



Конденсированные среды и межфазные границы

Оригинальные статьи

DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3076>

ISSN 1606-867X

Поступила в редакцию 29.09.2020

eISSN 2687-0711

Принята к публикации 15.11.2020

Опубликована онлайн 25.12.2020

УДК 532.135, 537.622, 546.05

Синтез и физико-химические свойства твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$

© 2020 А. С. Корсакова^а, Д. А. Котиков^б, Ю. С. Гайдук^{б,✉}, В. В. Паньков^б

^аНаучно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, ул. Ленинградская, 14, Минск 220006, Республика Беларусь

^бБелорусский государственный университет, просп. Независимости, 4, Минск 220030, Республика Беларусь

Аннотация

Ферритмагнитные наночастицы используются в биотехнологии, например, как носители лекарств и биосенсоры, компоненты диагностических наборов, контрастные агенты для магнитно-резонансной томографии, в катализе, в электронике, при изготовлении магнитных жидкостей, магнитореологических суспензий и других областях техники. Применение магнитных наночастиц требует высоких магнитных характеристик, в частности, больших значений величины намагниченности насыщения.

Цель работы – при комнатной температуре получить однофазные магнитные наночастицы твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$, исследовать зависимость изменения их структуры, морфологии и магнитных свойств от степени замещения для поиска диапазона составов с наибольшим значением намагниченности.

Методом соосаждения из водных растворов солей синтезирована серия порошков Mn-замещенного магнетита $Mn_xFe_{3-x}O_4$ ($x = 0 - 1.8$). С использованием методов магнитного анализа, рентгенофазового анализа, просвечивающей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии исследованы его структурные и микроструктурные особенности, магнитные свойства.

Данные рентгенофазового анализа и инфракрасной спектроскопии подтверждают образование однофазных соединений со структурой кубической шпинели. Максимальный рост намагниченности насыщения по сравнению с незамещенным магнетитом обнаружен для состава $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ ($M_s = 68 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ при 300 К и $M_s = 85 \text{ A}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ при 5 К), что связано с изменением катионного распределения в тетраэдрических и октаэдрических пустотах.

Предложен способ управления магнитными свойствами магнетита путем частичного замещения ионов железа в структуре магнетита марганцем. Установлена возможность влиять на намагниченность и коэрцитивную силу порошков путем изменения степени замещения, при этом максимальная намагниченность соответствует порошку состава $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$. Сравнительно высокие значения удельной намагниченности в сочетании с однородным размером наночастиц, полученным предложенным способом, могут представлять интерес для ряда приложений, в частности, получения магнитореологических жидкостей и формирования магнитоуправляемых капсул с целью адресной доставки лекарств и диагностики заболеваний в биологии и медицине (магнитная резонансная томография).

Ключевые слова: твердый раствор, магнитные наночастицы, шпинель, удельная намагниченность.

Для цитирования: Корсакова А. С., Котиков Д. А., Гайдук Ю. С., Паньков В. В. Синтез и физико-химические свойства твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(4): 466–472. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3076>

For citation: Korsakova A. S., Kotsikau D. A., Haiduk Yu. S., Pankov V. V. Synthesis and physicochemical properties of $Mn_xFe_{3-x}O_4$ solid solutions. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2020;22(4): 466–472. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/3076>

✉ Гайдук Юлиан Станиславович, e-mail: j_hajduk@bk.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

В последние годы получение наноматериалов стало популярной темой многих исследований. Особый интерес представляют магнитные наночастицы (МНЧ) магнетита (Fe_3O_4) и маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) [1]. Они используются в биотехнологии, например, как носители лекарств и биосенсоры, компоненты диагностических наборов, контрастные агенты для магнитно-резонансной томографии, в катализе, в электронике, при изготовлении магнитных жидкостей, магнитореологических суспензий и других областях техники [2, 3]. Известно, что магнитные свойства нанобъектов уступают свойствам объёмных материалов, поэтому их применение требует высоких магнитных характеристик, в частности больших значений величины намагниченности насыщения. Магнетит как раз и является одним из самых лучших наноматериалов для этого. Вместе с тем, существует возможность увеличения намагниченности магнетита за счёт замещения его ионов двухвалентного железа на некоторые ионы переходных металлов. Так, например, ионы двухвалентного марганца обладают магнитным моментом $5\mu\text{B}$ и при замещении ионов двухвалентного железа в магнетите магнитный момент твердого раствора может увеличиваться.

