

Ю.С. Мазуренко

## Вплив заміщення іонів магнію на структуру та магнітні властивості літійового фериту

Івано-Франківський національний медичний університет, Івано-Франківськ, Україна, [yumazurenko@ifumu.edu.ua](mailto:yumazurenko@ifumu.edu.ua)

Порошки нанорозмірного літійового фериту, заміщеного іонами магнію були отримані методом золь-гель авто спалювання. Показано, що даний метод забезпечує високу фазову чистоту і однорідність синтезованого продукту а також володіє значною енергоекономічністю порівняно з традиційним твердофазним методом. Шпінельна структура заміщеного літійового фериту була підтверджена результатами X-променевої дифракції а також визначені розміри частинок методами X-променевої дифрактометрії і мессбауерівського аналізу. Мессбауерівські спектри показали присутність двох магнітовпорядкованих підсистем, що відповідають за тетраедричне і октаедричне оточення заліза та двох парамагнітних дублетів, один з яких відповідає за присутність заліза у двовалентному стані. Магнітні характеристики були отримані для кілець, виготовлених з синтезованого матеріалу. Вимірювання показали немонотонну залежність намагніченості насичення, залишкової намагніченості, коерцитивної сили та магнітного моменту від складу і виявили значно вищі показники, порівняно з аналогічними матеріалами, отриманими твердофазним синтезом. Характер поведінки магнітних характеристик при заміщенні іонами магнію пов'язаний з особливостями катіонного розподілу і їх мікроструктури, що в основному визначається способом отримання фериту.

**Ключові слова:** ферити, золь-гель автоспалювання, структурні дослідження, магнітні властивості, шпінелі, м'які магніти.

Подано до редакції 14.02.2021; прийнято до друку 5.04.2021.

### Вступ

Технологічно ферити є дуже важливими матеріалами внаслідок їх цікавих магнітних і електричних властивостей, які можуть бути використані для застосування у високо ємнісних батареях, електрохромних дисплеях, для очищення води, низькомагнітних рідин, інтеркальованих електродів у перезаряджуваних батареях і в якості сильного окиснювача та багато іншого [1-8]. Кубічний літійовий ферит шпінелі  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$  [9] є одним з найважливіших феритів. Він відноситься до групи магнітом'яких матеріалів з високою температурою Кюрі (893 К) [9], квадратною петлею гістерезису і високою намагніченістю.

При використанні феритів на високих і надвисоких частотах бажано мінімізувати провідність матеріалу. Таким чином, заміщення  $\text{Fe}^{3+}$  на  $\text{Mg}^{2+}$  для

забезпечення електронейтральності буде зменшувати вміст  $\text{Fe}^{2+}$ , який грає визначну роль у стрибковій провідності фериту. Іонні радіуси  $\text{Mg}^{2+}$  та  $\text{Fe}^{3+}$  дуже близькі (приблизно 0,064 нм кожен), тому, відповідно до закону Вегарда, заміщення не повинно суттєво спотворювати ґратку [8]. Іони магнію здатні перебувати як у окта, так і у тетра підґратці, що дозволить провести заміщення в обидві підґратки. Оскільки магній є двовалентний, заміщення магнію у ферит зменшить імовірність утворення іонів  $\text{Fe}^{2+}$ , зменшить провідність та покращить магнітні властивості матеріалу.

Існуючі хімічні методи, що застосовуються для синтезу фериту літію, такі як співосадження, гідротермальний, механо-хімічний та золь-гель метод вимагають високої температури, вище 1400 К. Така висока температура може спричинити втрату літію, який виділяється при температурах вище 1273 К,

також високотемпературний процес відпалу зменшує питому площу поверхні [9, 10], погіршуючи електричні та магнітні властивості феритів. Таким чином, синтез фериту літію при низьких температурах представляє значний інтерес. Для поліпшення властивостей матеріалу синтезували нанорозмірний ферит літію шляхом золь-гель автоспалювання. З метою вивчення впливу заміщення на структуру, електричні та магнітні властивості при синтезі фериту іони заліза замінювали на іони магнію за формулою  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$ , з  $x = 0.0$  до  $0.8$ .

