

Фролова Л.А.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Нікітін М.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Родін Д.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

СТРУКТУРНІ, ОПТИЧНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОДИСПЕРСНИХ ФЕРИТІВ $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (ДЕ $0 < x < 1$ ТА $0 < y < 1$)

Нанокристалічні феритні матеріали привертають значний інтерес дослідників завдяки своїм унікальним властивостям, що обумовлюють вивчення цих об'єктів в різних областях науки, включаючи фізику, хімію, біологію, медицину, матеріалознавство та інженерію. Саме феритні наноматеріали володіють підвищеною реакційною здатністю, специфічними оптичними, електричними і магнітними властивостями. Особливістю таких матеріалів є те, що основними факторами, які визначають їх властивості є структура, морфологічні особливості, розмір частинок. Крім того, властивості можна регулювати змінюючи хімічний склад. В даній роботі синтезовані композиційні ферити $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (де $0 < x < 1$ та $0 < y < 1$) плазмовим методом. Для характеристики отриманих зразків було використано рентгенофазовий аналіз, вібраційну магнітометрію спектроскопічний аналіз. Для вивчення впливу катіонного складу на властивості феритів було використано симплекс-решітчастий план, який вимагає мінімальної кількості експериментів. Функціями відгуку були обрані коерцитивна сила, намагніченість насичення, параметр решітки, коефіцієнт магнітокристалічної анізотропії, коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису, остаточно намагніченість, ширина забороненої зони, розмір кристаліту, ступінь мікронапруг. Встановлено, що отримані наночастинки феритів мають шпінельну структуру. Зміна параметру решітки відбувається в залежності від радіуса катіона металу та розташування іонів по підрешіткам. Мінімальні значення параметру решітки та максимальні коефіцієнту магнітокристалічної анізотропії, намагніченості насичення та коерцитивної сили відповідають подвійним складам Mn-Co феритів. Синтезовані наноферити мають енергію забороненої зони 1,55–1,9 еВ. Встановлено, що $Zn_{1-x}Co_xFe_2O_4$ ферити та $Zn_{1-x}Co_xMn_{0,5}Fe_2O_4$ ($0 < x < 1$) можуть використовуватися для синтезу композиційних матеріалів.

Ключові слова: ферити, намагніченість насичення, коерцитивна сила, параметр решітки, магнітокристалічна анізотропія, коефіцієнт прямокутності.

Постановка проблеми. Нанокристалічні феритні матеріали привертають значний інтерес дослідників завдяки своїм унікальним властивостям, що обумовлюють вивчення цих об'єктів в різних областях науки, включаючи фізику, хімію, біологію, медицину, матеріалознавство та інженерію. Саме феритні наноматеріали володіють підвищеною реакційною здатністю, специфічними оптичними, електричними і магнітними властивостями [1]. Особливістю таких матеріалів є те, що основними факторами, які визначають їх властивості є структура, морфологічні особливості, розмір частинок. Крім того, властивості можна також регулювати змінюючи хімічний склад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед різноманітних феритів 3d-металів нанороз-

мірні ферити $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ досліджуються впродовж багатьох років завдяки структурним, оптичним, магнітним, електричним та діелектричним властивостям та широкої області застосування у фотокаталізі, сенсорах, постійних магнітах, магнітних рідинах, мікрохвильових поглиначах, для знезараженні води, в якості кольорових пігментів, у захисті від корозії [2].

Наприклад, ферит марганцю кубічної сингонії має структуру частково оберненої шпінелі, причому 20% іонів Mn^{2+} розташовані в октаедричних позиціях і 80% розташовані у тетраедричних позиціях, що зумовлює високі магнітні характеристики [3]. Нанодисперсний ферит мангану характеризується контрольованим розміром, високим значенням намагніченості насичення,

суперпарамагнітною природою, термостійкістю, корозійною стійкістю.

Ферит кобальту має обернену структуру шпінелі з іонами Co^{2+} , що розташовані переважно в октаедричних позиціях. Ферити кобальту володіють великим значенням коерцитивної сили, константи магнітокристалічної анізотропії, високим значенням температури Кюрі, низькою залишковою намагніченістю, хімічною стабільністю [4]. Синтез CoFe_2O_4 з високими магнітними характеристиками можливий з використанням різноманітних технологій [5, 6].

Як правило, ферит цинку має нормальну структуру шпінелі, де іони Zn^{2+} переважно займають тетраедричні позиції, а іони Fe^{3+} октаедричні позиції, що призводить до низьких магнітних властивостей.

З огляду на складну будову феритів, помітний вплив на властивості феритів надає як природа катіонів, так і розташування по підграткам. Саме подвійні та потрійні ферити ABCFe_2O_4 хімічно стійкі та мають специфічні фізико-хімічні властивості [7].