В настоящее время существуют разнообразные методы получения наночастиц [1, 4–9]. Наиболее простым и удобным способом является метод соосаждения, который широко изучен и позволяет проводить синтез в отсутствие нагрева, а также применения инертной атмосферы. Высокая чувствительность метода к различным параметрам (характер осадителя, концентрации реагентов, температура синтеза, pH реакционной среды и т. д.), позволяет варьировать размер и свойства наноматериалов [1]. Кроме того он является экономичным простым и удобным в реализации, обладает большим потенциалом для крупномасштабных производств.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы при комнатной температуре получить однофазные магнитные наночастицы твердых растворов $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$, исследовать зависимость изменения их структуры, морфологии и магнитных свойств от степени замещения для поиска диапазона составов с наибольшим значением намагниченности.

2. Экспериментальная часть

Твердые растворы состава $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x = 0; 0.3; 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 1.4; 1.8$) синтезированы ме-

тодом соосаждения при комнатной температуре из водных растворов неорганических солей соответствующих металлов. Исходные реагенты ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) брали в стехиометрическом соотношении ($\text{Fe}^{3+} : \text{Fe}^{2+} = 2 : 1$ мол). Для части образцов стехиометрическое соотношение катионов Fe^{3+} и Fe^{2+} изменили на 5 % относительно суммарного химического количества катионов Fe^{3+} и Fe^{2+} . В качестве осадителя использовали раствор NaOH , взятый с 10 % избытком по сравнению со стехиометрическим количеством. Избыточное количество NaOH подбирали таким образом, чтобы после сливания растворов значение pH реакционной смеси составляло ~ 11 . С целью возможного использования для получения магнитореологической суспензии образец с $x = 0.3$, обладающий наибольшей удельной намагниченностью насыщения, подвергли термической обработке на воздухе на протяжении 2 ч при 300°C и последующему вибропомолу (30 мин).

Спектры РФА порошков записывали на дифрактометре ДРОН-3.0 ($\text{Co}_{K\alpha}$ -излучение, 1.78897 \AA) в интервале углов $2\theta = 6 - 80^\circ$. Определение фазового состояния вещества проводилось сравнением индивидуальных характеристик рефлексов (углов дифракции и их интенсивности) со справочными данными магнетита Fe_3O_4 (JCPDS 88-0315, $a = 8.3752 \text{ \AA}$), и MnFe_2O_4 (JCPDS 74-2403, $a = 8.511 \text{ \AA}$). Для расчета среднего размера частиц по данным рентгенограмм использовали формулу Шеррера.

Микроструктуру образцов изучали при помощи просвечивающих электронных микроскопов LEO 1420 и HitachiH-800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ.

ИК-спектры образцов записывали на спектрометре AVATAR 330 (ThermoNicolet) в области $\nu = 4000 - 400 \text{ см}^{-1}$. Запись спектров осуществляли методом диффузного отражения с использованием приставки Smart Diffuse Reflectance.

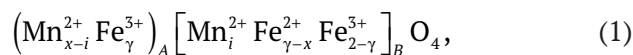
Исследования магнитных характеристик проводилось с помощью Cryogen Free Measurement System Cryogenic Ltd, на котором были записаны петли гистерезиса при 5 и 300 К, $B_{\text{max}} = 8 \text{ Тл}$.

3. Результаты и обсуждение

Шпинельная структура магнетита, легированного марганцем, может быть как кубической так и тетрагональной в зависимости от степени замещения. Незамещенный марганцем магнетит ($x = 0$) относится к кубической сингонии, в то время как Mn_3O_4 – к тетрагональной [10].

При переходе от Fe_3O_4 к Mn_3O_4 изменяется степень обращенности кристаллической структуры: магнетит – обращенная шпинель, тогда как Mn_3O_4 – нормальная шпинель [7].