## I. Експериментальна частина

Магній-заміщені літієві ферити були синтезовані наступним чином: як вихідні реагенти використовувались водні розчини нітратів металів ( $\text{FeNO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), взяті у відповідному молярному відношенні згідно стехіометрії очікуваних сполук, і лимонна кислота. Нітрати металів і лимонна кислота змішувалися по крапельно на магнітній мішалці у молярному відношенні металів до лимонної кислоти 1:1. Розчин нітратів металів з лимонною кислотою повільно випаровувався у сушильній шафі до форми в'язкого гелю. Наступне висушування проводилось для повного видалення адсорбованої води при  $110^\circ\text{C}$ . Отриманий ксерогель поміщали у піч, яку нагрівали до температури приблизно  $200 - 220^\circ\text{C}$ , після чого суміш спалахувала і в результаті реакції утворювався продукт, який досліджувався за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3 у  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні. На рис. 2 наведено висушений гель і продукт, що утворився після спалювання. З метою дослідження умов синтезу на структуру і морфологію отриманого продукту, синтезовані зразки додатково відпалювалися при температурах  $400, 500, 600$  і  $700^\circ\text{C}$  протягом 3 годин.

Для аналізу експериментальних дифрактограм застосовувався повнопрофільний аналіз за методом Рітвелда з використанням програм *FullProf* та *PowderCell*.

Мессбауерівські спектри поглинання  $\text{Fe}^{57}$  при кімнатній температурі були отримані в режимі постійних прискорень на спектрометрі ЯГРС-4М з використанням джерела  $\gamma$ -квантів  $\text{Co}^{57}$  у хромовій матриці. Математична обробка отриманих спектрів проводилася з використанням універсальної комп'ютерної програми *Univem* [10]. Електричні вимірювання проводились на імпедансному спектрометрі Autolab PGSTAT 12/FRA-2 в діапазоні частот  $0,01$  Гц–  $100$  кГц і при температурах від  $300\text{K}$  до  $750\text{K}$  в покроковому режимі з ізотермічною витримкою  $0,5$  год після кожних  $50$  градусів.

Для проведення магнітних досліджень з синтезованого порошку формувалися кільця з зовнішніми і внутрішніми діаметрами  $18$  і  $10$  мм, відповідно, і товщиною  $3$  мм. На кільця намотувались первинна і вторинна обмотка в кількості  $20$  і  $600$  витків мідного ізольованого дроту, відповідно.

Магнітні властивості синтезованих магній-заміщених літієвих феритових зразків як функції

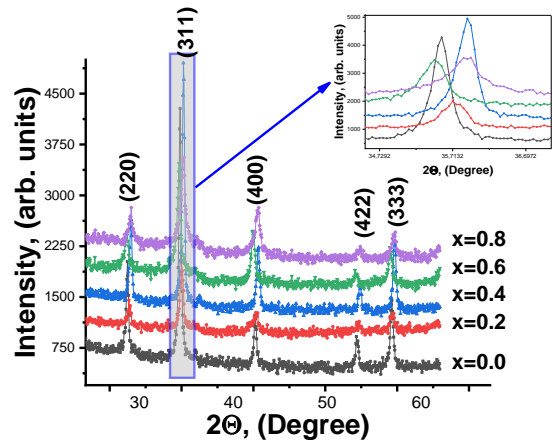


Рис. 1. X-променеві спектри системи  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$  ( $x = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ ).

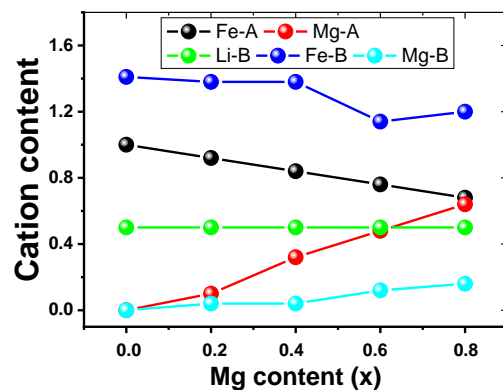


Рис. 2. Розподіл катіонів за підгратками в  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$ .

складу при кімнатній температурі і частоті  $50$  Гц були отримані на ферометрі Ф-64 при максимальному значенні прикладеного поля  $60$  Е. На основі магнітних вимірювань з петлі гістерезису було отримано наступні магнітні параметри.

Експериментальний магнітний момент на формульну одиницю  $m_{\text{exp}}$ , виражений у магнетонах Бора ( $\mu_B$ ) можна розрахувати за наступною формулою [10]:

$$m_{\text{exp}} = \frac{M_W M_S}{5585}$$

де  $M_W$  - молекулярна вага зразка і  $M_S$  намагніченість насичення в  $\text{emu/g}$ .

