05

Фотокаталитические и магнитные свойства наночастиц феррита цинка

© К.Д. Мартинсон, А.А. Мурашкин

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН,
194064 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: martinsonkirill@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 марта 2024 г.
В окончательной редакции 15 июня 2025 г.
Принято к публикации 15 июня 2025 г.

В условиях метода растворного горения с использованием лимонной кислоты в качестве органического топлива при различных соотношениях окислителя и восстановителя были получены порошки феррита цинка со средним размером частиц от (5.9 ± 1) до (30.9 ± 3) nm и долей кристаллической фазы от 62 % до 99 %. Показано, что формирование феррита начинается при соотношении окислитель/восстановитель 0.50, тогда как при соотношении 0.25 образуется почти полностью рентгеноаморфный образец со средним размером частиц порядка 6 nm. В области стехиометрического содержания органического топлива образуется твердый продукт, содержащий одну фазу — феррит цинка со средним размером частиц 20–25 nm. Наибольшие значения намагниченности насыщения (43.8 emu/g), остаточной намагниченности (27.2 emu/g) и коэрцитивной силы (336.2 Oe) были обнаружены в образце, синтезированном при соотношении окислитель/восстановитель 1.00, что соответствует стехиометрическому содержанию лимонной кислоты в реакционном растворе. Спектрофотометрические исследования показали, что все образцы способствуют разложению органического красителя (Родамина Б). Наибольшие параметры разложения зафиксированы у образцов, в составе которых отсутствовали примесные оксидные фазы, имеющих наименьший размер частиц и содержащих высокий процент кристаллической фазы феррита цинка.

Ключевые слова: феррит цинка, растворное горение, лимонная кислота, магнитные свойства, фотокаталитические свойства.

DOI: 10.61011/JTF.2025.10.61355.84-24

Введение

Ферриты-шпинели производятся и применяются в промышленности уже более 70 лет, однако интерес к этим материалам продолжает неуклонно расти [1]. С точки зрения структуры, к ферритам-шпинелям относят соединения, отвечающие формуле AFe_2O_4, где катион A является двухвалентным металлом (Mn, Co, Ni, Cu, Zn и т.д.). Отличительными характеристиками всех ферритов-шпинелей является их химическая и термическая стабильность и уникальный набор магнитных и электромагнитных характеристик, за счет которых материалы данного типа до сих пор активно применяются в производстве различных изделий радиоэлектроники [2]. Принято разделять ферриты-шпинели на нормальные шпинели, в которых восемь тетраэдрических позиций заполнены двухвалентными катионами металлов, а шестнадцать октаэдрических позиций заполнены трехвалентными катионами железа, и обращенные шпинели, которые отличаются тем, что в них шестнадцать октаэдрических позиций наполовину заполнены двухвалентными катионами металлов, а оставшиеся восемь октаэдрических и восемь тетраэдрических позиций заняты трехвалентными катионами железа [3]. Феррит цинка относится к классу нормальных шпинелей, что, в том числе, означает, что его степень обращенности равна нулю [4].

Области применения феррита цинка можно разделить на классические и новые, которые стали активно развиваться несколько десятков лет назад. К классической сфере применения исторически относят сферу электромагнитных керамических материалов, где в основном используются многокомпонентные цинковые ферриты, в первую очередь, цинк-марганцевые [5]. В области исследования влияния допирующих добавок (в качестве которых используют двухвалентные катионы переходных металлов) было опубликовано множество работ, где было показано, что введение марганца в кристаллическую решетку феррита цинка позволяет существенно улучшить его электромагнитные характеристики, например, диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь [6]. С точки зрения классических сфер применения, чистый феррит цинка не представляет особого интереса из-за не самых высоких магнитных и электромагнитных характеристик. Тем не менее активное развитие методов „мокрой химии“ и химии наноструктур привело к открытию большого числа новых прикладных применений сложнооксидных систем в целом и феррита цинка в частности [7]. В настоящее время наночастицы феррита цинка активно применяются в качестве материалов для производства

сенсоров и датчиков (например, для определения различных газов) [8], в магнитной гипертермии [9], катализе [10] и фотокатализе [11]. В этих областях важным является возможность осуществления направленного синтеза наноструктур с контролируемым размером частиц, морфологией, и высокими значениями удельной поверхности. Поэтому задача разработки и исследования новых техник получения наночастиц феррита цинка, в которых бы соблюдались все перечисленные выше факторы, является актуальной и важной исследовательской проблемой [12].

К сегодняшнему дню известно большое количества методов, с помощью которых возможно получать наночастицы феррита цинка для различных сфер применения. Наиболее распространенным до сих пор остается традиционный твердофазный синтез с применением планетарных или вибрационных мельниц [13]. Его популярность связана с тем, что данная методика до сих пор остается основной в промышленном производстве ферритовых материалов, так как лучше всего поддается промышленному масштабированию [14]. Тем не менее твердофазный синтез, несмотря на возможность получения, в том числе наночастиц с использованием мельниц-активаторов, имеет ряд существенных недостатков как в отношении возможности осуществлять направленный синтез наноструктур с контролируемыми свойствами, так и с точки зрения возможности получать однофазные объекты без примесных оксидных фаз [15]. Среди популярных методов получения наночастиц сложнооксидных систем, в том числе ферритов-шпинелей, можно выделить гидротермальный синтез [16], золь-гель синтез [17], метод соосождения [18], метод растворного горения [19], сонохимический синтез [20] и ряд других. Наиболее перспективным в настоящее время выглядит метод растворного горения, который не требует сложного и дорогого оборудования для его использования и имеет хорошие перспективы для промышленного масштабирования [21]. Кроме того, в рамках данного метода получения возможно контролировать большое количество параметров синтеза, что обеспечивает возможность осуществления направленного синтеза наноструктур [22].