Наприклад, складні наноферити цинку є ефективними фотокаталізаторами розкладання органічних барвників, причому ступінь розкладання 99% досягалася за 20 хвилин [8].

Наночастинки марганцевих феритів, заміщені одночасно Co^{2+} і Zn^{2+} ($\text{Co}_y\text{Zn}_y\text{Mn}_{1-2y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при $y = 0,0-0,5$), були отримані гідротермальним методом. Аналіз впливу заміщення іонами Co^{2+} та Zn^{2+} іонів Mn^{2+} в шпінельних феритах MnFe_2O_4 показав, що значення забороненої зони знаходяться в межах 1,41–1,54 еВ. Менші значення E_g пояснюються більшим розміром частинок [9]. Встановлено, що магнітні наночастинки цинкзаміщеного фериту марганцю $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0,00, 0,20, 0,40, 0,60, 0,80, 1,00$) можна синтезувати методом співосадження з формуванням висококристалічної однофазної структури кубічної шпінелі та просторовою групою Fd_3m . При цьому розмір кристалітів зменшується від 20 до 10 нм, ширина забороненої зони збільшується від $\sim 2,26$ до $\sim 2,63$ еВ [10].

Шпінельні наночастинки фериту кобальту зі складом $(\text{M}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, де $\text{M}=\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Mn}$; $x = 0,0; 0,25; 0,5; 0,75$) були синтезовані золь-гель методом. Ферит складу $\text{Mn}_{0,75}\text{Co}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ показав найкращі результати в реакції розкладання метиленового синього (МС) (96,0% видалення під час 100 хв ультрафіолетового впливу в лужному розчині) [11].

В роботі [12] проведено рентгенівські та Мессбауерівські дослідження фериту $\text{Co}_{0,5-x}\text{Mn}_x\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0,5 > x > 0,1$), отриманого методом

співосадження зі стехіометричних водних розчинів. Результати досліджень показали утворення кубічної фази із середнім розміром кристалітів приблизно 5–8 нм. причому зі збільшенням вмісту Mn до 0,4 точка Кюрі, коерцитивна сила та намагніченість насичення зменшуються.

Наночастинки фериту $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ були синтезовані за допомогою гідротермального процесу за 180°C . Показано збільшення розміру частинок зі збільшенням концентрації катіонів Mn. Виявлено, що намагніченість насичення (M_s) $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, спочатку швидко зростає, а потім повільно збільшується зі збільшенням концентрації Mn, пояснюються це розташуванням катіонів по окта- та тетра- позиціям в кристалічній решітці наночастинок шпінельного фериту [13].

Mn-заміщені ферити Zn з хімічною формулою $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ (0,0; 0,1; 0,2; 0,3) синтезовано методом золь-гель автоспалювання. Петлі гістерезису всіх зразків показують, що коерцитивна сила і намагніченість насичення становить 180–220 Ерстед, значення намагніченості насичення приблизно однакові 18–21 $\text{A m}^2/\text{kg}$ [14]. Визначені ступені розкладання метиленового синього для серії фотокаталізаторів CoFe_2O_4 , що синтезувалися гідрофазним методом від впливом УЗ-випромінювання. Синтезовані зразки показали високу каталітичну активність щодо розкладу МС – 85% за 150 хвилин [15]. Автори використовували синтез мікрогранул фериту $\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0,0-0,2$) шляхом розпилювальної сушки та визначили їх структурні, морфологічні та магнітні властивості. Встановлено значення магнітного насичення від 82,27 до 86,18 $\text{A m}^2/\text{kg}$ і 77,05–79,87 $\text{A m}^2/\text{kg}$ для $\text{Co}_{0,9}\text{Mn}_{0,1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ за 10 K і 300 K відповідно. Структурні дослідження, також показують, що заміна Co на Mn збільшує ступінь інверсії в структурі кубічної оберненої шпінелі. Двовалентні (Co^{2+} , Mn^{2+}) і тривалентні (Fe^{3+} , Mn^{3+}) катіони розподілені по-різному в тетраедричних і октаедричних положеннях [16].

В роботі розглянуто структурні, оптичні та магнітні характеристики наночастинок CoFe_2O_4 , легуваних Mn, синтезованих методом хімічного співосадження. Рентгенівський аналіз підтвердив значне зменшення розміру кристалітів з ~ 17 нм до 10 нм зі збільшенням вмісту Mn від 0 до 1. Заміщення Mn сприяє переходу від феромагнетика до суперпарамагнетика та зменшення намагніченості насичення та коерцитивної сили при легуванні Mn [17].