Константа магнітної анізотропії ( $K$ ) може бути виражена через намагніченість насичення ( $M_S$ ) і магнітну коерцитивну силу ( $H_C$ ) [10] як:

$$K = \frac{M_S H_C}{0.96}$$

## II. Результати та їх обговорення

### 2.1 Структурний аналіз та морфологія

На рисунку 1 наведено X-променеві дифрактограми синтезованих зразків кожного складу. Як видно з рисунку всі отримані сполуки є

однофазними шпінелями, причому система складу  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  ( $x = 0.0$ ) відноситься до просторової групи  $R\bar{4}32$  [JCPDS No 76-1591], так званої надвпорядкованої шпінельної структури, про що свідчить присутність надструктурних піків (110), (210) та (211). Така надструктура виникає внаслідок впорядкованого розташування іонів літію і заліза у співвідношенні 1:3 в кристалографічному напрямку [110]. Всі інші сполуки складу  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$  ( $x = 0.0; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8$ ) виявили приналежність до просторової групи  $Fd\bar{3}m$ , оскільки присутність іонів магнію в октапідгратці порушує впорядкованість у розташуванні іонів заліза та літію.

Зміщення піків, зокрема (311), (рисунок 1, збільшення), є наслідком зміни сталої ґратки. Іонні радіуси  $\text{Mg}^{2+}$  та  $\text{Fe}^{3+}$  дуже близькі (приблизно 0,064 нм кожен), для забезпечення електронейтральності системи в цілому, у фериті формуються заряджені вакансії, які призводять до збільшення сталої ґратки.

На рисунку 2 наведено розподіл катіонів за підґратками шпінелі залежно від вмісту іонів магнію. Катіони  $\text{Li}^+$  займають тільки В-позиції, тоді як іони  $\text{Fe}^{3+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  займають як А- так і В-підґратку. Іони заліза перерозподіляються по А- і В-підґратках у співвідношенні приблизно 4:6 а іони магнію 8:2 відповідно. Як свідчать результати рентгенівської дифрактометрії, переваги до В позиції вищевказаних іонів наступні:  $\text{Li}^+ > \text{Fe}^{3+} > \text{Mg}^{2+}$ .

Дані таблиці 1 свідчать про те, що всі синтезовані зразки є нанорозмірними і більші значення експериментальної сталої ґратки порівняно з теоретичними викликані впливом поверхні внаслідок малих розмірів кристалітів. Дещо більші значення ОКР в методі Селякова-Шеррера зумовлено тим, що до розрахунку брався тільки один пік інтенсивності (третій), а метод Вільямсона-Холла враховує всі рефлекси. Як відомо, із збільшенням кута відбивання збільшується півширина піку, тому врахування всіх рефлексів може дати усереднене значення, що може бути дещо меншим, ніж для одного, випадковим чином вибраного рефлексу. Також при визначенні величини  $\beta_{1/2}$  враховувалася інструментальне уширення, викликане розбіжністю рентгенівського

Таблиця 1

Значення розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) систем  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$  ( $x=0.2; 0.4; 0.6; 0.8$ ), отриманого методом золь-гель автоспалювання, визначені методами Селякова-

Шеррера та Вільямсона Холла

Вміст іонів Mg, (x)	ОКР, нм ( $\pm 0,1$ ) Метод Селякова-Шеррера	ОКР, нм ( $\pm 0,1$ ) Метод Вільямсона Холла
0,0	42	40,0
0,2	17	16,8
0,4	24	23,6
0,6	16	15,4

пучка і шириною обмежуючих щілин, яке визначалося з використанням еталонного зразка. Таким зразком слугував добре відпалений зразок літій-залізної

шпінелі, отриманий керамічним способом.

Рентгенівська густина для кожного складу визначалася на основі співвідношення [11]:

$$d_x = \frac{ZM}{Na^3},$$

де Z - число молекул на елементарну комірку (для шпінельної ґратки Z = 8), M - маса молекули феритового зразка, N - число Авогадро і a - стала ґратки.

Рентгенівська густина зменшується із збільшенням x. Це можна пояснити тим, що атомна вага  $\text{Mg}^{2+}$  (24,31) є меншою, ніж у  $\text{Fe}^{3+}$  (55,8). Відповідно розраховувались значення природної густини  $\rho$ , відносної пористості P, %, та активної площі поверхні S для систем кожного складу, які наведені в таблиці.

З таблиці видно, що середній розмір кристалітів синтезованих зразків знаходиться в околі 14 - 21 нм і площа поверхні складає 116 - 268 м<sup>2</sup>/г, що вказує на нанокристалічну природу отриманих зразків. Питома площа поверхні синтезованих феритів є сукупність площ видимої поверхні феритових частинок, що припадає на одиницю маси. Розміри кристалітів і питома площа поверхні є обернено пропорційні одна до одної, що видно з таблиці 2. Менші розміри кристалітів дають більшу площу поверхні, що впливає на властивості феритів.

