

Вплив заміщення на механізм провідності ультрадисперсних літій-залізних шпінелей, заміщених іонами магнію

Б.К. Остафійчук^{1,2}, Л.С. Кайкан¹, Ю.С. Мазуренко², Б.Я. Депутат³, С.В. Корень²

¹ Інститут металофізики імені Г.В. Курдюмова НАН України, бульвар Академіка Вернадського, 36, 03680 Київ, Україна.

² ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника", вул. Шевченка, 57, 76018 Івано-Франківськ, Україна

³ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, 76019 Івано-Франківськ, Україна

(Одержано 15.02.2017, у відредагованій формі – 14.04.2017, опубліковано online 16.10.2017)

Магній-заміщені літійові ферити загальної формули $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$, де $0.0 \leq x \leq 0.8$ були отримані методом золь-гель авто спалювання. Температурно-частотні залежності провідності синтезованих систем отримані в діапазоні частот від 0,01 до 10^5 Гц і в температурному околі від кімнатної до 723 К. Розраховані значення енергій активації показали, що при заміщенні їх значення зростає майже вдвічі порівняно з не заміщеним зразком.

Ключові слова: Наночерит, Механізм провідності, Імпеданс, Енергія активації.

DOI: 10.21272/jnep.9(5).05018

PACS numbers: 71.20.Nr, 72.15.Eb, 72.20.Pa, 77.22.Gm, 73.22.-f, 76.80.+y

1. ВСТУП

Отримання феритів з малим розміром частинок, вузьким розподілом частинок за розміром і мінімальною здатністю до агрегації є важливою задачею дослідників внаслідок того, що розміри феритових частинок є визначальними для отримання матеріалу з унікальними електричними чи магнітними властивостями, такими як суперпарамагнітних, одно доменних чи багато доменних частинок. Для отримання таких феритів застосовують ряд методів, таких як співосадження, золь-гель, гідротермальний і таке інше. В останні роки привертає до себе увагу синтез спалюванням для отримання однорідних, дуже дрібних, кристалізованих керамічних оксидних порошків [1, 2]. Цей метод є простий і не вимагає тривалого нагрівання, що є важливим у випадку сполук, що містять леткі компоненти.

Літійові ферити є важливі в технологічному плані як мікрохвильові ферити і ферити для комірок пам'яті. Літій вмісті ферити мають зазвичай особливі властивості такі як висока температура Кюрі, низька електропровідність, квадратна петля гістерезису і низька вартість. В структуру літійового фериту можна впровадити деякі мультивалентні іони для створення властивостей, необхідних для особливих застосувань. Заміщення тривалентного катіону є одним із найбільш поширених шляхів модифікацій матеріалу.

Дослідження літійових феритів, з домішками різних металів, таких як Ni , Mg , Mn , Ti , Zn , Co та інших проводилося рядом дослідників [3-6].

Під час синтезу феритів, особливо при використанні стандартної керамічної технології подвійного спікання можлива часткова втрата літію і утворення іонів заліза у двовалентному стані. Ці фактори є небажаними, оскільки порушується стехіометрія отриманого матеріалу, що впливає в свою чергу на властивості продукту. В даній роботі ми використали метод золь-гель авто спалювання для синтезу феритів,

в якому в результаті дуже малої тривалості процесу утворення (порядку кількох хвилин) втрати летких компонент значно зменшуються. Заміщення іонів заліза двовалентними іонами магнію повинні були б попередити утворення заліза у двовалентному стані, яке відіграє вирішальну роль у зростанні провідності отриманого матеріалу, яке є небажаним при використанні фериту.

В даній роботі представлено результати дослідження впливу заміщення двовалентних іонів Mg на DC і AC провідність Li феритів. На сьогоднішній день, на жаль, літератури, що стосується електричної провідності магній-заміщеного літійового фериту недостатньо, або і взагалі відсутня. Однак необхідність ретельного дослідження електричних властивостей таких феритів впливає з широкою можливістю їх застосування, оскільки заміщення дають змогу формувати необхідні електричні та магнітні властивості таких матеріалів.

В даній роботі ми провели систематичне дослідження електричної провідності магній-заміщених нанорозмірних літійових феритів як функції частоти і температури.

