pp. 37-41. (In Russian).

Original paper

PECULIARITIES OF TEXTURE FORMATION IN STRONTIUM HEXAFERRITE-BASED MATERIALS WHEN PRODUCED FROM ORGANIC NITRATE PRECURSORS

A.A. Ostroushko¹, M.O. Tonkushina¹, T.Yu. Zhulanova^{1,2}, E.V. Kudyukov¹, A.Ya. Golub¹,
O.V. Russkikh¹

¹*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

²*Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.1017

Abstract: The processes of strontium hexaferrite (permanent magnet material) fabrication in combustion reactions followed by heat treatment of organic nitrate precursors containing glycine or

polyvinyl alcohol have been studied. The formation of iron-glycine complexes of organic precursor components affects the formation of the morphology of the obtained samples. When using glycine-containing systems during combustion, a branched fibrous texture of the material with extended internal cavities with elongated oxide particles emerges. Such samples have a higher coercivity; the external magnetic field has no significant influence on the texture formation during combustion. It was established that charges are generated in precursors during their combustion, which manifests itself in the appearance of a potential difference between the ground and the precursor. In this case, the appearance of lower intensity charges allows us to obtain samples with higher magnetization, as well as with a greater ability to increase the magnetic characteristics during further thermomagnetic processing.

Keywords: strontium hexaferrite, synthesis, organic nitrate precursors, magnetic properties, texturing.

Остроушко Александр Александрович – д.х.н., профессор, главный научный сотрудник, заведующий Отделом химического материаловедения Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Тонкушина Маргарита Олеговна – к.х.н., старший научный сотрудник Отдела химического материаловедения Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Жуланова Татьяна Юрьевна – лаборант-исследователь Отдела химического материаловедения Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», аспирант 2 года обучения ФГБУН «Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук»

Кудюков Егор Владимирович – к.ф.-м.н., научный сотрудник Отдела магнетизма твердых тел Института естественных наук и математики, ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Голуб Алексей Яковлевич – ассистент кафедры аналитической химии и химии окружающей среды Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Русских Ольга Владимировна – к.х.н., старший научный сотрудник Отдела химического материаловедения Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Alexander A. Ostroushko – Dr. Sc., Professor, Chief Researcher and Head of Department of Chemical Materials Science in Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Margarita O. Tonkushina – Ph. D., Senior Researcher, Department of Chemical Materials Science in Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Tatiana Yu. Zhulanova – Research Laboratory Assistant, Department of Chemical Materials Science in Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2nd year postgraduate student, Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Egor V. Kudyukov – Ph. D., Researcher, Department of Magnetism of Solids in Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Alexey Ya. Golub – Assistant, Department of Analytical Chemistry and Environmental Chemistry in Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Olga V. Russkikh – Ph. D., Senior Researcher, Department of Chemical Materials Science in Institute of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Поступила в редакцию/received: 20.07.2023; после рецензирования/ revised: 28.08.2023; принята/accepted: 01.09.2023.