На рисунку 3 наведенні SEM зображення систем,

Таблиця 2

Мікроструктурні параметри систем  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$

Вміст іонів Mg, (x)	Стала ґратки a, нм ( $\pm 0,001$ )	Густина $\rho$ , г/м <sup>3</sup> ( $\pm 0,01$ )	Розміри кристалітів нм ( $\pm 0,01$ )	Відносна пористість	Активна площа поверхні м <sup>2</sup> ( $\pm 0,1$ )
0,2	0,833	2,13	16,79	0,54	167,7
0,4	0,833	2,42	21,33	0,46	116,4
0,6	0,835	1,99	15,04	0,54	200,4
0,8	0,836	1,56	14,35	0,63	268,3

синтезованих методом золь-гель автоспалювання з різним вмістом магнію. Середній розмір частинок феритів всіх складів, отриманих з SEM зображень знаходиться в околі 78 - 87 нм. Можна зауважити, що середній розмір зернин феритів різного складу, отриманих методом SEM є більшими, ніж розміри частинок, отриманих методом XRD (таблиця 2). Це можна пояснити тим, що кожне зерно є результатом агломерації кількох нанокристалів. Мікрозображення

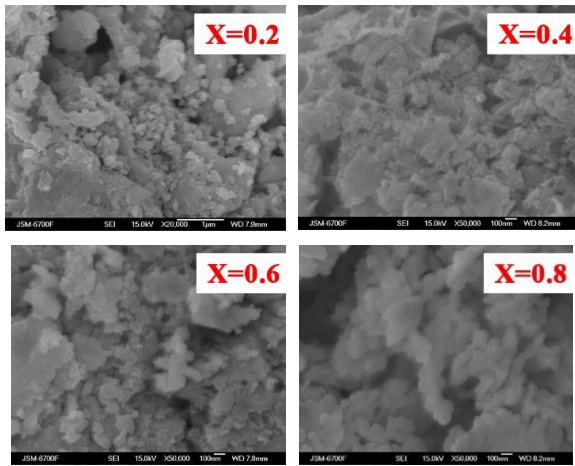


Рис. 3. SEM зображення  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$ .

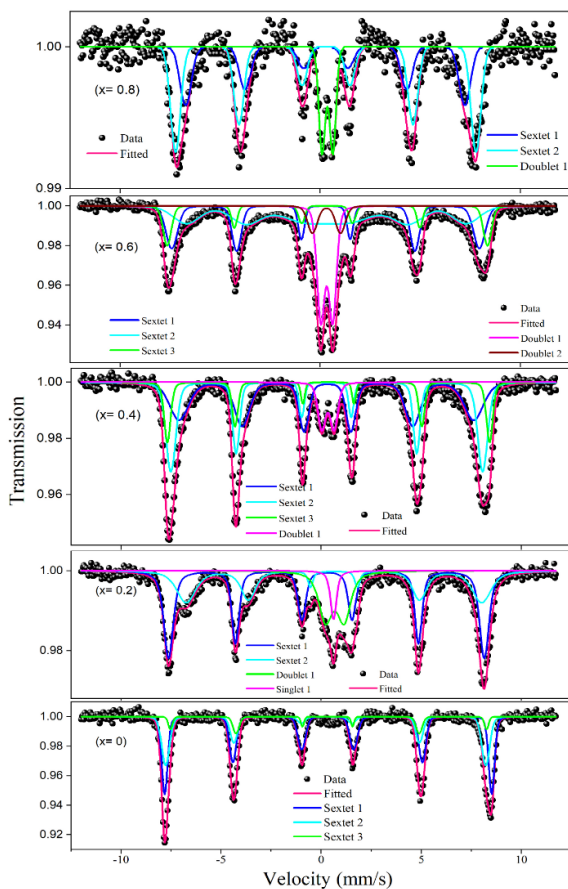


Рис. 4. Мессбауерівські спектри  $^{57}\text{Fe}$  систем  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$ , pH = 7.

показують агломеровану зернисту структуру з кластерами дрібних частинок, з'єднаних між собою. Морфологія поверхні повністю однорідна і регулярна і складається з кубічних, близьких до сферичних частинок. Така морфологія зразків демонструє дрібнозернисту природу частинок.

### 2.2 Мессбауерівські дослідження

На рисунку 4 наведені мессбауерівські спектри  $^{57}\text{Fe}$  при температурі 293К систем  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$  ( $x = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$ ), отриманих при pH реакційного середовища рівного 7. Усі отримані спектри являють

собою суперпозицію трьох магнітовпорядкованих компонент і двох (для системи з  $x = 0,4$  одного) парамагнітних дублетів.