У той самий час, по-перше, Журнал є рецензованим, і кожний поданий рукопис проходить процедуру закритого рецензування. У випадку негативного висновку рецензентів, стаття не може бути опублікована. По-друге, від авторів вимагаються рукописи, виконані у вигляді максимально близькому до друкованого, тобто усі вимоги щодо оформлення статей потрібно суворо виконувати. Разом з рецензуванням за змістом кожен рукопис проходить технічну експертизу, і за умови незадовільного її висновку автоматично повертається авторам на доопрацювання.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджувані зразки загальної формули $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$, де $0.0 \leq x \leq 0.8$ були синтезовані

методом золь-гель авто спалювання, вихідними сполуками для якого служили нітрати літію, заліза та магнію і в якості палива виступала лимонна кислота. Рівень *pH* реакційного середовища контролювався додаванням розчину аміаку. Більш детально процес синтезу наведений в роботах [7, 8].

Дослідження електричної провідності проводились на імпедансному спектрометрі Autolab PGSTAT 12/FRA-2 в діапазоні частот 0,01 Гц-100 кГц. Температурні залежності провідності були отримані в діапазоні 293-773 К з кроком 50°.

3. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Проведений рентгенівський аналіз підтвердив однофазну структуру шпінельного типу для всіх отриманих зразків і приналежність їх до просторової групи *Fd3m*. Із збільшенням вмісту магнію значення сталої ґратки немонотонно збільшується від 8,33 (*x* = 0,2) до 8,36 Å (*x* = 0,8). Середній розмір кристалітів, визначений за методами Шеррера і Вільямсона-Холла коливається від 14,35 до 21,33 нм з активною площею поверхні в околі 200 м²/г [8].

Для синтезованих зразків досліджувалася зміна провідності з температурою, частотою і складом. На рис. 1 наведено відношення $\ln \sigma T$ від T^{-1} при різних частотах.

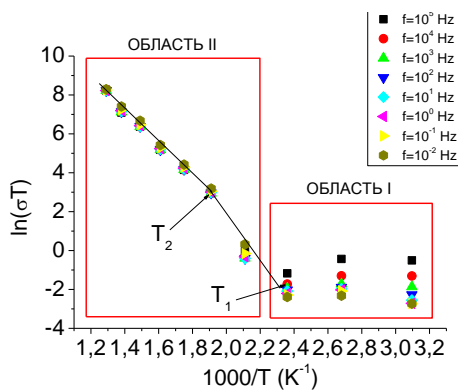


Рис. 1 – Залежності Арреніуса для частот 10⁻² до 10⁵ Гц у випадку системи складу $Li_{0,5}Fe_{2,3}Mg_{0,2}O_4$, синтезованого методом золь-гель авто спалювання.

Як видно з рисунку, провідність збільшується із збільшенням температури із зміною нахилу в області кімнатних температур і 423К (позначено стрілкою). Температурна залежність електричної провідності згідно стрибкового механізму задається співвідношенням:

$$\sigma = \frac{ne^2d^2\nu}{kT} \exp\left(\frac{-W_H}{kT}\right), \quad (1)$$

де *e* – заряд електрона, *n* – число носіїв заряду, *d* – довжина стрибка носія заряду як середня відстань між сусідніми октаедричними позиціями (~ 0,295 нм) [8] у досліджуваних сполуках, *k* – стала Больцмана, *ν* – гранична частота активації стрибкового процесу (з ГЧ спектрів розраховано, що вона приблизно рівна 1,7·10¹³ Гц на основі ГЧ абсорбційної зони В-позицій, записаних при 391 см⁻¹) [9], і *W_H* – енергія активації

перескоку. Величини *W_H* включає дві складові:

$$W_H = E_\mu + E_\sigma, \quad (2)$$

де *E_μ* – це термічна енергія активації рухливості і *E_σ* – енергію активації процесу провідності згідно зонної теорії напівпровідників і її можна розрахувати з рівняння Ареніуса:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_\sigma}{kT}\right). \quad (3)$$

Значення енергій активації *W_H*, *E_σ* і *E_μ* наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення енергії активації при різних частотах

