

Вплив температури на діелектричні властивості фериту CoFe_2O_4

В.С. Бушкова*, Б.К. Остафійчук, Т.О. Семко

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,
вул. Шевченка, 57, 76025 Івано-Франківськ, Україна

(Одержано 30.08.2016; опубліковано online 23.12.2016)

В роботі методом імпедансної спектроскопії досліджено температурно-частотні залежності діелектричних констант фериту кобальту, одержаного методом золь-гель за участі автогоріння. Встановлено, що хід кривих, представлених в координатах Найквіста, залежить від температури. З ростом частоти дійсна ϵ' та уявна ϵ'' складові діелектричної проникності зменшуються завдяки механізму поляризаційного процесу, що є характерним для феритів. На частотній залежності тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta$ за температури 298 К при $f = 56$ Гц виявлено максимум, так як за цієї частоти частота перескоку носіїв заряду співпадає з частотою прикладеного зовнішнього поля. Показано, що зі зростанням температури також збільшується питома провідність фериту CoFe_2O_4 . Залежність $\sigma(f)$ свідчить про існування в досліджуваному зразку електропровідності постійного струму, вклад якої в діелектричний відгук значно зростає з температурою. Встановлено, що енергія активації носіїв заряду ΔE_A становить 0,49 еВ.

Ключові слова: Золь-гель технологія, Ферит кобальту, Імпедансна спектроскопія, Діелектрична проникність, Питома провідність, Енергія активації.

DOI: 10.21272/jnep.8(4(2)).04069

PACS numbers: 75.50.Tt, 43.58.Bh,
77.22. – d, 72.80.Le

1. ВСТУП

За реакцією на зовнішнє магнітне поле і характером внутрішнього магнітного впорядкування всі речовини в природі можна поділити на п'ять груп [1]: діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики і феримагнетики. Перерахованим видам магнетиків відповідає п'ять різних видів магнітного стану речовини: діамагнетизм, парамагнетизм, феромагнетизм, антиферомагнетизм і феримагнетизм.

До феримагнетиків відносять речовини, магнітні властивості яких обумовлені некомпенсованим антиферомагнетизмом. Так, як феромагнетики, вони володіють високою магнітною сприйнятливістю, яка істотно залежить від напруженості магнітного поля і температури. Поряд з цим, феримагнетики характеризуються і рядом істотних відмінностей від феромагнітних матеріалів. Властивостями феримагнетиків володіють деякі впорядковані металеві сплави, але, головним чином, – різні оксидні сполуки, серед яких найбільший практичний інтерес представляють ферити [2].

Сучасні пристрої зв'язку використовують багато деталей з феритовими сердечниками [3, 4]. Ферити задовольняють серйозним вимогам, що висувають до сучасних елементів пристроїв зв'язку, а також знаходять й інші застосування [5-7]. Це, наприклад, феритові антени, односпрямовані ізолятори хвилеводів, модулятори мікрохвиль. Виготовлення феритів різного складу збільшує можливості їх використання, завдяки чому ферити переступили межі області застосування, для якої вони були спочатку розроблені, і стали використовуватися в техніці ЕОМ, в техніці регулювання вимірювань, а також в атомній техніці.

Ферит кобальту відомий як магніто-твердий ма-

теріал з високою коерцитивною силою та низькою намагніченістю. Ці властивості, разом з високою фізичною та хімічною стабільністю, сприяють його використанню в пристроях накопичення інформації, а також в магнітно-оптичних та магнітно-електричних пристроях [8-11].

Дана робота присвячена вивченню температурно-частотних залежностей діелектричних властивостей фериту складу CoFe_2O_4 , отриманого з використанням методу золь-гель за участі автогоріння (ЗГА) [12].