Магнітні поля з порівняно більшими значеннями відповідають за октаедричне і тетраедричне оточення ядер  $^{57}\text{Fe}$ . Ці значення змінюються при збільшенні концентрації заміщуючого елемента. На рис. 5 наведено залежності величини магнітних полів  $^{57}\text{Fe}$  в окта  $H_B$  і тетра  $H_A$  оточенні. Збільшення значення ефективних магнітних полів у випадку  $x = 0,2$ , очевидно, можна пояснити особливостями структури. Зростання парамагнітного дублету при збільшенні концентрації іонів магнію, очевидно, можна пояснити немагнітним оточенням. При збільшенні заміщення кількість немагнітних сусідів заліза зростає, і при збільшенні їх до трьох, дане ядро заліза вилучається з надобмінної взаємодії.

Присутність третьої магнітовпорядкованої компоненти на мессбауерівських спектрах зі значеннями ефективних магнітних полів на кілька десятків кЕ менших, ми віднесли до ядер  $^{57}\text{Fe}$  що знаходяться в поверхневому шарі. Зменшення ефективних магнітних полів на ядрах  $^{57}\text{Fe}$  пов'язане з різною кількістю непрямих обмінних зв'язків для внутрішніх і для поверхневих іонів заліза, які позбавлені значної частини таких зв'язків [12-15].

Взявши у розрахунок значення площ під підспектрами, можна наближено оцінити розміри частинок. При цьому бралось до уваги припущення про сферичну форму частинок. В таблиці 4 поряд з даними про розміри кристалітів, отриманих з X-променевих даних, наведено розраховані дані з мессбауерівських експериментів. Близькі значення обох результатів свідчать про правомочність даного методу оцінки.

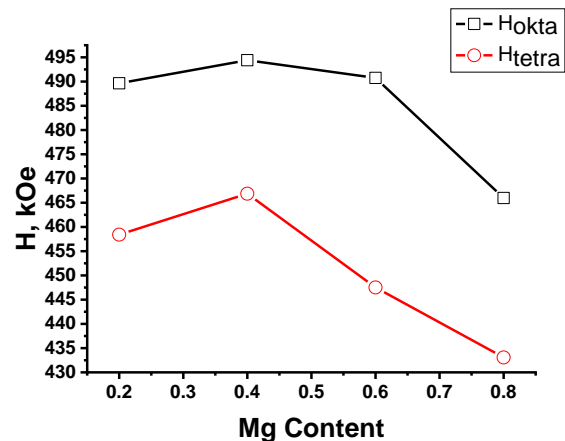


Рис. 5. Залежність магнітних полів  $H_A$  та  $H_B$  від вмісту Mg в системі  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{2.5-x}\text{Mg}_x\text{O}_4$ .

### 2.3 Магнітні вимірювання

Магнітні вимірювання при кімнатній температурі проводились з використанням ферометра Ф-64. Для магнітних вимірювань феритові зразки виготовлялись у формі кілець з внутрішнім і зовнішнім діаметрами 20 і 10 мм відповідно і висотою 3 мм. і додатково відпалювались при 723 К протягом 4 год з швидкістю нагрівання  $4^\circ\text{C}/\text{хв}$ . На кільця намотувалась первинна

Вплив заміщення іонів магнію на структуру та магнітні властивості літійового фериту

катушка в кількості 20 витків і вторинна – у кількості 600. Петлі гістерезису для всіх складів Li-Mg феритів, наведені на рис. 6, показують залежність значення намагніченості (M) від прикладеного магнітного поля (H).

З петлі гістерезису було отримано наступні магнітні параметри: намагніченість насичення  $M_s$  (максимальне значення намагніченості), залишкова намагніченість -  $M_R$  (намагніченість при нульовому полі), коерцитивність -  $H_C$  (значення магнітного поля, необхідного для зменшення намагніченості матеріалу до нуля після намагнічування зразка до насичення) (таблиця 3).

Ці магнітні параметри використовувались для ілюстрації магнітних властивостей синтезованих феритових матеріалів. Виміряні магнітні параметри ( $M_s$ ,  $M_R$  та  $H_C$ ) для всіх синтезованих зразків в прикладеному магнітному полі (H) наведені в таблиці 3.

Найвищі магнітні властивості виявив зразок з

ступенем заміщення 0,4. Хоча в нашому випадку магнітні іони заліза заміщуються на немагнітні іони магнію, то магнітні властивості повинні були б зменшуватися із заміщенням.