Тобто впродовж останніх десятиріч ферити перехідних металів є об'єктом багатьох дослі-

джень внаслідок поєднання високих магнітних, оптичних, електричних та каталітичних властивостей. Крім того, наноструктуровані ферити мають низку переваг в порівнянні з їх консолідованими аналогами, завдяки їх унікальним фізичним та хімічним властивостям.

Метою статті є встановлення залежності між структурними і магнітними характеристиками та складом феритів.

Виклад основного матеріалу. Методики проведення експерименту. Для синтезу зразків (таблиця 1) використовували ферум(II) сульфат, кобальт сульфат, манган сульфат, цинк сульфат, натрій гідроксид аналітичної чистоти. Ферити з загальною формулою $MeFe_2O_4$ ($Me=Co, Mn, Zn,$) були синтезовані з використанням плазмового методу, що більш детально описаний в роботі [18]. Рентгенограми зразків були отримані на приладі ДРОН-2.0 при монохроматичному $CoK\alpha$ випромінюванні. Розмір кристалітів визначали за допомогою формули Дебая-Шерера.

Визначення магнітних характеристик проводилося за допомогою вібраційного магнітометра. ЕПР-спектри були отримані за допомогою радіоспектрометра Radiopan SE/X-2543. Для характеристики сигналів ЕПР використовували інтенсивність сигналу, резонансну частоту. Результати були використані для розрахунку енергії забороненої зони. Енергію забороненої зони визначали зі спектрів дифузного відбиття зразків використовуючи функцію Кубелки-Мунка.

Для вивчення впливу катіонного складу на властивості феритів було використано симплекс-решітчастий план, який вимагає мінімальної кількості експериментів для вивчення впливу факторів на вибрані функції відгуку. Молярні концентрації кобальту, марганцю та цинку відповідно були обрані як фактори x_1, x_2, x_3 . План експерименту показаний у таблиці 1.

Таблиця 1

Матриця планування симплекс-решітчастого методу {3,3}

№ зразка	Формула	Mn	Zn	Co
1	$MnFe_2O_4$	1.00	0	0
2	$Mn_{0.67}Zn_{0.33}Fe_2O_4$	0.667	0.33	0
3	$Mn_{0.33}Zn_{0.67}Fe_2O_4$	0.333	0.667	0
4	$ZnFe_2O_4$	0	1.00	0
5	$Co_{0.33}Zn_{0.67}Fe_2O_4$	0	0.667	0.33
6	$Co_{0.67}Zn_{0.33}Fe_2O_4$	0	0.333	0.667
7	$CoFe_2O_4$	0	0	1.00
8	$Co_{0.67}Mn_{0.33}Fe_2O_4$	0.33	0	0.667
9	$Co_{0.33}Mn_{0.67}Fe_2O_4$	0.667	0	0.333
10	$Co_{0.33}Zn_{0.33}Mn_{0.33}Fe_2O_4$	0.333	0.333	0.333

Діаграми «властивості-склад» були зображені за допомогою ізоліній. Функціями відгуку були коерцитивна сила (H_c), Ерстед; намагніченість насичення (M_s), $A\ m^2/kg$; a – параметр решітки, Å ; K – коефіцієнт магнітокристалічної анізотропії, R – коефіцієнт прямокутності.

$$K = \frac{H_c M_s}{0.96}$$

Результати та обговорення. Отримані рентгенограми зразків показали, що дифрактограми мають індексовані піки (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511) і (440), що відповідають типовій фазі шпінелі. Як видно з рисунку 1 спостерігається зменшення інтенсивності зі збільшенням концентрації мангану у феритах $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ і $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ ($0 < x < 1$) (зразки 7–9, 1–3). Найбільш інтенсивні піки відповідають кобальт-цинковим феритам. Зі збільшенням вмісту цинку ступінь кристалічності феритів збільшується.

Слабке дифузне розсіювання на малих кутах свідчить про присутність в досліджених матеріалах поряд з кристалічними фазами невеликої кількості речовини в рентгеноаморфному стані.

