

П.П. Горбик, І.В. Дубровін, М.В. Абрамов

СИНТЕЗ І МАГНІТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИНОК ЗАЛІЗО-ІТРІЄВОГО ГРАНАТУ

Інститут хімії поверхні ім. О.О. Чуйка Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова, 17, Київ, 03164, Україна, E-mail: dilvua@gmail.com

Метод хімічного осадження при синтезі нанокристалів привернув до себе увагу завдяки низькій температурі і високій однорідності частинок за розмірами.

Метою цієї роботи є пошук і створення високоєфективної енергозберігаючої методики синтезу нанокристалів $Y_3Fe_5O_{12}$ методом хімічного осадження з використанням НВЧ випромінювання, дослідження морфології кристалів і магнітних властивостей.

Наночастинки $Y_3Fe_5O_{12}$ синтезували методом спільного осадження гідроксидів ітрію і заліза(III). Для ініціювання хімічних реакцій, управління зародкоутворенням і формуванням нових фаз використовували вплив мікрохвильового електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону на водні розчини прекурсорів. Потужність мікрохвильового випромінювання варіювали від 0.14 до 1.4 кВт, змінюючи шпаруватість процесу. Частота випромінювання – 2.45 ГГц, час проведення процесу - від 6 до 66 хв. Нанокристали $Y_3Fe_5O_{12}$ отримували відпалюванням осаду в муфельній печі. Значна частка частинок, отриманих при мікрохвильовій обробці прекурсора (осаду) в НВЧ печі, мала сферичну форму. Середній діаметр отриманих після синтезу наночастинок $Y_3Fe_5O_{12}$ становив ~ 41 нм. Петлі гістерезису магнітного моменту зразків вимірювали з допомогою лабораторного вібраційного магнітометра фонерівського типу при кімнатній температурі. Встановлено з використанням рентгенофазового аналізу, растрової електронної мікроскопії та аналізу питомої поверхні фазовий склад, структуру і морфологію магнітних наночастинок. Показано, що коригування їх розміру може бути ефективно здійснено за допомогою гідротермальної рекристалізації. Виявлено, що шляхом зміни тривалості мікрохвильових і/або термічної обробки можна отримати нанодисперсний матеріал із заданими (в певних межах) значеннями намагніченості насичення і коерцитивної сили. Високі для наночастинок значення питомої намагніченості насичення дають можливість застосувати ці матеріали в медицині як магнітний носій лікарських препаратів або для використання при магнітній гіпертермії.

Ключові слова: методика Ельмора, гідротермальна рекристалізація, ітрії – залізний ферит, петля гістерезису, намагніченість насичення, коерцитивна сила, фазовий склад, структура, морфологія, НВЧ випромінювання

ВСТУП

Одним з провідних напрямків в сучасному матеріалознавстві став синтез функціональних наноматеріалів із заданими властивостями. Останнім часом значний інтерес у дослідників викликає залізо-ітрієвий гранат (ЗІГ) зі структурою $Y_3Fe_5O_{12}$. Цей феримагнетик широко використовується як магнітний матеріал в радіотехніці, електроніці, автоматиці, обчислювальній техніці. Створено надвисокочастотні (НВЧ) пристрої (циркулятори, фазообертачі), що працюють не тільки на безперервному підмагнічуванні, але і на залишковій намагніченості фериту – так звані прилади з магнітною пам'яттю. Добротність феритових резонаторів на монокристалах ЗІГ має

рекордно вузьку лінію поглинання феромагнітного резонансу і становить 10^3 і більше. Такі резонатори використовуються для швидкої електронної перебудови НВЧ генераторів на транзисторах і діодах Ганна, що працюють за частот від одиниць до десятків гігагерц.

Отримання кераміки з високою густиною, порошку, півок на основі ЗІГ являє собою складну проблему у зв'язку з труднощами формування однорідної структури, що складається з кристалів з невеликою дисперсією розмірів [1, 2]. Традиційні методи твердофазного спікання матеріалу з ЗІГ вимагають високих температур порядку 1600–1800 °С і витримки протягом декількох десятків годин в умовах високого вакууму. При

цьому утворюються частинки великого розміру і обмеженим ступенем однорідності [3].

Так, автори [4] отримали порошки $Y_3Fe_5O_{12}$ після відпалу при $1300\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 8 год з розмірами частинок 2–10 мкм. Синтез з розплаву також утруднений у зв'язку з тим, що його утворення відбувається при високій температурі за перитектичною реакцією [5].