<i>f</i> , Hz	<i>W_H</i> , eV	<i>E_σ</i> , eV	<i>E_μ</i> , eV
10 ⁵	0.67	0.572	0.09
10 ⁴	0.64	0.575	0.07
10 ³	0.61	0.573	0.04
10 ²	0.59	0.571	0.02
10 ¹	0.58	0.569	0.02
10 ⁰	0.58	0.567	0.02
10 ⁻¹	0.58	0.564	0.02
10 ⁻²	0.57	0.552	0.02

Провідність при низьких температурах (область 1) є наслідком дефектів включень і границь розділу. Ця провідність не залежить від температури, однак залежить від частоти – зі збільшенням частоти провідність зменшується. Це свідчить про те, що границі розділу нанодисперсної системи і домішки відіграють домінуючу роль провідності в області кімнатних і близьких до кімнатних температур. Залежність провідності від частоти в даній температурній області можна якісно пояснити на основі механізму поляризаційного процесу у фериті, механізм якого аналогічний процесу провідності в системах. Внаслідок електронного обміну $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+} + e^-$ виникає локальне зміщення електрона в напрямку прикладеного електричного поля. Ці зміщення визначають поляризацію фериту, а також і переміщення носія заряду у зразку. Відомо, що поляризація призводить до пониження електричного поля всередині зразка. Зменшення поляризації і, відповідно, зменшення провідності із збільшенням частоти має місце тому, що при певній частоті електричного поля електронний обмін між Fe^{2+} і Fe^{3+} не здійснюється внаслідок впливу прикладеного поля.

Для області температур II електрична провідність збільшується із збільшенням температури. Як видно з рис. 1, залежність змінює нахил в околі температури *T₂* в феритах зміна температури впливає на рухливість носіїв і майже не впливає на їх концентрацію (у досліджуваних феритах концентрація носіїв є майже сталою і складає значення порядку 10²² см⁻³). Саме в цьому полягає основна відмінність механізму провідності у феритах, порівняно з напівпровідниками. У феритах носії заряду локалізовані на магнітних іонах, в даному випадку на іонах залі-

за і провідність є наслідком обміну $3d$ -електронів від Fe^{3+} до Fe^{2+} . Таким чином, відповідальними за механізм провідності вданому околі температур є катіони заліза, локалізовані в октапідгратці.

В даній області температур спостерігається поділ залежності на дві частини. Провідність при вищій температурі не залежить від частоти і залежить від температури, а в низькочастотній області (однак вище T_1 , де $T_1 \approx (1/2)\theta_D$ «температура Дебая», яку можна розрахувати з ГЧ спектрів [9]) спостерігається залежність провідності від частоти (рис. 1.). На рис. 2 наведена зміна енергії активації провідності W_H з частотою, з якого видно, що W_H збільшується зі збільшенням частоти.

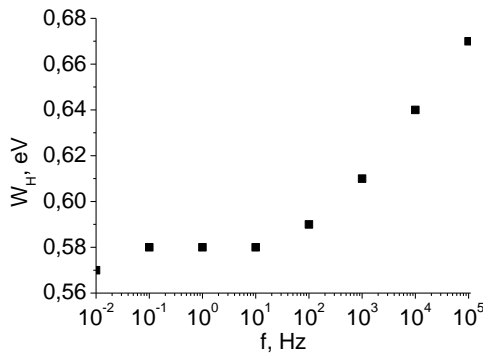


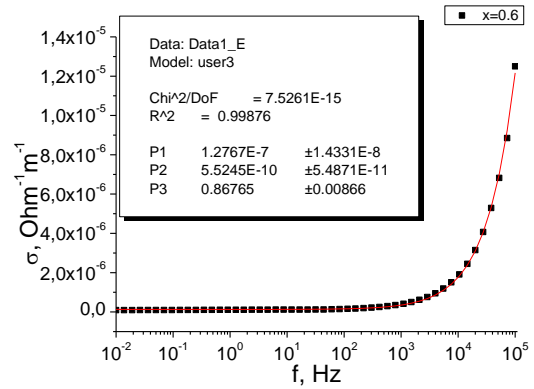
Рис. 2 – Зміна енергії активації провідності з частотою нанодисперсної системи складу $Li_{0.5}Fe_{2.3}Mg_{0.2}O_4$