В научной литературе представлено большое количество работ по получению наночастиц феррита цинка и изучению его функциональных свойств [1,9,23]. В том числе опубликован ряд работ по получению феррита цинка в условиях растворного горения [4,24,25]. Так, в работе [24] наночастицы $ZnFe_2O_4$ размером от 19.1 до 113.1 nm были получены методом прямого растворного горения с использованием мочевины в качестве органического топлива и были подробно изучены их фотокаталитические характеристики на примере нескольких органических красителей. Недостатком описанной в работе [24] технологии синтеза является необходимость термической обработки в воздушной атмосфере при температурах от 400 °C до 1100 °C и наличие примесных фаз оксида цинка и железа при выборе режима обработки от 400 °C до 600 °C. В итоге чистый феррит цинка образуется только при температуре от 700 °C, что негативно влияет на средний размер частиц (больше 40 nm) и, как следствие, на фотокаталитические характеристики. В работе [25] изучалось влияние различных видов органических топлив (глицина, мочевины и этилендиаминтетрауксусной кислоты) на структурные и магнитные свойства феррита цинка, полученного методом прямого растворного горения. Показано, что, в зависимости от состава реакционной среды, возможно получение частиц размером от 10 до 27 nm, но с достаточной низкой долей кристаллической фазы и с наличием примесных фаз оксидов цинка и железа. Наиболее перспективной с точки зрения возможности получения однофазных образцов выглядит работа [4], в которой использовалась разновидность методов растворного горения и золь-гель синтеза с применением лимонной кислоты. Основная идея заключалась в синтезе исходного порошка феррита при стехиометрическом соотношении окислителя и восстановителя соотношении и последующей термической обработки в воздушной атмосфере при температурах от 350 °C до 1000 °C. В результате во всех синтезированных порошках отсутствовали примесные фазы оксидов цинка и железа, но и средний размер частиц был довольно большим (порядка 50–60 nm).

В настоящей работе наночастицы феррита цинка были получены методом растворного горения с использованием лимонной кислоты при различных f — соотношениях окислителя и восстановителя ($f = 0.25, 0.5, \ldots, 1.5$). Несмотря на то что в научной литературе за последние несколько лет был опубликован ряд работ [4,25], где методом растворного горения с аналогичным типом органического топлива были синтезированы образцы феррита цинка, подробного исследования влияния соотношения окислитель/восстановитель на структурные и функциональные характеристики до сих пор не проводилось. Тем не менее именно варьирование количества топлива в реакционной среде позволяет получать частицы меньшего размера, чем в случае с варьированием температуры термической обработки продуктов горения [26].

1. Экспериментальная часть

В качестве исходных реагентов были использованы: $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (99 %, Нева-реактив), $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (99 %, Нева-реактив), $C_6H_8O_7$ (99 %, Нева-реактив), HNO_3 (98 %, Нева-реактив) и бидистиллированная вода со значением удельного электрического сопротивления не более 5 MΩ·cm. Дополнительная отчистка перед использованием исходных реактивов для синтеза не применялась.

На первом этапе синтеза нитраты цинка и железа взвешивались в количестве, рассчитанном по реакции образования конечного продукта, растворялись в 50 ml дистиллированной воды и механически перемешивались в течение 15 min с добавлением нескольких миллилит-

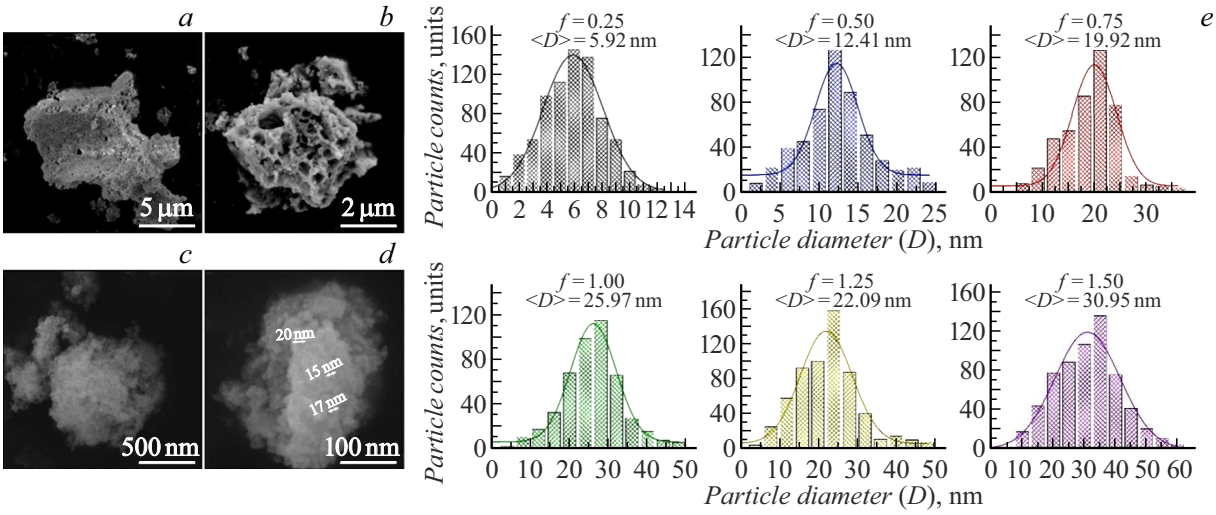

Рис. 1. Микрофотографии образца феррита цинка, синтезированного методом растворного горения с использованием лимонной кислоты при $f = 1.00$ (a–d), гистограммы распределения частиц по размерам при разных f (e).