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Порошок фериту CoFe_2O_4 було отримано за допомогою ЗГА методу. Фазовий склад контролювався за допомогою X-променевого аналізу, який проводився за допомогою дифрактометра ДРОН-3 з використанням $\text{Cu}(K\alpha)$ -випромінювання в діапазоні кутів сканування $20^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ з кроком $0,02^\circ$. Згідно проведеного аналізу піки дифрактограми вказують на наявність кубічної структури шпінелі просторової групи $Fd\bar{3}m$ [13].

Феритовий брикет із діаметром 0,8 см та висотою 0,12 см отримано шляхом пресування при 30 кН синтезованого порошку з додаванням в'язучої речовини – 10 % розчину полівінілового спирту. Даний зразок піддавався спіканню за температури 1300°C протягом 5 годин в атмосфері повітря з повільним охолодженням. Після спікання та шліфування, отримано брикет фериту кобальту з наступними геометричними розмірами: 0,68 см – діаметр і 0,1 см – висота. Таким чином, лінійне ущільнення $\Delta L/L$ зразка становило 0,15.

Для виконання імпедансних досліджень було виготовлено конденсаторну систему – графітовий електрод/феритовий брикет/графітовий електрод. Діелектричні та провідні характеристики до-

* bushkovavira@gmail.com

сліджуваного феритового зразка визначались за параметрами комплексного імпедансу:

$$Z = Z' - jZ'' \tag{1}$$

де Z' , Z'' – дійсна та уявна частини комплексного імпедансу, j – уявна одиниця, вимірювання якого проводилось з використанням спектрометра Autolab PGSTAT 12/FRA-2 в діапазоні частот 10^{-2} - 10^6 Гц. Температурні вимірювання здійснювали в інтервалі від 298 К до 723 К з кроком 25 К за допомогою електричної печі SNOL 7.2/1100.

З урахуванням геометричних параметрів зразка було розраховано питомі значення опорів та частотні залежності електричних параметрів:

$$\rho = \rho' - j\rho'' \tag{2}$$

$$\rho' = \frac{S}{h} Z', \quad \rho'' = \frac{S}{h} Z'' \tag{3}$$

де S і h – площа основи і висота зразка відповідно.

Комплексну питому провідність було визначено із наступного співвідношення:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \sigma' + j\sigma'' \tag{4}$$

$$\sigma' = \frac{\rho'}{M}, \quad \sigma'' = \frac{\rho''}{M} \tag{5}$$

$$M = \left(\frac{S}{h}\right)^2 \cdot |Z|^2 \tag{6}$$

Аналогічно, за вимірними значеннями Z' і Z'' визначалися дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності за допомогою співвідношень:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{7}$$

$$\varepsilon' = \frac{\rho''}{M\omega\varepsilon_0} = \frac{h}{S|Z|^2\omega\varepsilon_0} \cdot Z'' \tag{8}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\rho'}{M\omega\varepsilon_0} = \frac{h}{S|Z|^2\omega\varepsilon_0} \cdot Z' \tag{9}$$

де $\omega = 2\pi f$, ε_0 – діелектрична проникність вакууму.

Діелектричні втрати розраховано за формулою:

$$\text{tg } \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{10}$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Температурна характеристика кривих годографів імпедансу

На рис. 1 наведено годографи імпедансу $Z'' = f(Z')$. Характер кривих, представлених в координатах Найквіста, залежать від температури. Наприклад, залежності $Z''(Z')$ в діапазоні температур 298-373 К являють собою петлю, що складається

з двох півкіл. Перша область відповідає за вклад в діелектричний відгук об'єму зерен зразка. Наявність другої області, що розташована правіше попередньої, може бути пов'язана з вкладом в діелектричний відгук границь зерен чи інших електричних бар'єрів [14].