Провідність феритів виявляє експоненціальну залежність від температури і в ряді випадків нахил залежності $\ln \sigma T$ від T^{-1} може змінюватись. Такі зміни нахилу можуть бути спричинені фазовими переходами (наприклад, перехід від феромагнітного до парамагнітного стану), трансформаціями структури і таке інше. Як показали результати рентгеноструктурного аналізу [8], заміщення іонів магнію зміни структури не викликає, однак енергія активації провідності з додаванням магнію збільшується майже вдвічі, порівняно з не заміщеним зразком (для $x = 0,0$ $W_H = 0,36$ [10], а для $x = 0,2$ $W_H = 0,57$ eV). Таке збільшення енергії активації також не може бути наслідком фазового переходу ферімагнетик-парамагнетик, оскільки досліджувані температури не досягають температури Кюрі. Таким чином, зміна енергії активації може бути пов'язана зі зміною рухливості носіїв, заряду, зміною їх концентрації, або зі зміною типу носіїв. Незаміщена система $Li_{0.5}Fe_{2.5}O_4$ має енергію активації 0,36 eV, тоді як енергія активації магній-заміщених феритів складає від 0,57 до 0,66 eV. Найбільш імовірно, таке збільшення енергії активації при заміщенні пов'язане зі зменшенням як кількості іонів змінної валентності (іонів заліза) так і збільшенням довжини стрибка, пов'язана як із збільшенням середньої відстані між сусідніми В-позиціями [11].

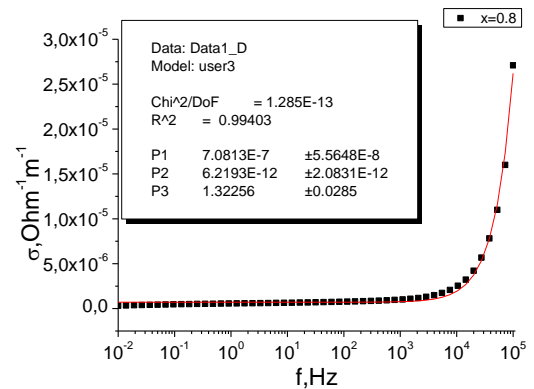
У багатьох феритах-шпінелях, заміщених і незаміщених, значення провідності $\sigma(\omega)$ змінюється за фрактально-степеневим законом, а саме

$\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s$ де s приймає значення 0,4-0,8 [12].

Залежність $\sigma(\omega)$ від логарифма частоти, отримана при кімнатній температурі для зразків для систем $x = 0,6$ і $x = 0,8$ наведена на рис.3. На вставці до рисунка наведено результати моделювання за фрактально-степеневим законом $\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s$. Значення змодельованого параметра s наведено в таблиці 2.



а



б

Рис. 3 – Залежність провідності від логарифма частоти систем $Li_{0.5}Fe_{1.9}Mg_{0.6}O_4$ (а) і $Li_{0.5}Fe_{1.7}Mg_{0.8}O_4$ (б) і її наближення за фрактально-степеневим законом $\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s$

Зміну σ з частотою зазвичай пояснюють на основі теореми Купса [13], згідно якої ферит розглядається як багатошаровий конденсатор, в ролі яких виступають зерна і границі зерен з різними властивостями. Вище певного значення частоти ($\sim 10^4$ Гц) вплив багатошарового конденсатора збільшується з частотою і в результаті збільшується провідність, яка є комплексною величиною

$$\tilde{\sigma} = \sigma' + i\sigma'' \tag{4}$$

де дійсну і уявну компоненти можна задати наступними співвідношеннями:

$$\sigma' = \frac{\sigma_0}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad \sigma'' = \frac{\sigma_0 \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \tag{5}$$

В низькочастотній області, $\omega\tau \ll 1$, $\sigma'' \ll \sigma'$. Тобто електрони виявляють переважно резистивний характер.

В області високих частот $\omega\tau \gg 1$, $\sigma'' \gg \sigma'$, електрони виявляють переважно індуктивний характер. Механізм електричної провідності можна пояснити на основі моделі перескоку електронів.