В останні роки метод хімічного осадження при синтезі нанокристалів привернув до себе увагу завдяки низькій температурі і високій однорідності частинок за розмірами [6].

З використанням технології золь-гель за участю автогоріння синтезовано і досліджено феритові нанокристалічні матеріали зі структурою шпінелі [7–11]. Даний метод дозволяє точно керувати хімічним складом феритових порошоків, є низькотемпературним і економічно вигідним. Встановлено фізико-хімічні процеси і механізми горіння, які відбуваються при синтезі феритів за допомогою даної технології. Виявлено, що структурні зміни ксерогелю, який сформувався з нітратів металів і лимонної кислоти, відбуваються при 483 K завдяки наявності карбоксильної групи і іонів NO_3^- , які взаємодіють при автогорінні.

Використання мікрохвильового випромінювання для синтезу і термічної обробки різних речовин і матеріалів у багатьох випадках дозволяє значно скоротити

тривалість процесу в порівнянні з традиційними методами нагрівання, а також домогтися формування контрольованої мікроструктури і функціональних властивостей синтезованих матеріалів [12]. З'ясовано, що значення швидкостей деяких реакцій в умовах впливу НВЧ-поля зростають приблизно в 20–30 разів і більше [13]. Багато неорганічних речовин (оксиди, сульфід, карбіди, деякі солі, що містять кисень) здатні інтенсивно поглинати НВЧ випромінювання і при цьому зі швидкістю понад 100 град/хв розігріватися до температури $1000\text{ }^\circ\text{C}$ і вище. Це явище використовують при синтезі різних неорганічних матеріалів. Застосовують НВЧ обробку для ініціювання хімічних реакцій, прискорення процесів подальшої сушки матеріалу, для інтенсифікації термохімічного синтезу і формування нових фаз. НВЧ випромінювання застосовують також при створенні органо-неорганічних біосумісних нанокompatитів, що вживаються для спрямованого транспорту ліків до пухлинних клітин [14].

Метою цієї роботи є пошук і створення високоєфективної енергозберігаючої методики синтезу нанокристалів $Y_3Fe_5O_{12}$ методом хімічного осадження з використанням НВЧ випромінювання, дослідження їх кристалічної структури, морфології поверхні і магнітних властивостей.

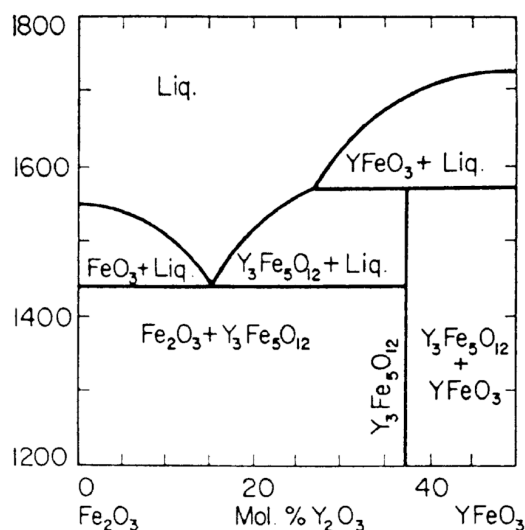


Рис. 1. Квазібінарний розріз фазової діаграми $Fe_2O_3 - YFeO_3$

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Наночастинки $Y_3Fe_5O_{12}$ синтезували методом спільного осадження гідроксидів ітрію і заліза(III) в киплячій воді.

Як прекурсори використовували водні розчини солей нітрату ітрію «хч» і нітрату заліза(III) «хч», взяті в необхідних співвідношеннях, і водний розчин амоніаку. Розчини солей змішували безпосередньо перед осадженням і нагрівали до температури кипіння в мікрохвильовій печі. До киплячої води додавали при перемішуванні водний розчин, що містив 0.3 М $Y(NO_3)_3$ і 0.5 М $Fe(NO_3)_3$.

Для ініціювання хімічних реакцій у водних розчинах прекурсорів [15], управління зародкоутворенням і формування нових фаз використовували мікрохвильове електромагнітне НВЧ випромінювання. Потужність НВЧ випромінювання варіювали від 0.14 до 1.4 кВт, змінюючи прогальність (відношення періоду повторення до ефективної тривалості імпульсу) процесу. Частота випромінювання складала 2.45 ГГц, час проведення процесу – від 6 до 66 хв.