Предполагают [11], что такой структурный переход вызван изменением распределения катионов по пустотам. Для $Mn_xFe_{3-x}O_4$ в общем виде катионное распределение можно представить следующим образом:



где x – степень замещения в твердом растворе $Mn_xFe_{3-x}O_4$ (суммарное количество ионов Mn^{2+}); i – доля ионов Mn^{2+} в октаэдрических пустотах; γ – степень обращенности кристаллической решетки.

Известно, что стехиометрический феррит марганца $MnFe_2O_4$ имеет $\gamma = 0.2$, где 80 % ионов Mn^{2+} располагаются в тетраэдрических позициях [11].

Рентгенограммы порошкообразных твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$, представленные на рис. 1, имеют схожий вид и содержат широкие рефлексы. Все синтезированные составы $Mn_xFe_{3-x}O_4$ имеют структуру кубической шпинели, что характерно для индивидуального магнетита. На-

личие широких рефлексов дифракционных отражений может быть обусловлено низкой степенью кристалличности структуры. Для $Mn_xFe_{3-x}O_4$ с $x = 1.0$ методика синтеза была изменена (стехиометрическое соотношение катионов Fe^{3+} и Fe^{2+} изменили на 5 %) во избежание образования фазы $\alpha-Fe_2O_3$ в образцах с высоким содержанием марганца ($x > 1.0$).

На рентгенограмме образца с $x > 1.8$ несмотря на малую интенсивность рефлексов, был зафиксирован рефлекс при $2\theta = 41.2$, который, предположительно, соответствует дифракционному отражению для шпинели с индексом (311) максимальной интенсивности. Рентгеноаморфное состояние для этого состава может указывать на сильное искажение кристаллической решетки шпинели из-за большого количества ионов марганца [12], то есть на постепенный структурный переход кубической шпинели. Установлено, что с увеличением степени замещения предсказуемо линейно возрастает как значение параметра элементарной ячейки, так и её объем. Поскольку ионный радиус Mn^{2+} превышает ионные радиусы как Fe^{2+} , так и Fe^{3+} вне зависимости от координационного окружения, то введение в кристаллическую решетку ионов

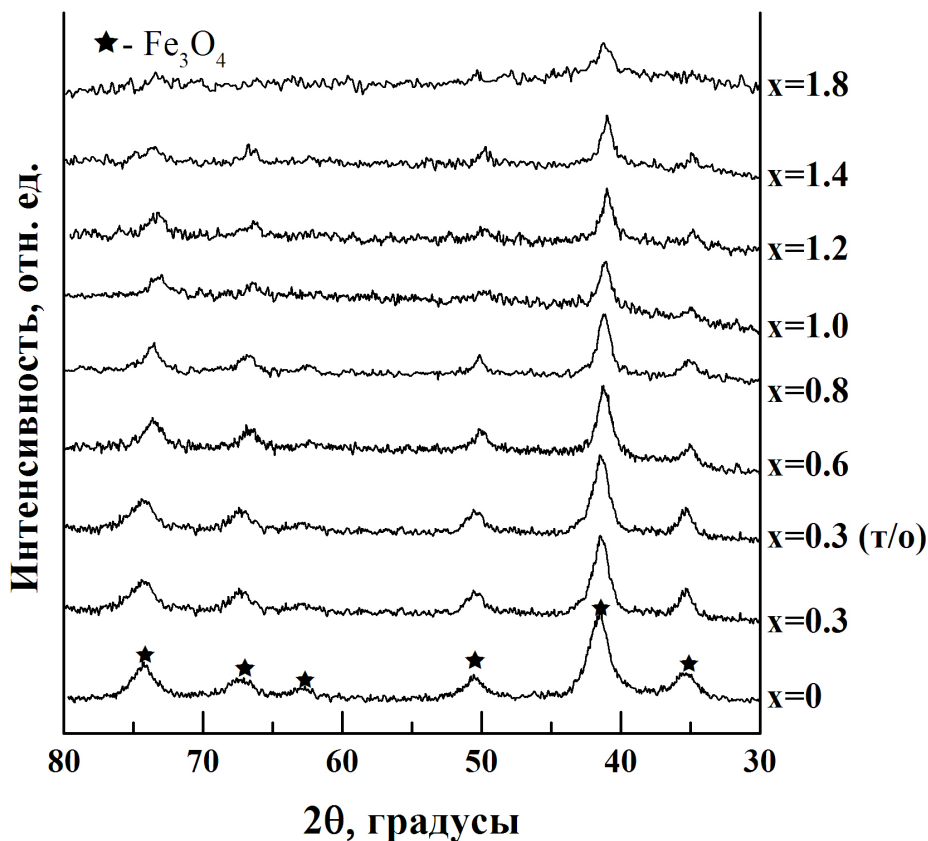


Рис. 1. Спектры РФА порошков $Mn_xFe_{3-x}O_4$ ($0 < x < 1.8$)