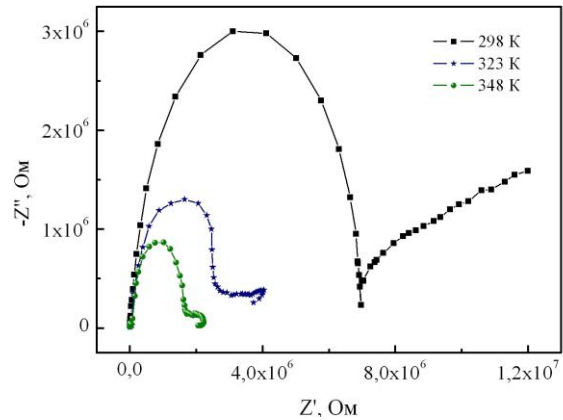


Рис. 1 – Температурні залежності годографів імпедансу CoFe_2O_4

Зі збільшенням температури друга область на діаграмі Найквіста звужується і за температури 398 К зовсім зникає (рис. 2).

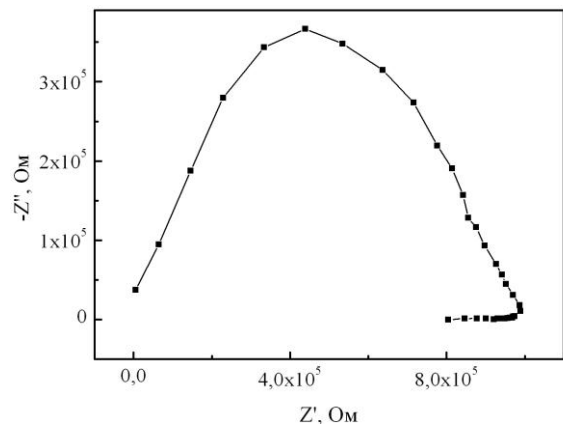


Рис. 2 – Діаграма Найквіста за температури 398 К

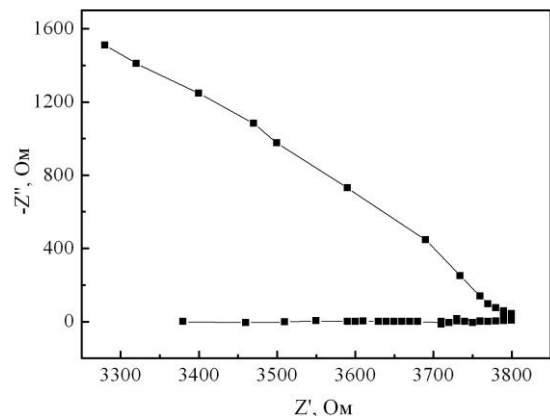


Рис. 3 – Залежність $Z''(Z')$ за температури 548 К

Подібний характер залежності $Z''(Z')$ спостерігається до $T = 448$ К включно. Вже за температури ≥ 473 К діаграма Найквіста (рис. 3) змінює свій вигляд і схожа на гострий кут, величина якого стано-

вить близько 45° , а за температури ≥ 673 К залежність $Z''(Z')$ являє собою криву, яка, за виглядом, наближається до прямого кута (рис. 4).

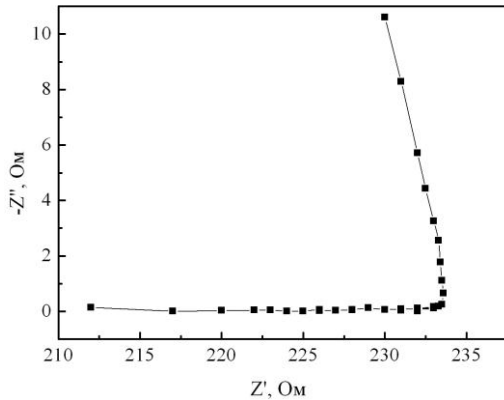


Рис. 4 – Частотний спектр імпедансу за температури 698 К

Аналіз діаграм $Z''(Z')$ показав, що значення опору фериту кобальту значно зменшується з підвищенням температури, що, власне, і є характерним для напівпровідників.