Отриманий розчин охолоджували до кімнатної температури, потім до нього повільно додавали водний розчин амоніаку в кількості, необхідній для повного осадження катіонів Y^{3+} і Fe^{3+} . Введення амоніаку здійснювали по краплях з постійним перемішуванням магнітною мішалкою і нагріванням зі швидкістю $2 \cdot 10^3$ об/хв. Значення рН реакції підтримували на рівні 8÷12. Після введення амоніаку перемішування продовжували ще 15 хв, потім осад фільтрували, промивали і висушували при кімнатній температурі до постійної маси.

Нанокристали $Y_3Fe_5O_{12}$ отримували відпалюванням отриманого осаду в муфельній печі. Фазовий склад зразків визначали методом рентгенофазового аналізу (дифрактометр ДРОН-4, CuK_α -випромінювання). Структурні характеристики кристалів визначали з даних рентгенівської дифракції та просвічуючого електронного мікроскопа JEM100CX-II.

Петлі гістерезису магнітного моменту зразків вимірювали за допомогою лабораторного вібраційного магнітометра фонерівського типу при кімнатній

температурі. Опис установки і методика вимірювань викладені в [14]. Зразками для досліджень слугували розмагнічені нанокристали $Y_3Fe_5O_{12}$, які, для запобігання диполь-диполь взаємодії, були розподілені в матриці з парафіну з об'ємною концентрацією ~ 0.05 . Для порівняння використовували матеріали з відомим значенням питомої намагніченості насичення (σ_s): тестований зразок нікелю і наночастинки Fe_3O_4 (98 %) виробництва фірми «Nanostructured & Amorphous Materials Inc.», USA. Похибка вимірювання σ_s по відношенню до еталонного зразку не перевищувала 2.5 %. Питома площа поверхні порошоків вимірювалися за допомогою аналізатора з використанням методу багатоточкової адсорбції БЕТ. Середній розмір частинок оцінювали за формулою $D_0 = 6/(\rho S_{BET})$, де ρ – густина матеріалу наночастинки.

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

З отриманого після синтезу залишку готували дисперсії в ацетоні, які використовували для визначення розміру і форми частинок за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа. Середня питома площа поверхні зразків становила $S_{BET}/(m^2/g) = 99.0$.

Значна кількість частинок, отриманих при мікрохвильовій обробці прекурсора (осаду), мала сферичну форму. Середній діаметр отриманих після синтезу наночастинок $Y_3Fe_5O_{12}$ становив ~ 41 нм.

З даних рентгенофазового аналізу зразків, отриманих спіканням порошоків (рис. 3), випливає, що фазоутворення завершується при $800^\circ C$ протягом 4 год. При цій тривалості відпалу на дифрактограмі відсутні сліди найбільш інтенсивних рефлексів вихідних компонентів, встановлена тільки одна фаза, відповідна $Y_3Fe_5O_{12}$ (рис. 3). Така відносно низька температура формування фази ЗІГ, очевидно, може бути отримана при дифузійній взаємодії нанорозмірних частинок, отриманих методом хімічного осадження з використанням СВЧ випромінювання.

Середній діаметр нанокристалітів $Y_3Fe_5O_{12}$, оцінений з дифракційних ліній на рентгенограмі, становить 38.1 нм.