марганца неизбежно приводит к увеличению параметра и объема элементарной кристаллической решетки. По этой же причине рефлексы с соответствующими индексами Миллера смещаются в область меньших углов при увеличении количества марганца в образце.

Расчитанные значения постоянной решетки порошков с большим содержанием марганца меньше литературных данных. Расхождение в результатах может быть обусловлено тем, что на стадии роста наночастиц в щелочной среде в присутствии кислорода воздуха старение магнетита Fe_3O_4 до маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с меньшим значением постоянной решетки (JCPDS 39-1346, $a = 8.3515 \text{ \AA}$) протекает довольно легко [13, 14].

Средний размер кристаллитов с увеличением степени замещения возрастает немонотонно. Такое отличие в размерах может свидетельствовать о разной скорости протекания гидролиза $\text{Mn}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и их сильной конкуренции во время образования наночастиц различного состава.

Плотность дислокаций и количество микронапряжений в твердых растворах уменьшается схоже и немонотонно. Известно, что микронапряжения играют ключевую роль в росте кристаллов. Они предотвращают процесс роста кристаллов, тем самым влияют на размер образующихся частиц [15]. Если сравнить кривые изменения размера частиц и микронапряжений, то можно заметить, что они являются зеркальным отражением друг друга.

На рис. 2 представлены ПЭМ-микротографии ряда полученных методом соосаждения образцов. Во всех случаях формировались наноразмерные частицы близкой к сферической форме. Средний размер частиц для состава $\text{Mn}_{0.3}\text{Fe}_{2.7}\text{O}_4$ составил 9 нм, для $\text{Mn}_{0.8}\text{Fe}_{2.2}\text{O}_4$ –

11 нм, для MnFe_2O_4 – 15 нм. Полученные результаты хорошо согласуются со средними размерами кристаллитов, рассчитанными по рентгенограммам соответствующих образцов. С увеличением содержания марганца в твердом растворе $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ диаметр наночастиц растет. В случае образца, обожженного при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2в), явно наблюдается появление огранки у наночастиц с увеличением их кристалличности при сохранении приблизительно тех же размеров, что и у не обожженных частиц.

Для шпинельных структур характеристические линии ИК-спектров, свидетельствующие о наличии структурных изменений, относятся к колебаниям связей М–О и М–О–Н. Изменение ионного окружения Fe^{3+} путем введения в кристаллическую решетку магнетита двухзарядных ионов с большими радиусами приводит к искажению симметрии координационного окружения Fe^{3+} или изменению силовой постоянной связи Fe–O. Поэтому на ИК-спектрах (рис. 3) можно наблюдать расщепление или искажение формы линий характеристических колебаний связи Fe–O. В случае равномерного распределения ионов марганца и железа в кристаллической решетке шпинели, как правило, наблюдается только смещение максимумов полос поглощения характеристических колебаний, а появление дополнительных пиков указывает на присутствие другой фазы.

Данные ИК-спектроскопии, представленные на рис. 3, подтверждают формирование шпинельной структуры для всех составов.

Характеристические частоты ν_1 ($\approx 560 \text{ см}^{-1}$) и ν_2 ($\approx 430 \text{ см}^{-1}$), относящиеся к валентным колебаниям Me–O в тетраэдрических и октаэдрических пустотах, смешаются в область меньших частот при введении катионов Mn^{2+} . Это обусловлено наличием комбинированных полос колебаний