Крім того інтенсивність піків найбільша для простих феритів поява додаткових катіонів призво-

Таблиця 2

Результати експериментів

№	H_c , Ерстед	M_s , $A\ m^2/kg$	M_r , $A\ m^2/kg$	R	a , Å	E, eB	$K_{аніз}$	$I_{(111)}$	$L_{(111)}$	M, %
1	41	111,79	12,85	0,11494	8,3516	1,58	4774,36	99,8	451	0,00104
2	8	47,7	0,669	0,0140	8,341	1,72	397,50	81,2	343	0,00153
3	8	3,75	0,21	0,056	8,3573	1,82	31,25	69,8	350	0,0004
4	19	3,93	0,047	0,0119	8,3592	1,55	77,78	58,9	274	0,00264
5	1	37,26	0,191	0,0051	8,3430	1,71	38,81	64,5	310	0,000236
6	70	74,94	5,35	0,07139	8,366	1,82	5464,37	30,02	266	0,0085
7	1124	105,41	49,53	0,46987	8,3689	1,9	123417,50	79,5	201	0,00126
8	706	69,1	18,79	0,27192	8,3795	1,75	50817,29	28,96	275	0,00162
9	370	73,05	24,81	0,3396	8,3487	1,63	28154,69	78,9	366	0,00182
10	0	9,72	0,001	0,000102	8,36025	1,59	0	38,9	227	0,0083

дить для аморфізації продукту. Наявність широких піків вказує на нанодисперсну природу та малий кристалічний розмір зразків. Найбільший розмір кристалітів відповідає феритам мангану.

Розраховані значення параметру решітки (рис. 2) показали, що параметр решітки збільшується у міру збільшення концентрації цинку у складах $Zn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$. Мінімальні значення відповідають подвійним складам за $x > 0,55$. Більш різко виражене збільшення параметра решітки спостерігається для зразків 7,8, невелике для 4–7 і зменшення для 1,2. Це вказує на заміну меншого іону Co^{2+} (0,72 Å) більшим іоном Mn^{2+} (0,80 Å) і, відповідно, Mn^{2+} (0,80 Å) на Zn^{2+} (0,74 Å) (рис. 2–4, таблиця 2).

У складних феритах марганцю цинку заміна меншого іона цинку більшим катіоном Mn^{2+} в фериті марганцю-цинку викликає зменшення постійної решітки.

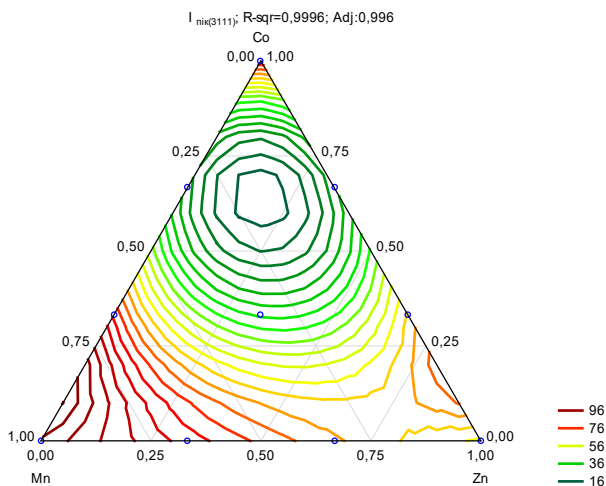


Рис. 1. Залежність інтенсивності піку (311) на рентгенограмах феритів від складу феритів