Однак результати експерименту показали інакше: спостерігається немонотонна залежність магнітних характеристик від складу. Очевидно такий феномен можна пояснити тим, що у феритах результуючий магнітний момент визначається як результат А-В підграткової взаємодії.

Магнітні моменти тетраедричної і октаедричної підграток в цілому орієнтовані антипаралельно. Тому результуючий магнітний момент буде визначатися як різниця магнітних моментів окта- і тетрапідграток. При заміщенні, як показав катіонний розподіл, іони магнію перерозподіляються за підгратками як 8:2 (8 – у тетрапідгратку), так що результуючий баланс магнітних іонів виявився у користь октаедричної підгратки. Зменшення магнітних параметрів у зразку  $x = 0,6$  порівняно з  $x = 0,4$ , очевидно, пов'язане із

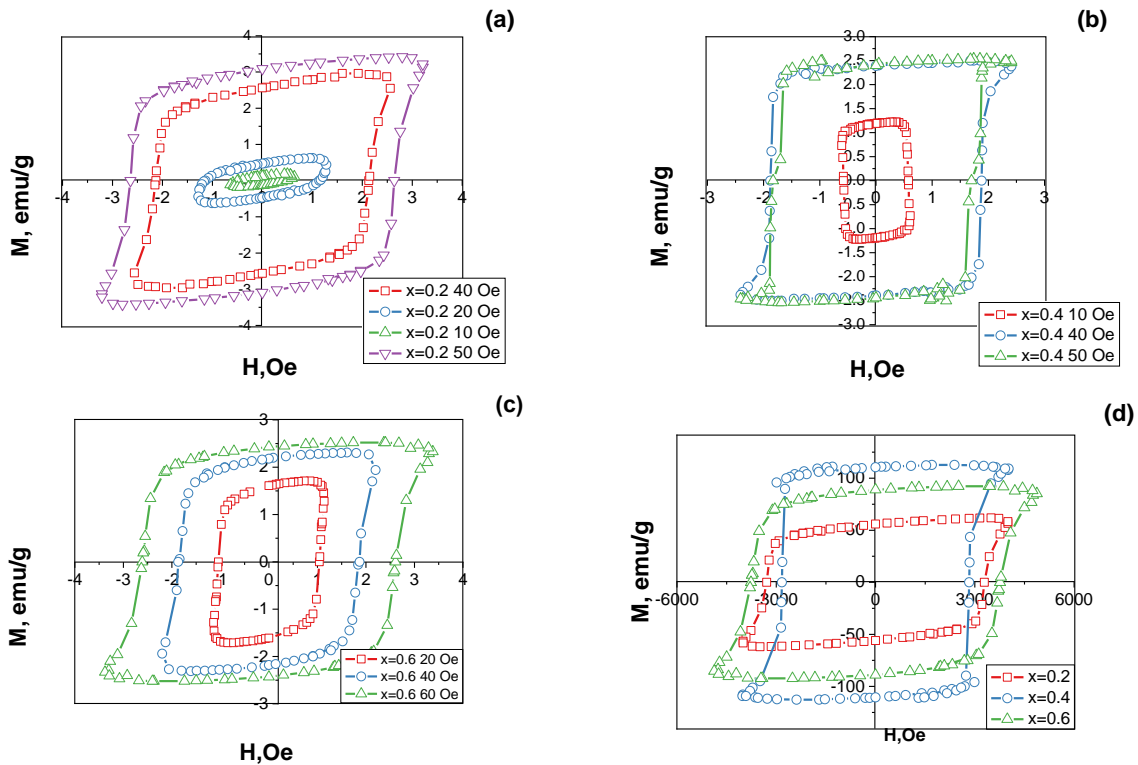


Рис. 6. Петлі гістерезису систем складу  $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$ .  $Li_{0.5}Fe_{2.3}Mg_{0.2}O_4$  (a),  $Li_{0.5}Fe_{2.1}Mg_{0.4}O_4$  (b),  $Li_{0.5}Fe_{1.9}Mg_{0.6}O_4$  (c), та (d) у зовнішньому магнітному полі 60 Е.

Таблиця 3

Магнітні параметри системи  $Li_{0.5}Fe_{2.3}Mg_{0.2}O_4$ ,  $Li_{0.5}Fe_{2.1}Mg_{0.4}O_4$ ,  $Li_{0.5}Fe_{1.9}Mg_{0.6}O_4$

Вміст магнію x	Молярна маса $\mu$	Коерцитивна сила $H_C$	Початкова магнітна проникність $M_R$	Намагніченість насичення $M_s$	Коефіцієнт анізотропії $K \times 10^3$	Ефективний магнітний момент $m_{ef}$	$M_R/M_s$
0,2	200,78	3289,7	33,35	36,8	126	1,32	0,91
0,4	194,46	2829,3	135,37	138,07	651	4,81	0,98
0,6	188,16	3763,9	97,95	101,57	398	3,43	0,96
похибки	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	1	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$

Розподіл іонів  $Fe^{3+}$  за підгратками в структурі синтезованих систем.