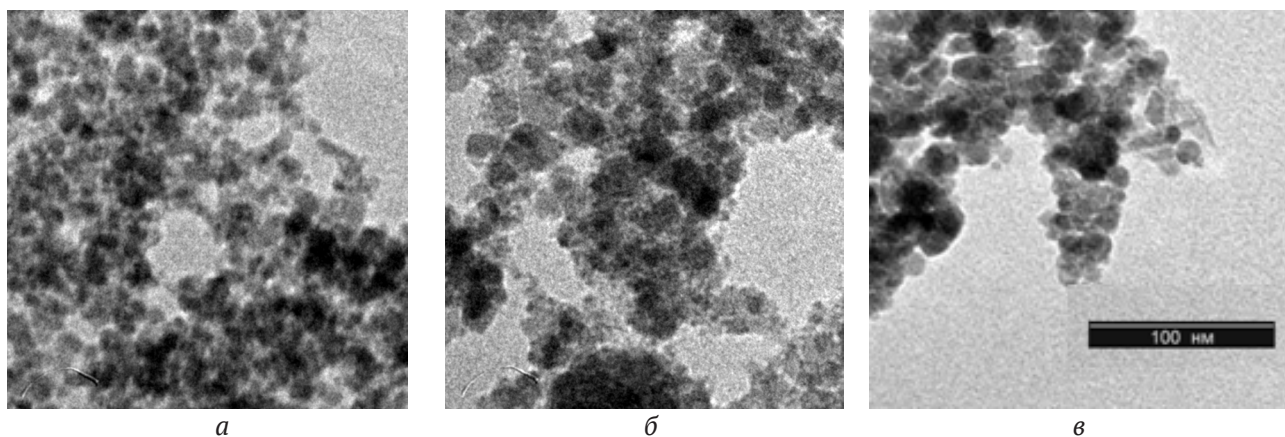


Рис. 2. ПЭМ-снимки порошка $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$: а) $x = 0.3$; б) $x = 1.0$; в) $x = 0.3$ (отжиг $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 ч)

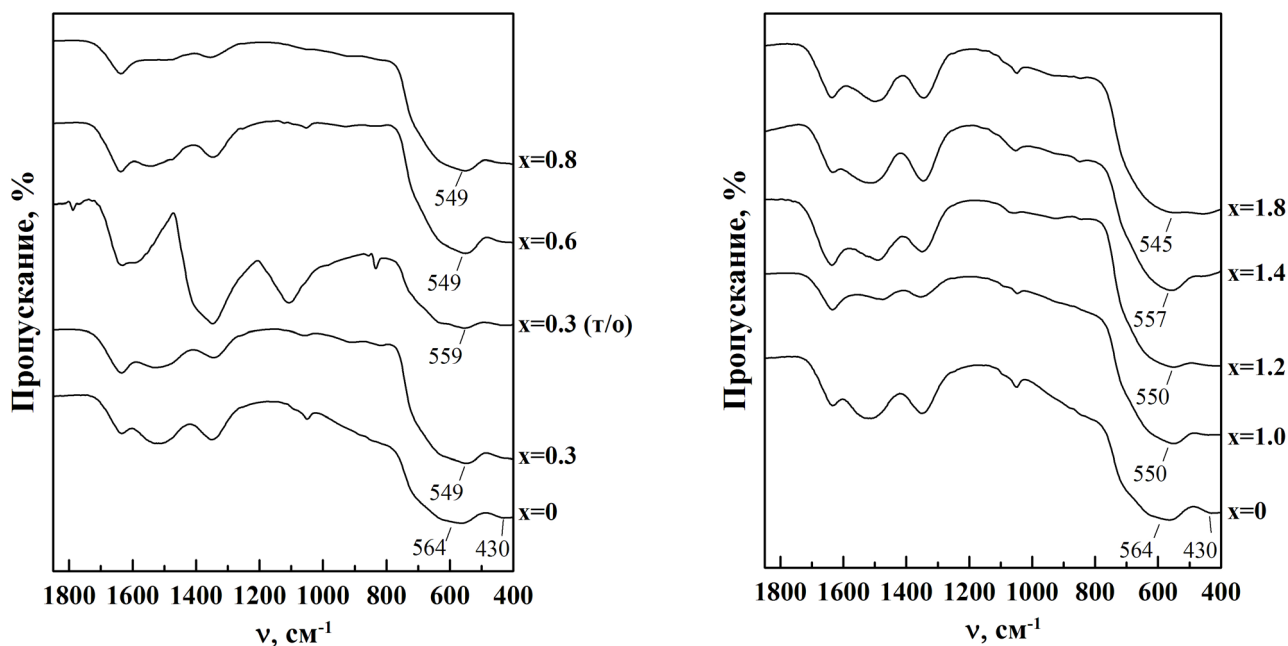


Рис. 3. Фрагменты ИК-спектров твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$ ($0 < x < 1.8$), т/о – порошок после отжига 300 °С, 2 ч