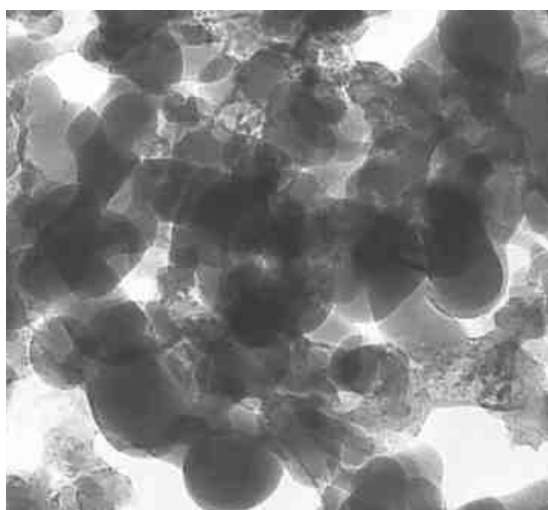


Рис. 2. Морфологія нанорозмірних частинок $Y_3Fe_5O_{12}$

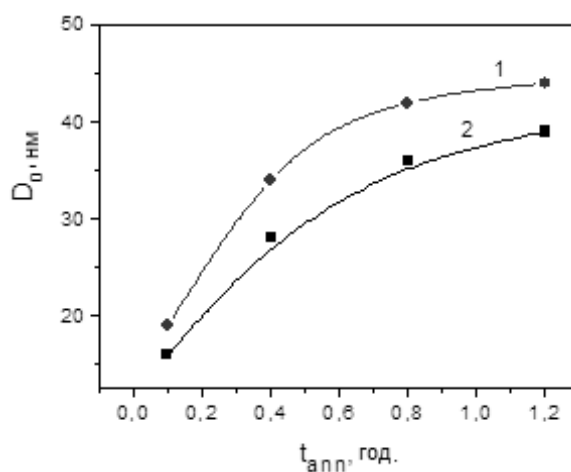


Рис. 3. Залежність середнього розміру НЧ (D_0) від часу термічної (1) і мікрохвильової (2) обробки

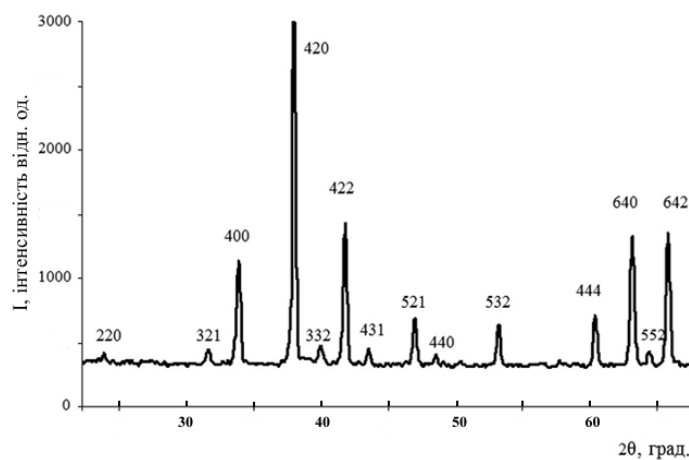


Рис. 4. Рентгенівська дифрактограма порошоків $Y_3Fe_5O_{12}$, що отримані методом хімічного осадження (температура відпалу 800 °С; 4 год)

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ
ОДНОДОМЕННИХ КРИСТАЛІЧНИХ
ЧАСТИНОК СКЛАДУ $Y_3Fe_5O_{12}$

Ферити – гранати мають загальну формулу $M_3Fe_5O_{12}$, де М – тривалентний іон Y^{3+} , Gd^{3+} , Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} , Lu^{3+} , Yb^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} кристалізуються в структурі, ізоморфній структурі мінералу гранату $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$. Просторова група феритів-гранатів O_h^{10} - $Ia3d$. Елементарна комірка має розміри $\sim 12 \text{ \AA}$ і

містить 8 формульних одиниць (160 атомів): 96 – O^{2-} , 40 – Fe^{3+} і 24 – M^{3+} . Катіони розташовані в трьох положеннях – в тетраедрах (24d), октаедрах (16a) і додекаедрах (24c), утворених іонами кисню. Тетраедричні і октаедричні положення зайняті іонами Fe^{3+} , а додекаедричні – іонами M^{3+} . Таким чином, розподіл катіонів в структурі $Y_3Fe_5O_{12}$ записується в такий спосіб:



Обмінна взаємодія найбільш сильна між тетраедричними і октаедричними іонами заліза, тобто в ланцюжку $(Fe) - O - [Fe]$, де кут зв'язку $\sim 127^\circ$. Ця взаємодія від'ємна і набагато сильніша, ніж усередині тетраедричної і октаедричної підґраток, тому намагніченості цих підґраток антипаралельні. З трьох обмінних зв'язків через іони кисню у катіонів, які знаходяться в додекаедрах $\{Y\} - O - (Fe)$, $\{Y\} - O - [Fe]$ і

$\{Y\} - O - \{M\}$, найбільш сильним є перший, тобто з тетраедричними іонами заліза, при цьому ця взаємодія від'ємна і значно слабкіша, ніж між залізними підґратками.

Петлі гістерезису зразків $Y_3Fe_5O_{12}$ після мікрохвильової обробки тривалістю 1.2, 0.8 і 0.4 год представлені на рис. 5.

Магнітні характеристики зразків $Y_3Fe_5O_{12}$ після мікрохвильової обробки тривалістю від 0.4 до 1.2 год наведено у таблиці.