ров 5M азотной кислоты для предотвращения образования примесных комплексных соединений. После полного растворения кристаллогидратов к реакционному раствору добавлялась лимонная кислота в соотношениях $f = 0.25, 0.5, \ldots, 1.5$, где $f = 1.00$ является стехиометрическим количеством лимонной кислоты по реакции образования, а $f = 0.25 - 0.75$ и $f = 1.25 - 1.50$ — реакционными растворами с недостатком и избытком органического топлива соответственно. Полученные таким образом растворы еще раз механически перемешивались в течение 15 min и нагревались с использованием керамической плитки до практически полного удаления воды из раствора и достижения точки самовоспламенения, при которой происходило образование феррита цинка при обильном газовыделении оксидов углерода и азота. Полученный конечный твердый продукт механически перемалывался в керамической ступке и термически обрабатывался в воздушной атмосфере при температуре 500 °C в течение 1 h.

Исследование химического состава и морфологии синтезированных порошков проводилось при помощи методов энергодисперсионной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH и приставки Oxford INCA. Определение фазового состава и проведение рентгеноструктурного анализа было выполнено методом порошковой рентгеновской дифрактометрии с использованием дифрактометра Rigaku SmartLab 3 с $CuK_\alpha 1$ излучением (0.154056 nm) при 40 kV и 30 mA в диапазоне 2θ от 10 до 80°, шагом 0.01° и временем накопления 3 s. Обработка полученных дифрактограмм выполнялась в программном комплексе Rigaku SmartLab Studio II, определение фазового состава было выполнено с использованием базы данных ICDD PDF-2. Расчет среднего размера кристаллитов выполнялся с использованием формулы Шеррера:

$$D = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\theta},$$

где k — фактор формы кристаллов (в изометрическом приближении принимался равным 0.94), λ — длина волны рентгеновского излучения (CuK_α, $\lambda = 0.15406$ nm), β — уширение дифракционного максимума (в радианах), θ — положение дифракционного максимума (угол Брегга).

Магнитные параметры образцов феррита цинка анализировались с помощью вибрационного магнитометра Lake Shore 7410 при комнатной температуре (298 K) в диапазоне полей до 60 000 Oe с использованием стандартной кюветы. Спектрофотометр Shimadzu UV-1800 был использован для проведения спектрофотометрических исследований с применением Родамина Б в качестве модельного красителя. Для получения спектров 10 mg исходных образцов прибавлялись к 50 ml раствора красителя с концентрацией 25 mg/kg. Полученные таким образом растворы механически перемешивались в течение 15 min в полной темноте и затем облучались дейтериевой лампой мощностью 18 W в течение 50 min. Пробы растворов брались с шагом 10 min для получения соответствующих спектров.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Элементный состав и морфология

На рис. 1 представлены микрофотографии порошков феррита цинка и гистограммы распределения среднего размера частиц, определенные с использованием программного комплекса ImageJ. Все синтезированные композиции с точки зрения морфологии представляют

Химический состав образцов феррита цинка с пересчетом на основные компоненты.

Образец, f	Zn, at.%	Fe, at.%
0.25	32.5	67.5
0.50	33.0	67.0
0.75	32.8	67.2
1.00	33.1	66.9
1.25	32.1	67.9
1.50	32.2	67.8

собой типичную картину твердых продуктов растворного горения. В качестве примера на микрофотографиях представлена морфология образца $ZnFe_2O_4$, синтезированного при стехиометрическом соотношении $f = 1.00$. Видно, что морфология образца состоит из микронных агломератов размером от 5 до $0.5\,\mu$m (рис. 1, a–c), состоящих, в свою очередь, из частиц размером 15–20 nm (рис. 1, d). Наименьший средний размер частиц наблюдается у образца, синтезированного при существенном недостатке лимонной кислоты ($f = 0.25$), и составляет 5.92 nm, что объясняется режимом и температурой горения в зависимости от количества органического топлива. Известно [21,27], что в зависимости от состава соотношения окислителя и восстановителя температура горения пламени может меняться в среднем от 400 °C до 900 °C, кроме того, может меняться и режим горения от тлеющего к объемному и поверхностному. С повышением количества лимонной кислоты в исходном реакционном растворе и, как следствие, с повышением температуры горения пламени наблюдается увеличение роста размера частиц до 30.95 nm при соотношении $f = 1.50$. Таким образом, исследования морфологии и размеров частиц показывают, что полученные частицы феррита цинка имеют размер от 5.92 до 30.95 nm и обладают развитой морфологией, типичной для сложнооксидных систем, полученных в условиях растворного горения.

Таблица демонстрирует результаты элементного анализа всех синтезированных порошков с пересчетом на металлы без учета кислорода. Полученные данные свидетельствуют, что экспериментальный химический состав всех образцов феррита цинка согласуется с расчетным составом в пределах погрешности метода определения. Наибольшие различия наблюдаются в образцах, синтезированных при существенном избытке ($f = 1.25$ и 1.50) и недостатке ($f = 0.25$) органического топлива и, по всей видимости, связаны с тем, что при таких соотношениях процесс формирования феррита цинка протекает не полностью, что было подтверждено данными порошковой рентгеновской дифрактометрии.