Вміст магнію x	Х-променеви́й аналіз		Магнітні вимірювання	
	А- підгратка	В- підгратка	А- підгратка	В- підгратка
0,2	0,92	1,38	1,0	1,28
0,4	0,84	1,26	0,57	1,53
0,6	0,76	1,14	0,61	1,29
похибки	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$

загальним зменшенням кількості магнітних іонів.

На підставі магнітних вимірювань, а саме за значенням магнітного моменту на формульну одиницю  $m_{ef}$  можна розрахувати вміст заліза в тетра (А) і окта (В) підгратках, що беруть участь у намагнічуванні. Порівняння розподілу заліза за підгратками згідно результатів Х-променевого аналізу і магнітних вимірювань наведені в таблиці 4.

Результати розрахунку розподілу заліза за тетра та октапідгратками в цілому співпадають. Дещо вищі значення вмісту заліза в тетрапідгратці для систем  $Li_{0,5}Fe_{2,1}Mg_{0,4}O_4$  та  $Li_{0,5}Fe_{1,9}Mg_{0,6}O_4$  за рентгеноструктурними даними, очевидно, пояснюються тим, що при високих значеннях заміщення немагнітними іонами деякі атоми заліза виявляються оточеними немагнітними сусідами в кількості більше трьох і виключаються з непрямої магнітної взаємодії. Підтвердженням цього є результати месбауерівської спектроскопії, згідно якої на месбауерівських спектрах спостерігається парамагнітний дублет. Таким чином, співпадіння результатів, виконаних незалежними методами, свідчить про достовірність отриманих результатів.

## Висновки

Апробовано метод золь-гель автоспалювання для синтезу однофазного магній-заміщеного літєвого фериту просторової групи  $Fd\bar{3}m$  з розмірами кристалітів 15 - 30 нм. Показано, що рН активного середовища при синтезі відіграє вирішальну роль у формуванні морфології отриманих систем. На підставі результатів Х-променевого аналізу показано, що катіони  $Li^+$  займають тільки В-позиції, тоді як іони  $Fe^{3+}$  і  $Mg^{2+}$  займають як А- так і В-підгратку. Іони заліза перерозподіляються по А- і В-підгратках у

співвідношенні приблизно 4:6, а іони магнію 8:2, відповідно. Переваги до В позиції вищевказаних іонів наступні:  $Li^+ > Fe^{3+} > Mg^{2+}$

Месбауерівські спектри  $^{57}Fe$  за кімнатної температури систем  $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Mg_xO_4$ , де  $x = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6$  і  $0,8$ , являють собою суперпозицію магніто-впорядкованої частини, представленої у вигляді двох секстиплетів, один з яких можна віднести до заліза в тетраедричному оточенні, а інший – у октаедричному і парамагнітного дублету, інтенсивність якого зростає із заміщенням. Значення ізомерного зсуву всіх досліджуваних систем знаходиться в околі 0,2 - 0,4 мм/с, що є ознакою присутності заліза в стані  $Fe^{3+}$  з електронною конфігурацією  $(3d^54s^0)$ . Значення квадрупольного розщеплення для всіх систем дуже мале (майже не відрізняється від нуля), що свідчить про те, що поле на ядрі є сферично-симетричне. Із збільшенням вмісту магнію поля на ядрах  $^{57}Fe$  зменшуються, причому в тетрапідгратці поле зменшується швидше, ніж в октапідгратці.

Магнітні характеристики немонотонно змінюються із заміщенням: зростають до значення ступеня заміщення 0,4, при подальшому збільшенні вмісту магнію, характер їх поведінки має тенденцію до зменшення. При заміщенні іони магнію перерозподіляються за підгратками шпінельної структури у відношенні 8:2 (8 – у тетрапідгратку) і в результаті баланс магнітних іонів складається на користь октаедричної підгратки. Пониження магнітних характеристик з подальшим заміщенням пов'язане із загальним зменшенням кількості магнітних іонів.