Стрибок електрона $Fe^{3+} \leftrightarrow Fe^{2+}$ має місце при перенесенні електрона між відповідними октаедричними позиціями (В-позиціями) в ґратці шпінелі. Таким чином, обмін електроном викликає локальне зміщення електронів в напрямку прикладеного поля.

Оскільки стрибковий механізм є основним у випадку магій-заміщеного літєвого фериту, частотна залежність провідності описується залежністю $\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s$, то значення s можна отримати з наступного співвідношення:

$$s = 1 - \frac{4}{\ln(v_{ph}/\omega)}. \quad (6)$$

На рис. 4 наведено залежність провідності від частоти в подвійному логарифмічному масштабі ($\log \sigma(\omega)$ від $\log \omega$). Як видно з рисунку, всі залежності можна розділити на області з різним кутом нахилу. Стрілкою відмічена область переходу. З даних залежностей отримано значення показника степеня s , значення якого для кожної системи також наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Розраховані значення s -фактору

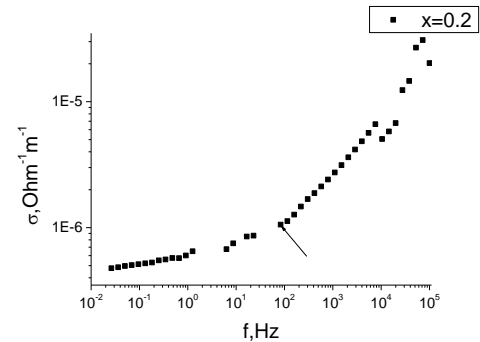
x	s Моделювання за законом $\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s$	s Із залежності $\log \tilde{\sigma}(\omega)$ від $\log \omega$	v_{ph}
0,4	0,54	0,48	$1,38 \cdot 10^9$
0,6	0,87	0,80	$9,43 \cdot 10^9$
0,8	1,32	1,22	$2,88 \cdot 10^{11}$

Для складів $x = 0,4$ і $x = 0,6$ для лінійної ділянки частотної залежності провідності була розрахована фоновна частота, значення якої також наведені в таблиці 2. Зразок з $x = 0,8$ показав значення $s > 1$, тобто виявив суперлінійну залежність (SPL) ($\sigma'(\omega)A\omega^s, s \geq 1$). Таким чином, спектр провідності можна описати модифікованим рівнянням а саме:

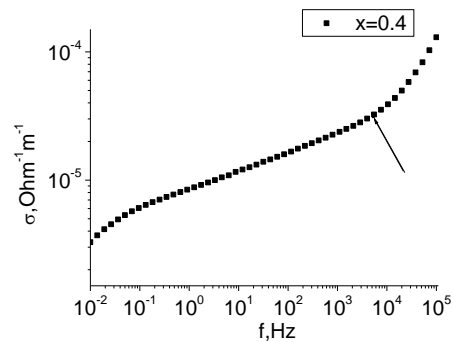
$$\sigma'(\omega) = \sigma_{dc} + A(T)\omega^n + B(T)\omega^m, \quad (7)$$

де другий доданок з $n < 1$ відповідає фрактально-степеневому закону (JPL), і третій член $B(T)$ є температурно залежний параметр з $m = 1$ для суперлінійної залежності. Перший член в рівнянні (3) σ_{dc} є добре відома dc провідність, що виникає за рахунок самовільного випадкового перескоку іонів, другий є JPL, що виникає внаслідок обмеженого перескоку іонів і третій є SPL, викликаний дворівневою системою [14] чи збудженням низько енергетичних мод коливаль. Для цього зразка фоновна частота була розрахована для області JPL із значенням $n = 0,32$.

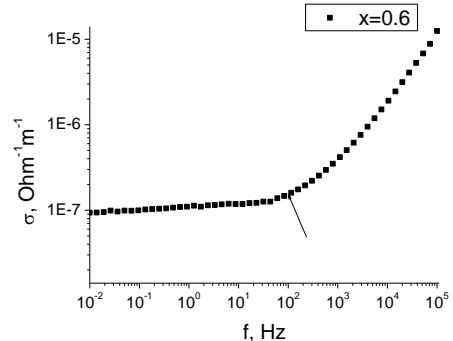
S -фактор був визначений із залежності провідності від частоти при кімнатній температурі для різного