2.2. Фазовый состав и структурный анализ

Анализ фазового состава синтезированных композиций показал, что формирование феррита цинка начинается с соотношением окислителя и восстановителя f, равного 0.50 (рис. 2). При соотношении $f = 0.25$ образец представляет собой практически полностью рентгеноаморфный порошок с небольшим включением оксидных примесных фаз ($> 4\,\%$). Из литературных данных известно [28], что образование феррита цинка в условиях растворного горения с использованием нитратов в качестве исходных компонентов протекает в температурном диапазоне от 370 °C до 450 °C в зависимости от типа органического топлива. Отсутствие характерных шпинельных пиков на дифрактограмме образца, полученного при существенном недостатке топлива, позволяет предположить, что при данном соотношении температура горения пламени ниже температуры кристаллизации феррита цинка. С повышением соотношения окислитель/восстановитель до 0.50 формируется образец, содержащий кристаллическую и аморфную фазы феррита цинка (карточка JCPDS # 08-0234 [29]), и какие-либо примесные оксидные фазы не обнаружены. Средневзвешенный размер кристаллитов, определенный методом фундаментальных параметров (рис. 2, b), 9.7 nm, хорошо согласуется с размерами частиц, определенными с помощью визуальной оценки микрофотографий (12.41 nm). С приближением соотношения окислителя и восстановителя к точке стехиометрии наблюдается рост интенсивности пиков, отвечающих фазе феррита цинка, и уменьшение их ширины, что свидетельствует о росте размера кристаллов. Это подтверждает и распределение кристаллитов по размерам, согласно которому средний размер для образцов, полученных при соотношениях $f = 0.75$, 1.00 и 1.25 равен 33.1, 19.8 и 21.7 nm соответственно. При переходе в область избытка топлива наблюдается появление примесной фазы оксида цинка, доля которой оказалась равной 19 и 22 mass% для образцов, синтезированных при $f = 1.25$ и 1.50 соответственно. Появление фазы оксида цинка в этих образцах также, по всей видимости, связано с переходом режима горения от поверхностного к объемному и к изменению температуры горения пламени.

Зависимости средних размеров кристаллитов, определенных по формуле Шеррера, параметров элементарной ячейки и фазового состава композиций от соотношения окислитель/восстановитель f приведены на рис. 3. Средний размер кристаллитов, рассчитанный по формуле Шеррера [19], хорошо согласуется с данными, полученными с помощью метода фундаментальных параметров и по результатам визуальной оценки микрофотографий (рис. 1, e). Изменения параметров решетки позволяют говорить о некотором процессе структурных превращений при соотношениях окислителя и восстановителя $f = 0.50$ и 0.75, что, по всей видимости, связано с рядом физико-химических превращений в аморфной фазе, состоящей из смеси некристаллизовавшегося фер-

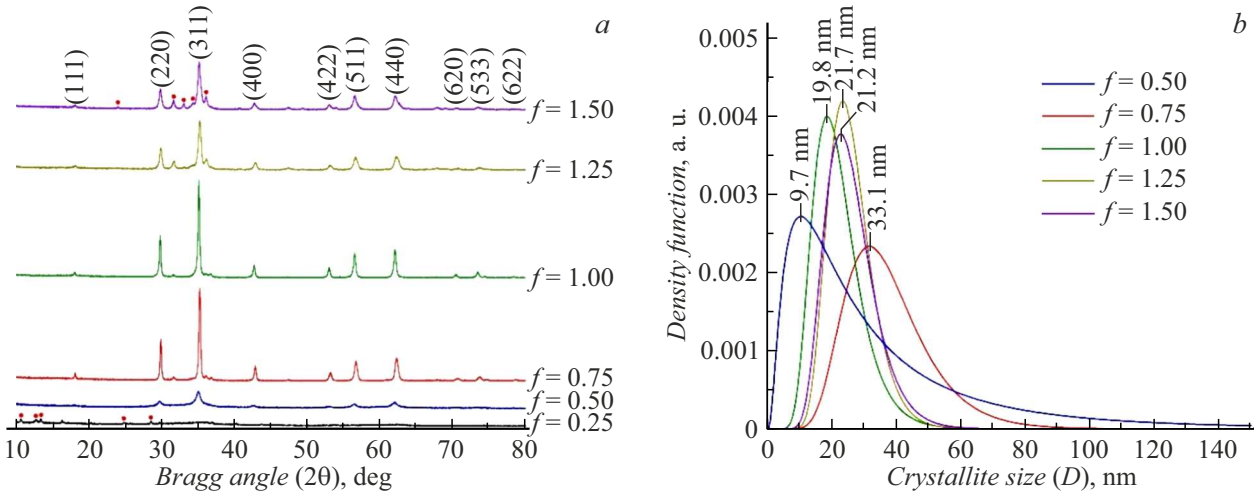

Рис. 2. Дифрактограммы (*a*) и распределение кристаллитов по размерам (*b*) наночастиц феррита цинка, синтезированного в условиях растворного горения.