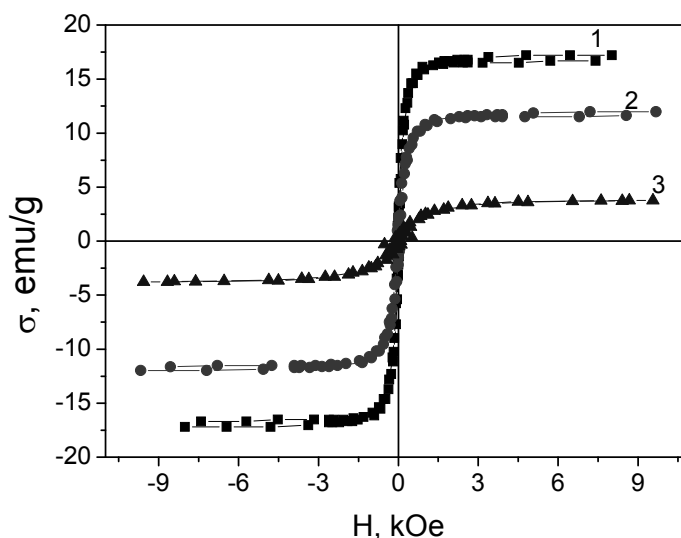


Рис. 5. Петлі гістерезису зразків $Y_3Fe_5O_{12}$ після мікрохвильової обробки тривалістю 1.2 (1), 0.8 (2) і 0.4 (3) год

Питому намагніченість насичення σ_s зразків знаходили із залежності $\sigma(H^{-1})$ при $H \rightarrow \infty$. Із збільшенням тривалості мікрохвильової обробки σ_s монотонно збільшується від 3.5 при $t_{ann} = 0.4$ год до 17.5 Гс cm^3/g при $t_{ann} = 1.2$ год за рахунок

збільшення середнього розміру НЧ (рис. 3). Коерцитивна сила НЧ H_c із збільшенням тривалості мікрохвильової обробки монотонно зменшується за абсолютною величиною від -86.0 Е при $t_{ann} = 0.4$ год до -17.5 Е при $t_{ann} = 1.2$ год. Залишкова питома

намагніченість і відносна залишкова питома намагніченість монотонно зменшуються від 4.9 до 0.6 і від 0.28 до 0.17 Гс·см³/г відповідно. Користуючись тим, що магнітні характеристики зразків, наприклад σ_s , поступово змінюються залежно від складу, існує можливість виготовлення матеріалу з

необхідними магнітними властивостями. Високі для наночастинок значення питомої намагніченості насичення дають можливість застосувати ці матеріали в медицині як магнітні носії лікарських препаратів або при магнітній гіпертермії.

Таблиця. Магнітні характеристики зразків системи $Y_3Fe_5O_{12}$: H_c – коерцитивна сила, $\sigma(8.5 \text{ кЕ})$ – питома намагніченість при напруженості магнітного поля $\sim 8.5 \text{ кЕ}$, $\sigma_r(8.5 \text{ кЕ})$ – залишкова питома намагніченість після поля $\sim 8.5 \text{ кЕ}$, $\sigma_r(8.5 \text{ кЕ})/\sigma(8.5 \text{ кЕ})$ – відносна залишкова питома намагніченість

| № зразка | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------|-------|-------|
| $t_{\text{анн}}$, години | 0.4 | 0.8 | 1.2 |
| H_c , Е | -86.0 | -25.8 | -17.5 |
| σ_s , Гс·см ³ /г (emu/g) | 3.8 ± 2.5 % | 13.4 | 18.9 |
| $\sigma(8.5 \text{ кЕ})$, Гс·см ³ /г | 3.5 ± 2.5 % | 12.4 | 17.5 |
| $\sigma_r(8.5 \text{ кЕ})$, Гс·см ³ /г | 0.6 ± 2.5 % | 2.5 | 4.9 |
| $\sigma_r(8.5 \text{ кЕ})/\sigma(8.5 \text{ кЕ})$ | 0.17 ± 5 % | 0.2 | 0.28 |

ВИСНОВКИ

Методом хімічного осадження з додатковою мікрохвильовою і термічною обробками суміші прекурсорів отримані нанокристалічні порошки $Y_3Fe_5O_{12}$. Визначено технологічні параметри одержання однофазного матеріалу із середнім заданим розміром частинок порядку 38.1–41.0 нм. Значна частка частинок мала сферичну форму. НЧ для запобігання диполь-дипольної взаємодії були розподілені в матриці з парафіну з об'ємною концентрацією