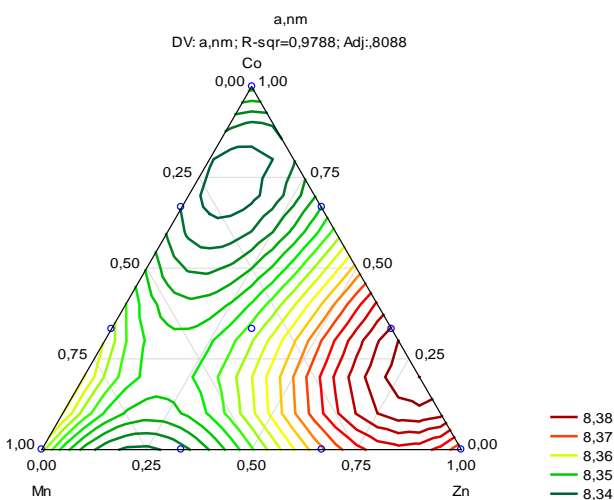


Рис. 2. Залежність параметра решітки від складу феритів

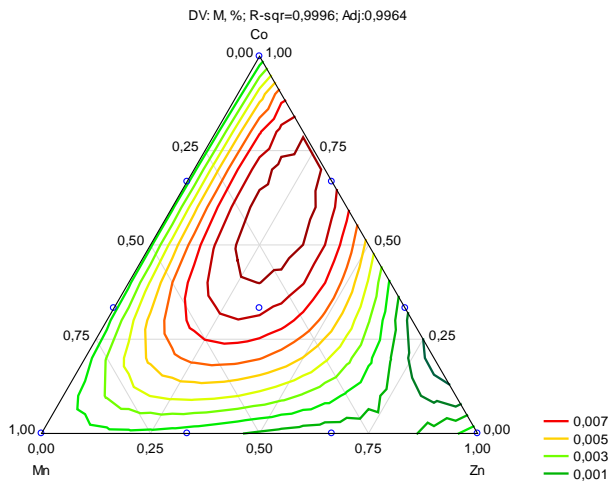


Рис. 3. Залежність густини дислокацій від складу феритів

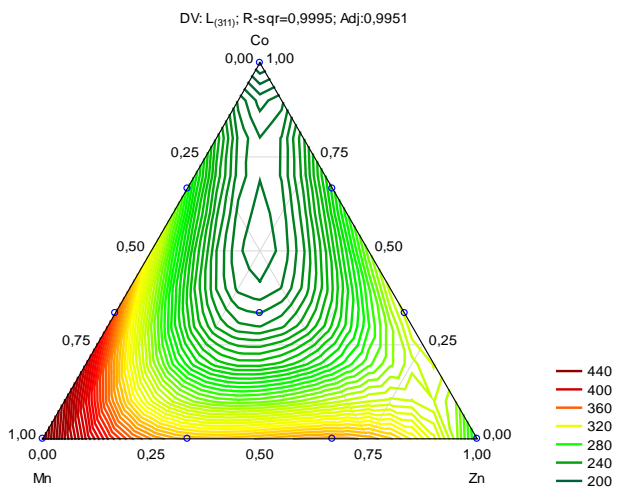


Рис. 4. Залежність розміру кристаліту від складу феритів

Таку аномальну поведінку можна пояснити тим, що ферит марганцю змішана шпінель і значна частка Mn^{2+} і Zn^{2+} займає октаедричні позиції і переводить катіони Fe^{3+} в тетраедричних сайти проти їх хімічних переваг. Оскільки іони Fe^{3+} мають менший іонний радіус (0,64 Å), то заміна їх в тетраедричних позиціях зміст більших двовалентних іонів призводить до зменшення параметра решітки. Саме цією обставиною можна також пояснити зміну магнітних властивостей в манган-цинкових феритах.

Намагніченість насичення (M_s) і коерцитивна сила (H_c), остаточно намагніченість (M_{oct}), коефіцієнт прямокутності петля гістерезису (R), коефіцієнт магнітокристалічної анізотропії (K) виведені з кривих намагнічування, приведені в таблиці 2 та рисунках 5–7.

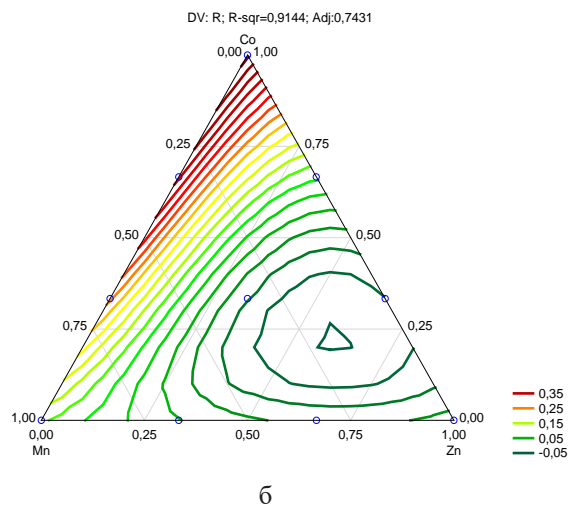
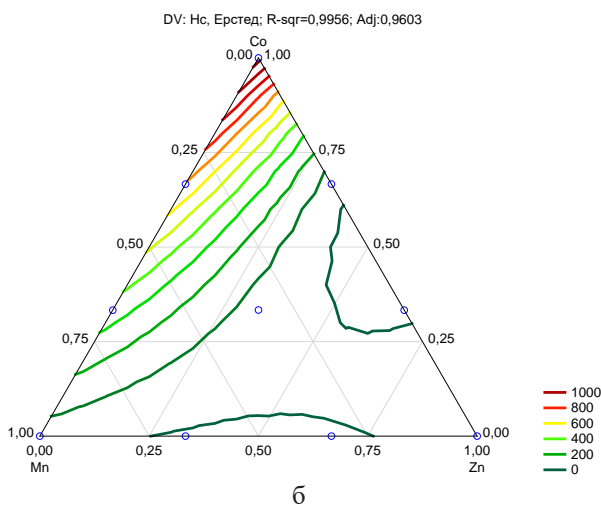
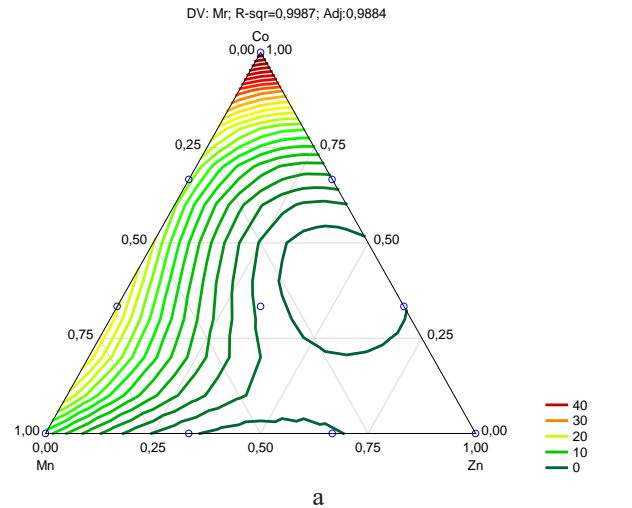
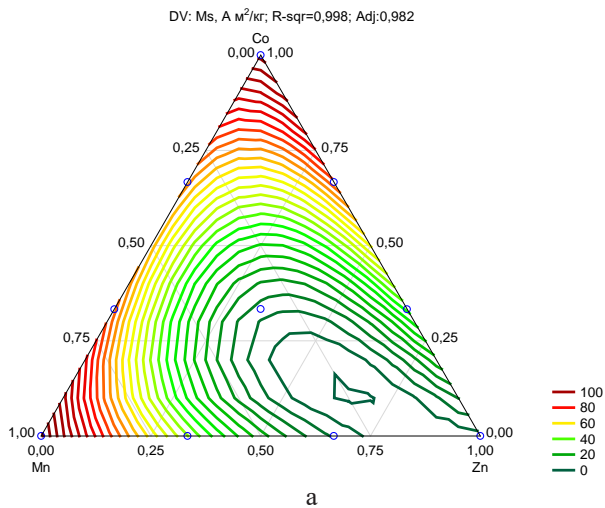