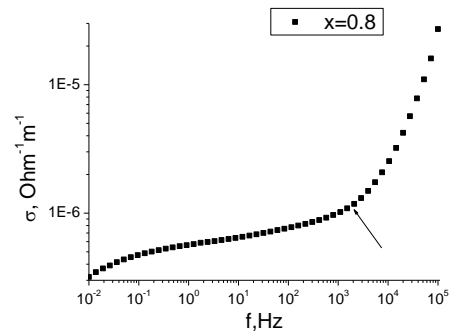
а



б



в



г

Рис. 4 – Залежність логарифма провідності від логарифма частоти нанодисперсних систем складу $Li_{0,5}Fe_{2,5-x}Mg_xO_4$, отриманих методом золь-гель авто спалювання

вмісту іонів магнію і також був отриманий як функція температури з співвідношення $\ln \sigma$ і T^{-1} . Як видно з таблиці 2 із збільшенням вмісту іонів магнію значення s -фактору збільшується і при $x = 0,8$ перевищує одиницю. Це є ознакою так званої суперлінійної залежності. Теоретичне пояснення для якої дається на основі моделі асиметричної подвійної потенціальної ями (ADWP) що є більш застосовною в низькочастотному і низькотемпературному діапазоні. Ця структурна модель ґрунтується на припущенні, що в системі груп атомів/іонів виникає одна з двох нееквівалентних позицій. Ідея полягає в тому, що атоми/іони в асиметричній подвійній потенціальній ямі розділені асиметрією енергії і висотою бар'єру. Модель передбачає, що при фіксованій температурі ac провідність матеріалу (зразок з $x = 0,8$) змінюється суперлінійно ($s > 1$) з частотою.

З аналізу провідності можна зробити висновок, що дві частоти переходу ω_{p1} і ω_{p2} відповідають переходу від dc до JPL і від JPL до SPL , які термічно активуються з енергіями E_{p1} , E_{p2} і мають особливий зв'язок з висотою бар'єру подвійної ями в моделі ADWP. Якщо енергії активації E_{p1} , E_{p2} відповідають висоті бар'єру двох асиметричних ям моделі ADWP, тоді різниця між ними є енергією асиметрії. Звідси випливає, що повний низькотемпературний

низькочастотний спектр можна описати модифікованою залежністю JPL , з обома лінійною і суперлінійною (SPL) залежностями провідності при низьких температурах.

4. ВИСНОВКИ

В області температур, близьких до кімнатної залежність логарифма провідності від оберненої температури не залежить від температури, однак залежить від частоти. із збільшенням частоти провідність зменшується. Дана провідність є наслідком дефектів включень і впливу границь розділу.

При заміщенні енергія активації провідності зростає, що є наслідком зменшення кількості іонів змінної валентності (іонів заліза) і збільшенням довжини стрибка, пов'язаної як із збільшенням середньої відстані між сусідніми В-позиціями, так із зменшенням іонів заліза, що має місце при заміщенні.

Показник степеня s фрактально-степеневого закону $\sigma(\omega) = \sigma_0 + A\omega^s$ збільшується із заміщенням і при $x = 0.8$ перевищує одиницю. Це є проявом суперлінійної залежності, пов'язаної з утворенням асиметричного подвійного енергетичного бар'єру.

Провідність при високих рівнях заміщення можна описати модифікованою залежністю, що включає в себе як фрактально-степеневу частину (з $n < 1$), так суперлінійну компоненту залежності (з $m = 1$).

Влияние замещения на механизм проводимости ультрадисперсных литий - железных шпинелей, замещенных ионами магния

Б.К. Остафийчук^{1,2}, Л.С. Кайкан¹, Ю.С. Мазуренко², Б.Я. Депутат³, С.В. Корень²

¹ *Институт металлофизики имени Г.В. Курдюмова НАН Украины, бульвар Академика Вернадского, 36, 03680 Киев, Украина.*

² *ДВНЗ "Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефанюка", ул. Шевченка, 57, 76018 Ивано-Франковск, Украина*

³ *Ивано - Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, 76019 Ивано-Франковск, Украина*

Магний-замещенные литиевые ферриты общей формулы $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$, где $0.0 \leq x \leq 0.8$ были получены методом золь-гель автогорения. Температурно-частотные зависимости проводимости синтезированных систем получены в диапазоне частот от 0,01 до 10^5 Гц и в области температур от комнатной до 723К. Полученные значения энергий активации показали, что при замещении их значения возрастают вдвое по сравнению с незамещенным образцом.