валентных связей Fe–O в октаэдрических позициях с ионами Mn^{2+} в ближайшем координационном окружении: Fe–O–Mn, что приводит к увеличению длины связи ($l_{Mn-O} > l_{Fe-O}$) и изменению величины силовой постоянной.

Для образцов с большим содержанием марганца ($x > 1.2$), а также у образца с $x = 0.3$ (т/о) обнаружена полоса при 848.57 cm^{-1} низкой интенсивности, характерная для индивидуально оксида $\alpha-Fe_2O_3$, фаза которого для этих образцов не была идентифицирована методом РФА.

Магнитные свойства наночастиц $Mn_xFe_{3-x}O_4$ проанализированы на основе экспериментальных данных об их удельной намагнитченности и коэрцитивной силе в диапазоне температур от 5 до 300 К. Отметим, что кривые намагничивания и размагничивания при комнатной температуре практически совпадают, что свидетельствует об отсутствии гистерезиса и коэрцитивной силы, а также указывает на суперпарамагнитное состояние наночастиц (рис. 4а). В тоже время образец $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ специально обожженный при 300 °С

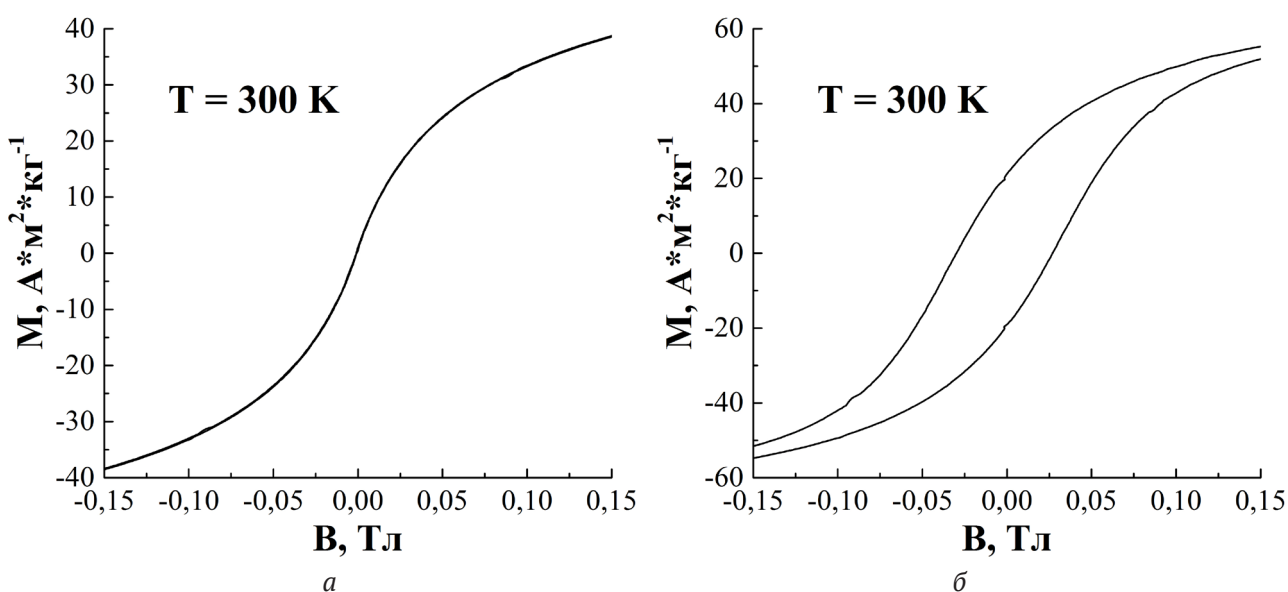


Рис. 4. Кривые удельной намагнитченности насыщения образца $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ при 300 К (а) и образца $Mn_{0.3}Fe_{2.7}O_4$ (обжиг 300 °С, 2 ч) при 300 К (б)

в течение 2 ч имеет коэрцитивную силу ~ 120 Ое (рис. 4б). Таким образом, термообработка приводит к дальнейшему развитию процесса кристаллизации и увеличению константы анизотропии.