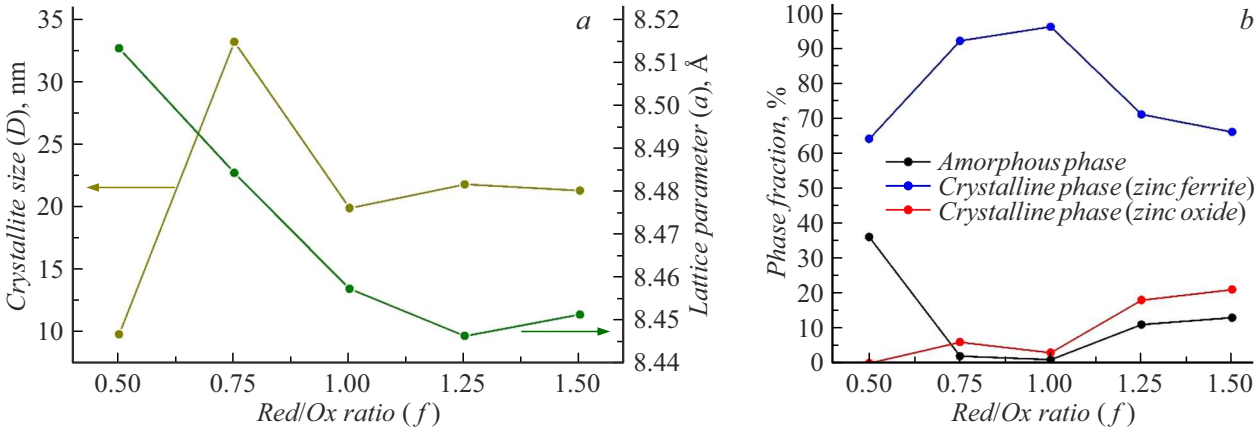

Рис. 3. Зависимость структурных параметров (*a*) и относительного количества фаз (*b*) от соотношения окислитель/восстановитель f.

рита и непрореагировавших исходных компонентов, как было показано авторами в их предыдущей работе на примере ортоферрита европия [30]. Изменение доли фаз в зависимости от выбранного соотношения топлива к нитратам демонстрирует, что при соотношении $f = 0.50$ наблюдается существенный процент аморфной фазы (37%), которая уменьшается почти до нуля в образцах, полученных при $f = 0.75$ и 1.00 (т.е. близко к точке стехиометрии), а затем увеличивается почти до 15% в образцах, синтезированных при избытке топлива. Эти данные подтверждают, что при $f = 0.50$ процесс формирования и кристаллизации феррита цинка протекает не полностью.

2.3. Магнитные параметры

Особенности магнитного поведения синтезированных нанопорошков ферритов определяются, в первую очередь, размером частиц и структурными параметрами. На рис. 4, *a* приведены магнитные M-H-петли гистерезиса всех синтезированных образцов. Особенно выделяется образец, полученный при соотношении $f = 0.25$, который обладает наименьшими характеристиками намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. В этом образце процесс внедрения катионов Zn^{2+} с магнитным моментом между узлами Zn^{2+}-Fe^{2+} в кристаллической решетке шпинели завершился не полностью, в результате чего магнитное обменное взаимодействие в узлах Zn^{2+}-O-Fe^{2+} не возникает, и перехода катионов Fe^{3+} из позиций Fe^{2+} в позиции Zn^{2+} также не происходит [31]. Это подтверждается и результатами порошковой рентгеновской дифрактометрии, из которой следует что образец с $f = 0.25$ не закристаллизовался и представляет собой почти полностью аморфную композицию с размером частиц порядка 7 nm. С увеличением соотношения окислитель/восстановитель f и, как следствие, с повышением размера кристаллитов и доли кристаллической фа-

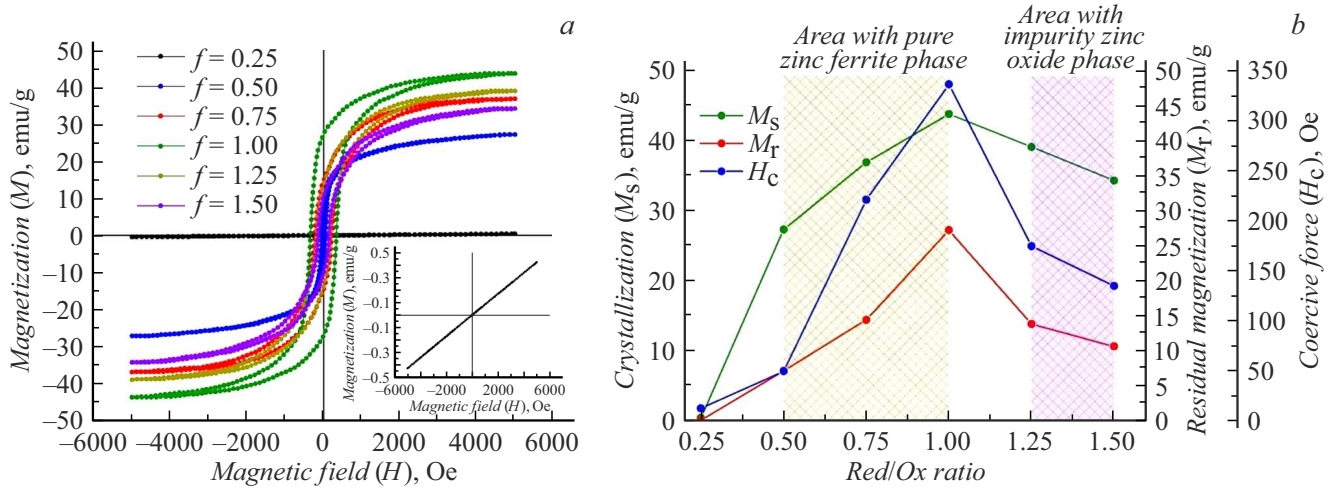

Рис. 4. М-Н-петли гистерезиса (*a*) и зависимость основных магнитных параметров (*b*) от состава исходного реакционного раствора.