~ 0.05 . На зразках, відпалених при 800 °С протягом 1.2 год, отримані значення $\sigma_s = 8.9 \pm 2.5 \% \text{ emu/g}$ і $H_c = 22 \text{ Ое}$. Питома намагніченість насичення синтезованих нанокристалів становить $\sim 70 \%$ від відповідної величини порошоків $Y_3Fe_5O_{12}$ з розміром кристалів 2–10 мкм, отриманих твердофазним способом (26.52 Гс см³/г) [4]. Зниження питомої намагніченості насичення порошоків, отриманих методом хімічного осадження, очевидно, пов'язано зі зменшенням розміру частинок.

Синтез и магнитные характеристики наночастиц железно-иттриевого граната

П.П. Горбик, И.В. Дубровин, Н.В. Абрамов

Институт химии поверхности им. А.А. Чуйко Национальной академии наук Украины
ул. Генерала Наумова, 17, Киев, 03164, Украина, dilvua@gmail.com

Метод химического осаждения при синтезе нанокристаллов привлек к себе внимание благодаря низкой температуре и высокой однородности частиц по размерам.

Цель настоящей работы – поиск и создание высокоэффективной энергосберегающей методики синтеза нанокристаллов $Y_3Fe_5O_{12}$ методом химического осаждения с использованием СВЧ излучения, исследование морфологии кристаллов и магнитных свойств.

Наночастицы $Y_3Fe_5O_{12}$ синтезировали методом совместного осаждения гидроксидов иттрия и железа(III). Для инициирования химических реакций, управления зародышеобразованием и формированием новых фаз использовали воздействие микроволнового электромагнитного излучения СВЧ диапазона на водные растворы прекурсоров. Мощность микроволнового излучения варьировали от 0.14 до 1.4 кВт,

изменяя скважность процесса. Частота излучения – 2.45 ГГц, время проведения процесса – от 6 до 66 мин. Нанокристаллы $Y_3Fe_5O_{12}$ получали прокаливанием полученного осадка в муфельной печи. Значительная доля частиц, полученных при микроволновой обработке прекурсора (осадка) в СВЧ печи, имела сферическую форму. Средний диаметр полученных после синтеза наночастиц $Y_3Fe_5O_{12}$ составлял ~ 41 нм. Петли гистерезиса магнитного момента образцов измеряли с помощью лабораторного вибрационного магнетометра фонеровского типа при комнатной температуре. Установлены с использованием рентгенофазового анализа, растровой электронной микроскопии и анализа удельной поверхности фазовый состав, структура и морфология магнитных наночастиц. Показано, что корректировка их размера может быть эффективно осуществлена с помощью гидротермальной рекристаллизации. Выявлено, что путем изменения длительности микроволновой и/или термической обработки можно получить нанодисперсный материал с заданными (в определенных пределах) значениями намагниченности насыщения и коэрцитивной силы. Высокие для наночастиц значения удельной намагниченности насыщения дают возможность применить эти материалы в медицине в качестве магнитных носителей лекарственных препаратов или для использования при магнитной гипертермии.

Ключевые слова: методика Ельмора, гидротермальная рекристаллизация, иттрий – железистый феррит, петля гистерезиса, намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, фазовый состав, структура, морфология, СВЧ излучение

Synthesis and magnetic characteristics of iron-yttrium garnet nanoparticles

P.P. Gorbyk, I.V. Dubrovin, M.V. Abramov

Chuiko Institute of Surface Chemistry of National Academy of Sciences of Ukraine
17 General Naumov Str., Kyiv, 03164, Ukraine, dilvua@gmail.com

The method of chemical precipitation in the production of nanocrystals attracts attention due to a lower reaction temperature and a narrower distribution of the size of the synthesized particles. The purpose of this work is to search for and create a highly efficient energy-saving technique for the synthesis of $Y_3Fe_5O_{12}$ nanocrystals by the method of chemical deposition using microwave radiation, the study on the morphology of crystals and on their magnetic properties.