Рис. 5. Залежність намагніченості насичення (а), коерцитивної сили (б)

Рис. 6. Залежність остаточної намагніченості (а), коефіцієнту прямокутності (б) від складу феритів

Магнітні характеристики матеріалу є найважливішими властивостями, які визначаються шляхом запису кривих намагнічування при кімнатній температурі. Підвищення вмісту кобальту в системі призводить до збільшення коерцитивної сили і намагніченості насичення. Збільшення вмісту в феритах катіонів кобальту від 0 до 1,0, обумовлює значне зростання коерцитивної сили від 2–3 до 1140 Ерстед. Зазначений факт підтверджується зміщенням значень параметра решітки d (8,35 нм) в область менших значень (8,32 нм), а також збільшенням ступеня кристалічності та розміру кристалітів. Найбільші значення намагніченості насичення відповідають $MnFe_2O_4$ та $CoFe_2O_4$ (M_s становить 111,8 $A\ m^2/kg$ і 105,41 відповідно).

Причому, значення намагніченості насичення в більшій мірі залежить від вмісту катіонів

кобальту. Найбільші магнітні показники відповідають максимальному вмісту кобальту. Таким чином магнітні ферити з підвищеною коерцитивною силою відповідають складам 7, 8, 9, а магнітні ферити з низькою коерцитивною силою складам 4, 5, 6, 7. На діаграмах можна виділити два рівносторонніх трикутника з координатами вершин А (0,1,0) Б (0,25,0,75,0) С (0,0,75,0,25) та В (0,0,1) Е (0,25,0,75,0) Д (0,0,75,0,25) яким відповідає область більш високих значень намагніченості насичення. Найбільші значення коефіцієнту прямокутності відповідають феритам кобальту (рис. 6б).

Для оцінки оптичних властивостей феритів були отримані спектри дифузного відбиття. Всі 10 зразків показали інтенсивну смугу поглинання в УФ області електромагнітного спектру. Ширина забороненої зони в зразках визначалася за рівнянням

$$\alpha_{lh\nu} = A (h\nu - E)^n, n=2$$

де α – коефіцієнт поглинання, ν – частота світла, E – енергія забороненої зони, eВ, а – константа пропорційності.

Ширина забороненої зони, розрахована для CoFe_2O_4 , MnFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 становила відповідно 1,58 eВ, 1,59 eВ, 2,2 eВ. Енергія забороненої зони феритів показана у таблиці 2. Вона збільшується зі збільшенням вмісту Zn (рис. 7б). Значна зміна значень енергії забороненої зони може спостерігатися завдяки розбіжності в середньому розмірі кристалітів, постійній решітці, фазовій чистоті, концентрації носія заряду та деформації кристалічної решітки.

Висновки. Ферити $\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{Zn}_{1-x-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (де $0 < x < 1$, $0 < y < 1$) були синтезовані комбінованим методом співосадження і плазмової обробки.