Магнитные свойства твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$ напрямую связаны с распределением катионов в шпинельной структуре [7]. Это распределение носит смешанный характер, то есть ионы марганца располагаются и в тетра- и в октаэдрических пустотах кристаллической решетки. Например, для феррита марганца оно будет $(Mn_{0,8}Fe_{0,2})[Mn_{0,2}Fe_{1,8}]O_4$.

Установлено, что изменение намагниченности насыщения с увеличением содержания марганца в $Mn_xFe_{3-x}O_4$ носит нелинейный характер. Намагниченность вначале растет с увеличением доли марганца в твердом растворе, достигает максимума для состава $Mn_{0,3}Fe_{2,7}O_4$ и снова уменьшается (рис. 5).

Такая зависимость обусловлена тем, что величина магнитного момента для иона Mn^{2+} (5 μB) с пятью неспаренными электронами больше, чем аналогичная величина для иона Fe^{2+} (4 μB). Поэтому при замещении в октаэдрической подрешетке ионов Fe^{2+} на Mn^{2+} должно происходить увеличение намагниченности. При этом намагниченность насыщения будет определяться, главным образом, сверхобменным взаимодействием ионов в А и В подрешетках и описываться формулой:

$$\mu_{теор} = \mu_B - \mu_A, \quad 2$$

где μ_A и μ_B – магнитные моменты катионов находящихся в А- и В-пустотах соответственно.

При дальнейшем увеличении количества ионов марганца в $Mn_xFe_{3-x}O_4$, к тому же при их окислении до Mn^{3+} , последние начнут активно занимать В-пустоты в кристаллической решетке. И так как $Fe^{3+} = (5 \mu B)$, а $Mn^{3+} = (4 \mu B)$ сверхобменное взаимодействие ионов в А и В подрешетках ослабнет, что, в свою очередь, приводит к уменьшению величины намагниченности насыщения $Mn_xFe_{3-x}O_4$.

4. Выводы

Таким образом, в ходе проведенного исследования разработаны условия синтеза, позволяющие получать однофазные наночастицы магнетита, легированного марганцем, при комнатной температуре и атмосферном давлении. Концентрационные пределы, в которых твердые растворы оксидов железа и марганца имеют структуру кубической шпинели лежат в диапазоне $0 < x < 1,8$.

Установлено, что изменение намагниченности насыщения с увеличением содержания

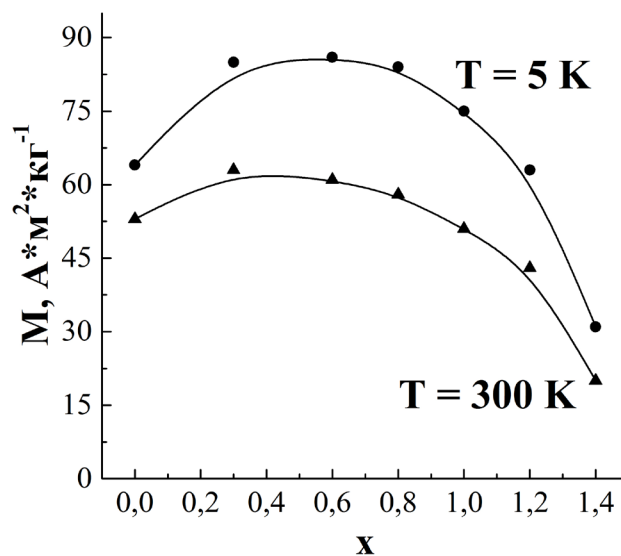


Рис. 5. Удельная намагниченность твердых растворов $Mn_xFe_{3-x}O_4$ в зависимости от состава

оксида марганца в твердом растворе носит нелинейный характер с максимальным значением намагниченности насыщения ($68 \text{ А}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ при 300 К и $85 \text{ А}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$ при 5 К) для состава $Mn_{0,3}Fe_{2,7}O_4$. Минимальный размер частиц (9 нм) характерен для состава $Mn_{0,3}Fe_{2,7}O_4$.