Ключевые слова: Наноферрит, Механизм проводимости, Импеданс, Энергия активации.

Effect of substitution on the mechanism of conductivity of ultra dispersed lithium - iron spinel, substituted with magnesium ions

B.K. Ostafiychuk^{1,2}, L.S. Kaykan¹, J.S. Mazurenko², B.Ya. Deputat³, S.V. Koren²

¹ *G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine, 36, Academician Vernadsky Boulevard, UA-03680 Kyiv-142, Ukraine*

² *Vasyl Stefanyk Precarpathian national university, 57, Shevchenko Str., 76018 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

³ *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Karpatska Str., 76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Magnesium-substituted lithium ferrites, general formula $Li_{0.5}Fe_{2.5-x}Mg_xO_4$, where $0.0 \leq x \leq 0.8$, were synthesized by sol-gel autocombusting method. The temperature-frequency dependences of the conductivity of the synthesized systems are obtained in the frequency range from 0.01 to 10^5 Hz and in the temperature range from room temperature to 723 K. Calculated values of the activation energies showed that, during substitution, activation energies values of the samples increase twice compared to the un-substituted samples.

Keywords: Nanoferrite, Conduction mechanism, Impedance, Activation energy.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. Aravind, M. Raghasudha, D. Ravinder, R. Vijaya Kumar, *J. Magn. Magn. Mater.* **406**, 110 (2016).
2. M. Raghasudha, D. Ravinder, P. Veerasomaiah, *J. Magn. Magn. Mater.* **355**, 210 (2014).
3. A.K.M. Akther Hussain, M. Seki, T. Kawai, H. Tabala, *J. Appl. Phys.* **96**, 1273 (2004).
4. M. George, S.S. Nair, A.M. John, P.A. Joy, M.R. Anantharaman, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 900 (2006).
5. T. Sasaki, S. Ohara, T. Naka, J. Vejpravova, V. Sechovsky, M. Umetsu, S. Takami, B. Jeyadevan, T. Adschiri, *J. Supercrit. Fluids.* **53**, 92 (2010).
6. D. Padalia, U.C. Johri, M.G.H. Zaidi, *Mater. Chem. Phys* **169**, 89 (2016).
7. Б.К. Остафійчук, Л.С. Кайкан, Ю.С. Кайкан, А.Б. Груб'як, М.О. Ніколюк, *ФХТТ* **17** No 1, 70 (2016) (B.K. Ostafiychuk, L.S. Kaykan, Yu.S. Kaykan, A.B. Hrubbyak, M.O. Nykolyuk, *Phys. Chem. Solid State* **17** No 1, 70 (2016)) [In Ukrainian].
8. B.K. Ostafiychuk, L.S. Kaykan, J.S. Kaykan, B.Ya. Deputat, O.V. Shevchuk, *Nanoscale. Res. Lett.* **12**, 237 (2017).
9. T.A. Elmosalami, *MSc. Thesis, Physics Department, Faculty of Science, Zagazig University* (2006).
10. O.M. Uhorchuk, V.V. Uhorchuk, M.V. Karpets, L.S. Kaykan, B.Ja. Deputat, A.M. Boychuk, M.I. Hasyuk, *J. Nano- Electron. Phys.* **7** No 2, 02012 (2015).
11. L.S. Kaykan, J.S. Kaykan, I.P. Yaremiy, O.M. Ugorchuk, B.Y. Deputat, M.O. Nykoliuk, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 4, 04066 (2016).
12. N.F. Mott, E.A. Davis, *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials* (Clarendon Press: Oxford, Great Britain: 1979).
13. M. Sertkol, Y. Koseoglu, A. Baykal, *J. Magn. Magn. Mater.* **322** No 7, 866 (2010).
14. P. Vijaya Bhasker Reddy, B. Ramesh, C. Gopal Reddy, *Physica B: Condensed Matter*, **405** No 7, 1852 (2010).