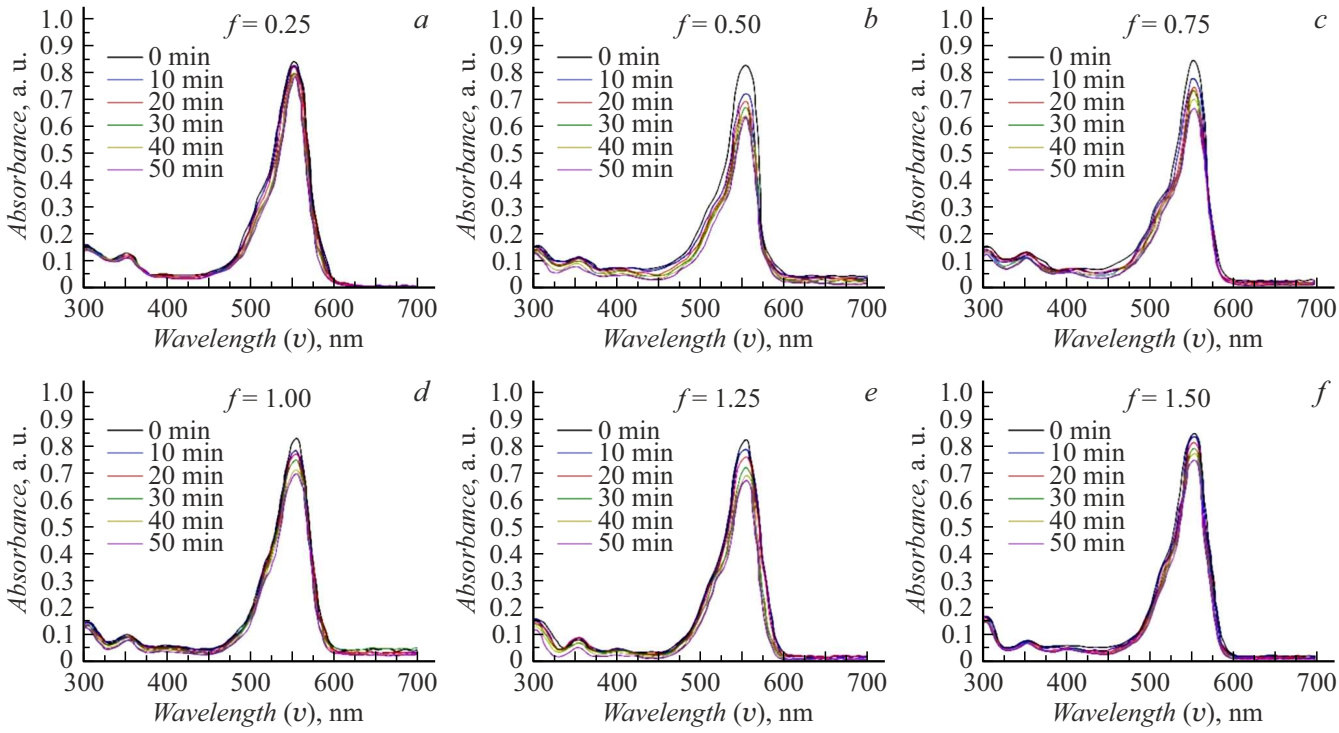

Рис. 5. Спектры фоторазложения Родамина Б в зависимости от условий синтеза наночастиц феррита цинка.

зы наблюдается повышение значений намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. Их максимум достигается при стехиометрическом соотношении $f = 1.00$, где намагниченность насыщения равна 43.8 emu/g, остаточная намагниченность — 27.2 emu/g, а коэрцитивная сила — 336.2 Oe (рис. 4, *b*). С увеличением соотношения f в сторону избытка топлива в реакционном растворе наблюдается уменьшение основных магнитных параметров, что, в первую очередь, связано с увеличением доли аморфной фазы (~ 20 mass%) и появлению примесной фазы оксида цинка.

2.4. Фотокаталитическая характеризация

На рис. 5 представлены спектры поглощения раствора, содержащего органический краситель Родамин Б, после процесса фотодеградации в присутствии синтезированных порошков феррита цинка. Результаты показали, что размер частиц и структурные параметры полученных об-