Разработанные частицы перспективны для контрастных агентов в МРТ диагностике и компонентов магнитореологических жидкостей, а также для получения магнитореологических жидкостей и формирования магнитоуправляемых капсул с целью адресной доставки лекарств.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Губин С. Г., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б., Юрков Г. Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства. *Успехи химии*. 2005;74(6): 539–574. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9085819>
2. Skumryev V., Stoyanov S., Zhang Y., Hadjipanayis G., Givord D., Nogués J. Beating the superparamagnetic limit with exchange bias. *Nature*. 2003;423(6943): 850–853. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature01687>
3. Joseph A., Mathew S. Ferrofluids: synthetic strategies, stabilization, physicochemical features, characterization, and applications. *ChemPlusChem*. 2014;79(10): 1382–1420. DOI: <https://doi.org/10.1002/cplu.201402202>

4. Mathew D. S., Juang R.-S. An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions. *Chemical Engineering Journal*. 2007;129(1–3): 51–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.11.001>
5. Rewatkar K. G. Magnetic nanoparticles: synthesis and properties. *Solid State Phenomena*. 2016;241: 177–201. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.241.177>
6. Tartaj P., Morales M. P., Veintemillas-Verdaguer S., Gonzalez-Carreño T., Serna C. J. The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2003;36(13): 182–197. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/13/202>
7. Вест А. *Химия твердого тела. Теория и приложения*: В 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 558 с.
8. *Справочник химика: В 6 т. 2-е изд. Общие сведения. Строение вещества. Свойства важнейших веществ. Лабораторная техника* / [Гл. ред. Б. П. Никольский]. М. – Л.: Госхимиздат; 1963. Т. 1. 1071 с.
9. Журавлев Г. И. *Химия и технология ферритов*. Л.: Химия; 1970. с. 192.
10. Mason V. Mineralogical aspects of the system $FeO-Fe_2O_3-MnO-Mn_2O_3$. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*. 1943;65(2): 97–180. DOI: <https://doi.org/10.1080/11035894309447142>
11. Guillemet-Fritsch S., Navrotsky A., Tailhades Ph., Coradin H., Wang M. Thermochemistry of iron manganese oxide spinels. *Journal of Solid State Chemistry*. 2005;178(1):106–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2004.10.031>
12. Ortega D. Structure and magnetism in magnetic nanoparticles. In: *Magnetic Nanoparticles: From Fabrication to Clinical Applications*. Boca Raton: CRC Press; 2012. p. 3–72. DOI: <https://doi.org/10.1201/b11760-3>
13. Kodama T., Ookubo M., Miura S., Kitayama Y. Synthesis and characterization of ultrafine Mn(II)-bearing ferrite of type $Mn_xFe_{3-x}O_4$ by coprecipitation. *Materials Research Bulletin*. 1996;31(12): 1501–1512. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0025-5408\(96\)00146-8](https://doi.org/10.1016/s0025-5408(96)00146-8)
14. Al-Rashdi K. S., Widatallah H., Al Ma'Mari F., Cespedes O., Elzain M., Al-Rawas A., Gismelseed A., Yousif A. Structural and mossbauer studies of nanocrystalline Mn^{2+} doped Fe_3O_4 particles. *Hyperfine Interact.* 2018;239(1): 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10751-017-1476-9>
15. Modaresi N., Afzalzadeh R., Aslibeiki B., Kameli P. Competition between the Impact of cation distribution and crystallite size on properties of $Mn_xFe_{3-x}O_4$ nanoparticles synthesized at room temperature. *Ceramics International*. 2017;43(17): 15381–15391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.079>

Информация об авторах

Корсакова Алина Сергеевна, стажёр, м. н. с., Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь; e-mail: korsakova@bsu.by. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8898-4726>.

Котиков Дмитрий Анатольевич, к. х. н., доцент, доцент Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь; e-mail: kot-sikau@bsu.by. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3318-7620>.

Гайдук Юлиан Станиславович, н. с., Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь; e-mail: j_hajduk@bk.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2737-0434>.

Паньков Владимир Васильевич, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой физической химии Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь; e-mail: pankov@bsu.by. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5478-0194>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.