Закономірності зміни властивостей феритів були вивчені симплекс-решітчатим методом планування експерименту. Отримані дисперсні ферити були охарактеризовані за допомогою рентгенофазового аналізу, ЕПР спектроскопії, вібраційної магнітометрії. Було встановлено роль катіонів, що визначають магнітні властивості. Перспективними магнітними матеріалами є кобальт цинк манганвміщуючі ферити. Синтезовані зразки, що вміщують кобальт та манган мають високі магнітні властивості, що забезпечує їх подальше використання в якості складових композиційних матеріалів.

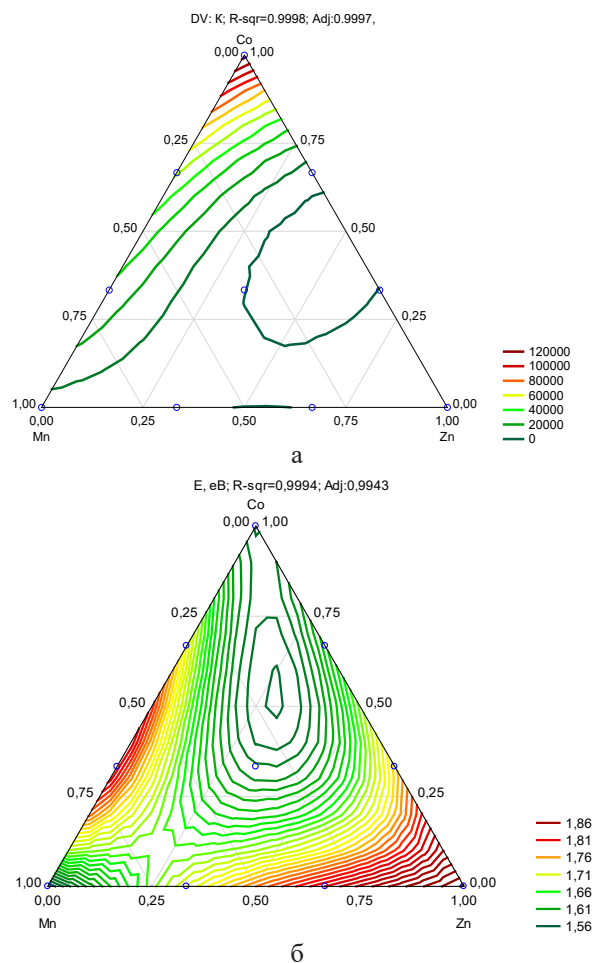


Рис. 7. Залежність коефіцієнту анізотропії (а) та ширини забороненої зони (б) від складу феритів

Список літератури:

1. Dippong T., Levei E. A., Cadar O. Recent advances in synthesis and applications of MFe_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Zn}$) nanoparticles. *Nanomaterials*. 2021. 11(6), Pp. 1560. <https://doi.org/10.3390/nano11061560>
2. Talebniya S., Sharifi I., Saeri M. R., Doostmohammadi A. Study of cation distribution and magnetic properties of MFe_2O_4 ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{and Cu}$) nanoparticles. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2022. 35(3), Pp. 899–908. <https://doi.org/10.1007/s10948-021-06129-w>
3. Antony T. J., Thirunavukkarasu K., Jagannathan K. Structural, morphological and magnetic analysis of hydrothermally synthesized MnFe_2O_4 magnetic nanoferrites. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.051>
4. Balasubramani V., Mowlaka V., Sivakumar A., Al Sdran N., Maiz F., Shkir M. Design and investigation of Sono-chemical synthesis of pure and Sn doped CoFe_2O_4 nanoparticles and their structural and magnetic properties. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023. 155, Pp. 111015. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111015>
5. Bayça F. Characterization and magnetic properties of CoFe_2O_4 nanoparticles synthesized by the co-precipitation method. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024. 21(1). Pp. 544–554. <https://doi.org/10.1111/ijac.14518>
6. Kancharla R., Vudayagiri A. Structural, Magnetic and Optical Properties CoFe_2O_4 Thin Films. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2023. 36(1), Pp. 119–130. <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06429-9>
7. Arteaga-Cardona F., Pal U., Alonso J. M., de la Presa P., Mendoza-Alvarez M. E., Salazar-Kuri U., Mendez-Rojas M. A. Tuning magnetic and structural properties of MnFe_2O_4 nanostructures by systematic introduction of transition metal ions M^{2+} ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co}$). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019. 490, Pp. 65496. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165496>