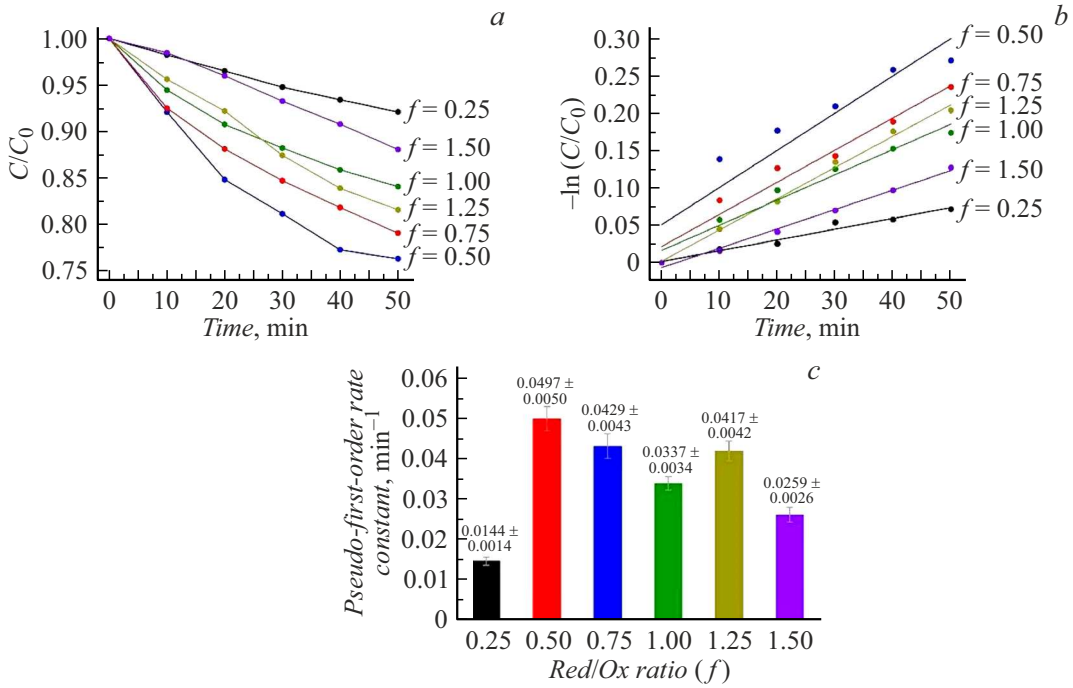

Рис. 6. Кинетические кривые (*a*), логарифмические кинетические зависимости (*b*) и значения константы скорости (*c*) для реакции разложения органического красителя (Родамина Б) в присутствии порошков, содержащих наноразмерные частицы феррита цинка.

разцов существенно влияют на эффективность процесса фотодеградации. Так, несмотря на то что наименьший размер частиц соответствует образцу, полученному при соотношении $f = 0.25$, существенного снижения сигнала поглощения в растворе красителя при 554 nm (что соответствует максимуму поглощения Родамина Б) не наблюдалось. Такая особенность фотокаталитического поведения также связана с фазовым составом данного образца и отсутствием в нем кристаллической фазы феррита-шпинели. Согласно приведенным данным, у образцов феррита цинка, синтезированных при $f = 0.50$, 0.75 и 1.00, наиболее существенное снижение интенсивности пиков поглощения было зафиксировано в начальный период времени обработки (10 min), тогда как образцы, синтезированные при других соотношениях, демонстрировали более плавное снижение интенсивности в ходе всего периода наблюдения. Это связано с особенностями фазового состава образцов, полученных при соотношении окислитель/восстановитель 1.25 и 1.50, в которых присутствует как значимый процент аморфной фазы, так и фаза оксида цинка. Наибольший процент разложения красителя (76.7 %) был зафиксирован в случае присутствия образца, синтезированного при $f = 0.50$, что объясняется малым размером частиц (12.4 nm) и наличием одной фазы феррита цинка. В целом, полученные зависимости (рис. 6) показывают, что ключевыми факторами, влияющими на фотокаталитическую активность, являются размер частиц (и, как следствие, величина удельной площади поверхности образцов) и фазовый состав. Расчет константы скорости показал (рис. 6, *b*), что наибольшие ее значения достигаются для образцов, полученных при $f = 0.5$ (0.0497 ± 0.0050) и 0.75 (0.0429 ± 0.0043), а наименьшие значения наблюдаются для образца, синтезированного при $f = 0.25$ (0.0144 ± 0.0014). Полученные данные хорошо согласуются с данными по среднему размеру кристаллитов и долей кристаллической и аморфной фазы. С этой точки зрения наиболее перспективными выглядят образцы, синтезированные в диапазоне соотношений окислитель/восстановитель от 0.50 до 0.75, так как в них сочетается наличие одной кристаллической фазы феррита цинка, отсутствие примесных фаз оксидов цинка и железа и малый размер частиц.

Выводы

В представленной работе с целью установления влияния соотношения окислителя и восстановителя на морфологию, структуру, магнитные и фотокаталитические свойства были синтезированы нанопорошки феррита цинка методом растворного горения с использованием лимонной кислоты в качестве органического топлива. Было показано, что, в зависимости от выбранного соотношения окислитель/восстановитель f, средний размер частиц феррита цинка варьируется от 5.9 до 30.9 nm. Кроме того, было установлено, что при соотношениях $f = 0.50$, 0.75 и 1.00 формируется образец феррита цинка, содержащий две фазы (аморфную и кристаллическую фазу феррита цинка), тогда как при соотношениях 1.25 и 1.50 наблюдается появление примесной фазы