The $Y_3Fe_5O_{12}$ nanoparticles were synthesized by the co-precipitation of yttrium and iron(III) hydroxides. We used the effect of microwave electromagnetic radiation of the microwave range on aqueous solutions of precursors to initiate chemical reactions, control nucleation and form new phases. We varied the microwave power from 0.14 to 1.4 kW, changing the duty cycle of the process. The radiation frequency was 2.45 GHz, the process lasted from 6 to 66 minutes. $Y_3Fe_5O_{12}$ nanocrystals were obtained by calcining the resulting precipitate in a muffle furnace. A significant fraction of the particles obtained by microwave treatment of the precursor (precipitate) in the microwave oven was spherical. The average diameter of the $Y_3Fe_5O_{12}$ nanoparticles obtained after synthesis was ~ 41 nm.

The hysteresis loops of the magnetic moment of the samples were measured with a phonor-type vibrational magnetometer. Samples were examined by X-ray diffraction analysis, scanning electron microscopy, and the specific surface area was measured by thermal desorption of nitrogen.

The phase composition is established, the structure and morphology of the surface of synthesized nanoparticles is studied. It is shown that the correction of the nanoparticle size can be effectively carried out by means of hydrothermal recrystallization. It has been found that by changing the duration of microwave and / or heat treatment it is possible to obtain nanodispersed material with specified (within certain limits) saturation and coercive force magnetization values. High values of the specific saturation magnetization of the obtained materials show a principal possibility of their application in medicine as magnetic carriers of medicinal products or for magnetic hyperthermia.

Keywords: Elmore method, hydrothermal recrystallization, iron-yttrium garnet, hysteresis loop, specific saturation magnetization, coercive force, phase composition, structure, morphology, microwave radiation

ЛІТЕРАТУРА

1. Sun Z., Yuan D., Li H. et al. Synthesis of yttrium aluminum garnet by a new sol-gel method // *J. Alloys Compd.* – 2004. – V. 379, N 1–2. – P. L1–L3.
2. Федоров П.П., Маслов В.А., Усачев В.А., Кононенко Н.Э. Синтез лазерной керамики на основе нанодисперсных порошков алюмоиттриевого граната $Y_3Al_5O_{12}$ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – С. 28–44.
3. Wohlfarth E.P. *Ferromagnetic materials: A handbook of the properties of magnetically ordered substances.* – Amsterdam: North-Holland. – 1980. – 589 p.
4. Булатова А.Н., Смиронов В.В. Влияние состава и условий синтеза на магнитные свойства и структуру замещенных феррит-гранатов // *Физика и химия обработки материалов.* – 2008. – № 5. – С. 61–64.
5. Nielsen J.W., Dearborn E.F. System state diagram $Fe_2O_3 - YFeO_3$ // *J. Phys. Chem. Solids.* □ 1958. □ V. 5, N 3. □ P. 202–207.
6. Чехун В.Ф., Суходуб Л.Ф., Мовчан Б.А. и др. Методы получения наноразмерных материалов // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології.* – 2011. – Т. 9, № 1. – С. 247–259.
7. Федорів В.Д., Сташко Н.В., Яремій І.П., Мокляк В.В. Формування структури залізо-ітрієвого гранату на основі вихідного матеріалу, отриманого золь-гель методом // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2012. – Т. 13, № 3. – С. 766–769.
8. Остафійчук Б.К., Федорів В.Д., Сташко Н.В. Вплив технологічних умов золь-гель-синтезу на процес формування однофазного полікристалічного залізо-ітрієвого гранату // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології.* – 2014. – Т. 12, № 3. – С. 553–563.
9. Бушкова В.С. Синтез и изучение свойств наноферритов, полученных методом золь-гель с участием автогорения // *Журнал нано- та електронної фізики.* – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 01023-1 – 01023-9.
10. Копаев А.В., Заднипрянный Д.Л., Тафійчук Ю.Н. Структура, свойства и особенности синтеза никель-алюминиевых ферритов, полученных методом золь-гель с участием автогорения // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології.* – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 289–295.
11. Praveena K., Sadhana K., Srinath S., Murthy S.R. Effect of pH on structural and magnetic properties of nanocrystalline $Y_3Fe_5O_{12}$ by aqueous co-precipitation method // *Materials Research Innovations.* □ 2013. – V. 18, N 1. □ P. 69–75.
12. Ванецев А.С., Третьяков Ю.Д. Микроволновой синтез индивидуальных и многокомпонентных оксидов // *Успехи химии.* – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 435–453.
13. Ванецев А.С., Кецко В.А., Третьяков Ю.Д. Эволюция микроструктуры индивидуальных оксидов металлов при микроволновом воздействии // *Конденсированные среды и межфазные границы.* – 2009. – Т. 11, № 4. – С. 280–289.
14. Борисенко Н.В., Дубровин И.В., Абрамов Н.В. и др. Синтез и свойства магниточувствительных нанокомпозитов на основе оксидов железа и кремния // *Физико-химия наноматериалов и супрамолекулярных структур / Под редакцией А.П. Шпака и П.П. Горбика.* Т. 1. – Киев: Наукова думка, 2007. – С. 394–406.
15. Semenov V.E., Rybakov K.I., Bykov YuV. High-temperature microwave processing of materials // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2001. – V. 34, N 13. – P. R55.