8. Jangam K., Patil K., Balgude S., Patange S., More P. Synthesis and characterization of magnetically separable $Zn_{1-x}Co_xFeMnO_4$ nanoferrites as highly efficient photocatalyst for degradation of dye under solar light irradiation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2021.148, Pp. 109700. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109700>
9. Asiri S. et al. Hydrothermal synthesis of $Co_yZn_yMn_{1-2y}Fe_2O_4$ nanoferrites: magneto-optical investigation. *Ceramics International*. 2018. 44.(5) Pp. 5751-5759. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.233>
10. Patade S. R., Andhare D. D., Kharat P. B., Humbe A. V., Jadhav K. M. Impact of crystallites on enhancement of bandgap of $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($1 \geq x \geq 0$) nanospinels. *Chemical Physics Letters*, 2020.745, Pp. 137240. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137240>
11. Maksoud M. I. A. A. et al. Antibacterial, antibiofilm, and photocatalytic activities of metals-substituted spinel cobalt ferrite nanoparticles. *Microbial pathogenesis*. 2019. 127. Pp. 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.11.045> Get rights and content
12. Sharifi I., Shokrollahi H. Structural, magnetic and Mössbauer evaluation of Mn substituted Co–Zn ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013.334, Pp. 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.01.021>
13. Wang J., Zeng C., Peng Z., Chen Q. Synthesis and magnetic properties of $Zn_{1-x}Mn_xFe_2O_4$ nanoparticles. *Physica B: Condensed Matter*, 2004. 349(1-4), Pp, 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.02.014>
14. Ahmad M., Amin K., Rehman A. U., Wahab A., Wabaidur S. M. Detailed investigation of Mn-substituted Zn ferrites for microwave applications up to 6 GHz. *Materials Science and Technology*, 2024. Pp. 02670836231217195. <https://doi.org/10.1177/02670836231217195>
15. Sun M., Han X., Chen S. Synthesis and photocatalytic activity of nano-cobalt ferrite catalyst for the photo-degradation various dyes under simulated sunlight irradiation. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019.91. – Pp. 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.12.005>
16. Ansari S. M., Sen D., Haritha K., Kolekar Y. D., Ramana C. V. Low-cost, ecofriendly, and large-scale synthesis of nanostructured $Co_{1-x}Mn_xFe_2O_4$ microgranules with enhanced magnetic performance by chemical spray drying processing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023.672, Pp.131697. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131697>
17. Priyadarshini, P., & Pushpanathan, K. (). Tuning of crystallite size, energy gap, and magnetic property of Mn-doped $CoFe_2O_4$ nanoparticles. *Surface Review and Letters*, 2021.28(06), Pp. 2150052. <https://doi.org/10.1142/S0218625X21500529>
18. Frolova L. A., Derhachov M. P. The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of $Mn_xFe_{3-x}O_4$ Spinels. *Nanoscale research letters*, 2017.12(1), P. 505-517. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2268-5>

Frolova L.A., Nikitin M.O., Rodin D.O. STRUCTURAL, OPTICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF NANO-DISPERSE FERRITES $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (where $0 < x < 1$ and $0 < y < 1$)

Nanocrystalline ferrite materials attract considerable interest of researchers due to their unique properties, which determine the study of these objects in various fields of science, including physics, chemistry, biology, medicine, materials science and engineering. It is ferrite nanomaterials that have increased reactivity, specific optical, electrical and magnetic properties. The peculiarity of such materials is that the main factors that determine their properties are the structure, morphological features, and particle size. In addition, the properties can be adjusted by changing the chemical composition. In this work, composite ferrites $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (where $0 < x < 1$ and $0 < y < 1$) were synthesized by the plasma method. X-ray phase analysis, vibrational magnetometry and spectroscopic analysis were used to characterize the obtained samples. To study the effect of the cation composition on the properties of ferrites, a simplex lattice plan was used, which requires a minimum number of experiments. The coercive force, saturation magnetization, lattice parameter, magnetocrystalline anisotropy coefficient, hysteresis loop squareness coefficient, final magnetization, band gap, crystallite size, degree of microstrain were selected as the response functions. It was established that the obtained ferrite nanoparticles have a spinel structure. The lattice parameter changes depending on the radius of the metal cation and the location of the ions on the sublattices. The minimum values of the lattice parameter and the maximum values of the coefficient of magnetocrystalline anisotropy, saturation magnetization, and coercive force correspond to the dual compositions of Mn–Co ferrites. Synthesized nanoferrites have a band gap energy of 1.55–1.9 eV. It was established that $Zn_{1-x}Co_xFe_2O_4$ ferrites and $Zn_{1-x}Co_xMn_{0.5}Fe_2O_4$ ($0 < x < 1$) can be used for the synthesis of composite materials.

Key words: ferrites, saturation magnetization, coercive force, lattice parameter, magnetocrystalline anisotropy, squareness coefficient.