**Мазуренко Ю.С.** – к.ф.-м.н., асистент кафедри медичної інформатики, медичної та біологічної фізики.

- [1] T. Munawar, M.S. Nadeem, F. Mukhtar, A. Azhar, M. Hasan, K. Mahmood, A. Hussain, A. Ali, M.I. Arshad, M. Ajaz un Nabi, & F. Iqbal, *Physica B: Condensed Matter*. 602, 412555 (2021) (<https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412555>).
- [2] M.I. Arshad, S. Arshad, K. Mahmood, A. Ali, N. Amin, Umaid-ur-Rehman, M. Isa, A. Akram, N.Sabir, & M. Ajaz-un-Nabi, *Physica B: Condensed Matter*. 599, 412496 (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.physb.2020.412496>).
- [3] C. Ma, & Y. Zhang, *Separation and Purification Technology* 258, 118024 (2021) (<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118024>).
- [4] V.K. Jha, A.K. Sijo, S.N. Alam, & M. Roy, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 33(2), 455 (2019) (<https://doi.org/10.1007/s10948-019-05206-5>).
- [5] O.M. Uhorchuk, V.V. Uhorchuk, M.V. Karpets, & M.I. Hasyuk, *Journal of Nano- and Electronic Physics* 7(2), 1 (2015).

- [6] B.K. Ostafiychuk, I.M. Gasyuk, L.S. Kaikan, V.V. Ugorchuk, & P.O. Sulym, *Electrochemical Power Engineering* 11 (1), 18 (2011).
- [7] A.K. Sijo, N. Lakshmi, K. Venugopalan, D.P. Dutta, & V.K. Jain, *Advanced Porous Materials* 2(3), 189 (2015) (<https://doi.org/10.1166/apm.2014.1071>).
- [8] L.S. Kaykan, Ju.S. Mazurenko, & V.I. Makovysyn, *Applied Nanoscience* 10(8), 2739 (2020) (<https://doi.org/10.1007/s13204-020-01259-4>).
- [9] K. Ishii, S. Doi, R. Ise, T. Mandai, Y. Oaki, S. Yagi, & H. Imai, *Journal of Alloys and Compounds* 816, 152556 (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.15255>).
- [10] S. Ikram, J. Jacob, M.I. Arshad, K. Mahmood, A. Ali, N. Sabir, N. Amin, & S. Hussain, *Ceramics International* 45(3), 3563 (2019) (<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.015>).
- [11] A.K. Sijo, V.K. Jha, L.S. Kaykan, & D.P. Dutta, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 497, 166047 (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.166047>).
- [12] R. Singh Yadav, I. Kuřitka, J. Havlica, M. Hnatko, C. Alexander, J. Masilko, L. Kalina, M. Hajdúchová, J. Rusnak, & V. Enev, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 447, 48 (2018) (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.033>).
- [13] L. Kaykan, A.K. Sijo, A. Żywczak, J. Mazurenko, & K. Bandura, *Applied Nanoscience* 10(12), 4577 (2020) (<https://doi.org/10.1007/s13204-020-01413-y>).
- [14] K. Wiecezrak, A. Żywczak, J. Kanak, & P. Bała, *Materials Characterization* 132, 293 (2017) (<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.08.030>).
- [15] W. Maziarz, A. Wójcik, P. Czaja, A. Żywczak, J. Dutkiewicz, Ł. Hawelek, & E. Cesari, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 412, 123 (2016) (<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.03.089>).

Ju.S. Mazurenko

## Tailoring of Magnesium Substitution on Structure and Magnetic Properties of Lithium Ferrites

*Ivano-Frankivsk National Medical University, Ivano-Frankivsk, Ukraine, [yumazurenko@ifnmu.edu.ua](mailto:yumazurenko@ifnmu.edu.ua)*

In this study is reported influence of  $Mg^{2+}$  doping on structure and magnetic properties of nano-sized  $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$  (0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8) synthesized using sol-gel auto-combustion method. The X-ray diffractometric and Mössbauer data analysis of samples confirmed the formation of pure  $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$  nanoparticles ranges crystallite size from 15 nm to 35 nm. Iron ions are redistributed on the A and B sites in a ratio of approximately 4:6, and magnesium ions 8:2, respectively. The advantages of the B position of the above ions are as follows:  $Li^+ > Fe^{3+} > Mg^{2+}$ . RT-Mössbauer indicated the presence of  $^{57}Fe$  in both sublattices. Position identification was performed based on the distribution of the over exchange fields and isomeric shift data. Magnetic characteristics were obtained for rings made of synthesized material. They showed a non-monotonic dependence on the composition and found significantly higher rates compared to similar materials obtained by solid-phase synthesis.

**Keywords:** ferrites, sol-gel autocombustion, structural research, magnetic properties, spinels, soft magnets.