оксида цинка. Исследование магнитных характеристик продемонстрировало, что в зависимости от условий синтеза возможно получение частиц со значениями намагниченности насыщения, остаточной намагниченности и коэрцитивной силы в диапазонах значений от 0.43 до 43.8 emu/g, от 0.05 до 27.2 emu/g и 12.3 до 336.2 Oe соответственно. Определение фотокаталитической активности синтезированных порошков позволило определить зависимость степени разложения органического красителя от размера частиц и степени кристалличности.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность Инжиниринговому центру Санкт-Петербургского государственного технологического института (технологического университета) за помощь в проведении исследования морфологии и структуры.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.N. Pund, P.A. Nagawade, A.V. Nagawade, S.R. Thopate, A.V. Bagade. Materials Today: Proceed., **60** (3), 2194 (2022). DOI: 10.1016/j.matpr.2022.02.444
[2] M. Sugimoto. J. American Ceramic Society, **82** (2), 269 (1999). DOI: 10.1111/j.1551-2916.1999.tb20058.x
[3] J.B. Franklin, G.T. Anand, G.M. Sujitha, S.J. Sundaram, A.D. Raj, K. Kaviyarasu. Mater. Today: Proceed., **68** (3), 593 (2022). DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.429
[4] J.K. Jogi, S.K. Singhal, R. Jangir, A. Dwivedi, A.R. Tanna, R. Singh, M. Gupta, P.R. Sagdeo. J. Electron. Mater., **51**, 5482 (2022). DOI: 10.1007/s11664-022-09813-2
[5] M. Kacki, M.S. Rylko, J.G. Hayes, C.R. Sullivan. IEEE Transactions on Power Electronics, **37** (12), 15152 (2022). DOI: 10.1109/TPEL.2022.3189671
[6] P. Pengdei, Z. Ning. J. Magn. Magn. Mater., **416**, 256 (2016). DOI: 10.1016/j.jmmm.2016.05.018
[7] S.J. Salih, W.M. Mahmood. Heliyon, **9** (6), E16601 (2023). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16601
[8] K. Wu, J. Li, C. Zhang. Ceramics Intern., **45** (9), 11143 (2019). DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.03.086
[9] P. Sahoo, P. Choudhary, S.S. Laha, A. Dixit, O.T. Mefford. Chem. Commun., **81** (59), 12065 (2023). DOI: 10.1039/D3CC01637D
[10] N. Maji, H.S. Dosanjh. Magnetochemistry, **9** (6), 156 (2023). DOI: 10.3390/magnetochemistry9060156
[11] A. Arimi, L. Megatif, L.I. Granone, R. Dillert, D.W. Bahnemann. J. Photochem. Photobiology A: Chem., **366**, 118 (2018). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2018.03.014
[12] S. Malik, K. Muhammad, Y. Waheed. Molecules, **28** (2), 661 (2023). DOI: 10.3390/molecules28020661
[13] G. Stefanic, S. Krehula, I. Stefanic. Dalton Transactions, **44** (43), 18870 (2015). DOI: 10.1039/C5DT02498F
[14] K.D. Martinson, I.B. Panteleev, K.A. Steshenko, V.I. Popkov. J. European Ceramic Society, **42**, 4363 (2022). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.02.059
[15] S.K. Dutta, M. Akhter, J. Ahmed, M.K. Amin, P.K. Dhar. Biointerface Research Appl. Chemi., **12** (4), 4399 (2022). DOI: 10.33263/BRIAC124.43994416
[16] G.M. Alzoubi. J. Superconductivity Novel Magnetism, **35**, 2417 (2022). DOI: 10.1007/s10948-022-06230-8
[17] F. Iqbal, M.I.A. Mutalib, M.S. Shaharun, M. Khan, B. Abdullah. Procedia Engineer., **148**, 787 (2016). DOI: j.proeng.2016.06.563
[18] Y.B. Kannan, R. Saravanan, N. Srinivasan, K. Praveena, K. Sadhana. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **27**, 12000 (2016). DOI: 10.1007/s10854-016-5347-y
[19] К.Д. Мартинсон, И.А. Черепкова, В.В. Соколов. ФХС, **44** (1), 32 (2018). DOI: 10.1134/S1087659618010091 [K.D. Martinson, I.A. Cherepkova, V.V. Sokolov. Glass Phys. Chem., **44**, 21 (2018). DOI: 10.1134/S1087659618010091]
[20] P.P. Goswami, H.A. Choudhury, S. Chakma, V.S. Moholkar. Industrial Engineering Chem. Research, **52** (50), 17848 (2013). DOI: 10.1021/ie401919x
[21] A. Varma, A.S. Mukasyan, A.S. Rogachev, K.V. Manukyan. Chem. Rev., **116** (23), 14493 (2016). DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00279
[22] E. Novitskaya, J.P. Kelly, S. Bhaduri, O.A. Graeve. Intern. Mater. Rev., **66** (3), 188 (2021). DOI: 10.1080/09506608.2020.1765603
[23] M. Ochmann, V. Vrba, J. Kopp, T. Ingr, O. Malina, L. Machala. Nanomaterials, **12** (17), 2987 (2022). DOI: 10.3390/nano12172987
[24] T.P. Oliveira, G.N. Marques, M.A.M. Castro, R.C.V. Costa, J.H.G. Rangel, S.F. Rodrigues, C.C. Santos, M.M. Oliveira. J. Mater. Res. Technol., **9** (6), 15001 (2020). DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.080
[25] F. Riyanti, W. Purwaningrum, N. Yuliasari, S. Putri, N. Aprianti, P.L. Harianti. Turkish J. Chem., **46**, 1875 (2022). DOI: 10.55730/1300-0527.3487
[26] С.В. Дьяченко, К.Д. Мартинсон, И.А. Черепкова, А.И. Жерновой. ЖПХ, **89** (4), 417 (2016). DOI: 10.1134/S1070427216040029 [S.V. Dyachenko, K.D. Martinson, I.A. Cherepkova, A.I. Zhernovoi. Russ. J. Appl. Chem., **89**, 535 (2016). DOI: 10.1134/S1070427216040029]
[27] K.D. Martinson, I.S. Kondrashkova, M.I. Chebanenko, A.S. Kiselev, T.Yu. Kiseleva, V.I. Popkov. J. Rare Earths, **40** (2), 296 (2022). DOI: 10.1016/j.jre.2021.01.001
[28] R.M. Borade, S.B. Somvanshi, S.B. Kale, R.P. Pawar, K.M. Jadhav. Mater. Res. Express, **7**, 016116 (2020). DOI: 10.1088/2053-1591/ab6c9c
[29] D.A. Vieira, V.C.S. Diniz, D.R. Cornejo, A.C.F.M. Costa, R.H.G.A. Kiminami. Mater. Sci. Forum, **775**, 415 (2014). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.775-776.415
[30] V.I. Popkov, K.D. Martinson, I.S. Kondrashkova, M.O. Enikeeva, V.N. Nevedomskiy, V.V. Panchuk, V.G. Semenov, M.P. Volkov, I.V. Pleshakov. J. Alloys and Compounds, **859**, 157812 (2021). DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.157812
[31] S.O. Aisida, I. Ahmad, T.-K. Zhao, M. Maaza, F.I. Ezema. J. Macromolecular Sci., Part B, **59** (5), 295 (2020). DOI: 10.1080/00222348.2020.1713519