REFERENCES

1. Sun Z., Yuan D., Li H., Duan X., Sun H., Wang Z., Wei X., Xu H., Luan C., Xu D., Lu M. Synthesis of yttrium aluminum garnet by a new sol-gel method. *J. Alloys Compd.* 2004. **379**(1–2): L1.
2. Fedorov P.P., Maslov V.A., Usachev V.A., Kononenko N.E. Synthesis of laser ceramics based on nanodispersed powders of alumite yttrium garnet $Y_3Al_5O_{12}$. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University Series Instrument Engineering.* 2012. 28. [in Russian].
3. Wohlfarth E.P. *Ferromagnetic materials: A handbook of the properties of magnetically ordered substances.* (Amsterdam: North-Holland, 1980). [in Russian].
4. Bulatova A.N., Smirnov V.V. Influence of the composition and synthesis conditions on the magnetic properties and structure of substituted ferrite garnets. *Physics and Chemistry of Materials Treatment.* 2008. **5**: 61. [in Russian].
5. Nielsen J.W., Dearborn E.F. System state diagram $Fe_2O_3 - YFeO_3$. *J. Phys. Chem. Solids.* 1958. **5**(3). 202.

6. Chekhun V.F., Sukhodub L.F., Movchan B.A., Bondar V.V., Lukyanova N.Yu., Kaetsky I.K., Danilchenko S.N. Methods of obtaining nano-sized materials. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2011. **9**(1): 247. [in Russian].
7. Fedoriv V.D., Stashko N.V., Yaremy I.P., Moklyak V.V. The forming the structure of the yttrium iron garnet on the basis of the feedstock got by the sol-gel method. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2012. **13**(3): 766. [in Ukrainian].
8. Ostafychuk B.K., Fedoriv V.D., Stashko N.V. Vliv of technologic minds of sol-gel synthesis on the process of formation of single-phase polycrystalline iron-yttrium garnet. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2014. **12**(3): 553. [in Ukrainian].
9. Bushkova V.S. Synthesis and study of the properties of nanoferrites obtained by the sol-gel method with participation of auto-combustion. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015. **7**(1): 01023. [in Russian].
10. Kopaev A.V., Zadnipyanny D.L., Tafiychuk Yu.N. Structure, properties and features of synthesis of nickel-aluminum ferrites obtained by the sol-gel method with the participation of auto-burning. *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*. 2012. **10**(2): 289. [in Russian].
11. Praveena K., Sadhana K., Srinath S., Murthy S.R. Effect of pH on structural and magnetic properties of nanocrystalline $Y_3Fe_5O_{12}$ by aqueous co-precipitation method. *Materials Research Innovations*. 2013. **18**(1): 69.
12. Vanetsov A.S., Tretyakov Yu.D. Microwave-assisted synthesis of individual and multicomponent oxides. *Russ. Chem. Rev.* 2007. **76**(5): 397. [in Russian].
13. Vanetsev A.S., Ketsko V.A., Tretyakov Yu. D. Evolution of the microstructure of individual metal oxides under microwave action. *Condensed Matter and Interphases*. 2007. **11**(4): 280. [in Russian].
14. Borisenko N.V., Bogatyrev V.M., Dubrovin I.V., Abramov N.V., Gaeva M.V., Gorbyk P.P. Synthesis and properties of magnetosensitive nanocomposites based on iron oxide and silicon. In: *Physicochemistry of nanomaterials and supramolecular structures*. V. 1. (Kyiv: Naukova Dumka, 2007) 394. [in Russian].
15. Semenov V.E., Rybakov K.I., Bykov YuV. High-temperature microwave processing of materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2001. **34**(13): R55.

Надійшла 01.03.2018, прийнята 24.04.2018