3.2 Діелектричні втрати у фериті кобальту

На рис. 5 наведено частотні залежності дійсної ϵ' та уявної ϵ'' частин комплексної діелектричної проникності за температури 298 К. Основною тенденцією є те, що за всіх температур значення ϵ' та ϵ'' зменшуються з ростом частоти.

Такий характер поведінки дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності пояснюється за допомогою механізму поляризаційного процесу у феритах. Завдяки електронному обміну $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$ виникає локальне зміщення електрона, що впливає на поляризацію у фериті [15], в напрямку прикладеного електричного поля. Із збільшенням частоти поляризація зменшується внаслідок того, що за певної частоти електричного поля не відбувається електронний обмін між йонами Fe^{2+} і Fe^{3+} завдяки впливу прикладеного поля.

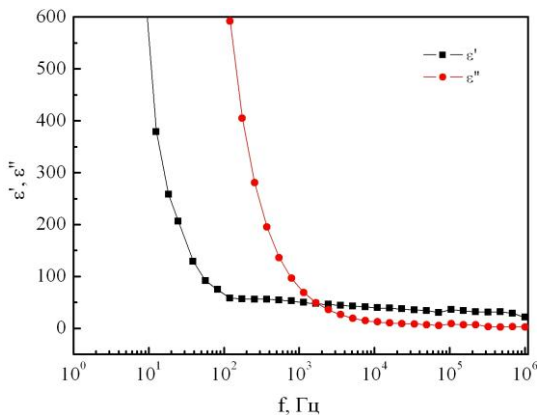


Рис. 5 – Залежність дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності при різних частотах

З рис. 5 чітко видно, що при $f > 1,67$ кГц тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta < 1$. Варто відмітити, що зі збільшенням температури вищевказана частота зростає. Так, наприклад, за температури 323 К ця

частота становить 5,25 кГц, а за $T = 348$ К – 7,54 кГц. Тому ферит кобальту за величиною параметра $\text{tg } \delta$ при частотах, вищих за 10^3 Гц, може конкурувати зі звичайними діелектриками.

На рис. 6 зображено частотну залежність тангенса кута діелектричних втрат за температури 298 К. З даного рисунка видно, що при $f = 56$ Гц спостерігається різкий максимум, величина якого дорівнює 30.

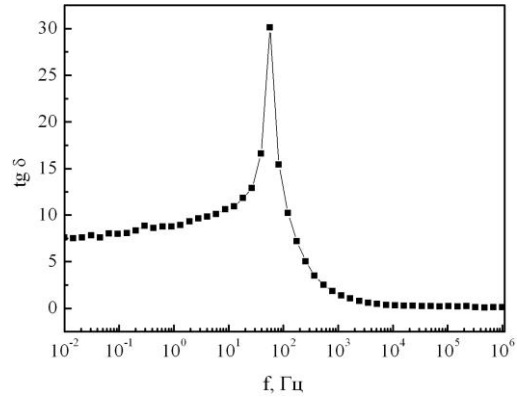


Рис. 6 – Частотна залежність тангенса втрат

На рис. 7 наведено залежність тангенса втрат від частоти для різних температур. З рисунка видно, для вказаних температур спостерігається загальна тенденція зменшення величини діелектричних втрат зі збільшенням частоти. При цьому, варто зауважити, що за температури 323 К при $f = 56$ Гц на графіку присутній пік, який слабший за інтенсивністю і дорівнює 26. Разом з цим за $T = 348$ К, окрім піку на вищевказаній частоті, спостерігається ще один пік при частоті 255 Гц, який за температури 373 К є значно інтенсивнішим. Однак, при $T \geq 398$ К пік на частоті 56 Гц зовсім зникає, а інтенсивність другого піку зростає зі збільшенням температури дослідження зразка CoFe_2O_4 (рис. 8). Причиною такої залежності тангенса втрат може бути наступне: зі збільшенням температури максимум при частоті 255 Гц з'являється внаслідок ймовірної активації руху дефектів на границях зерен в бік поверхні, що є проявом міжзеренної поляризації.

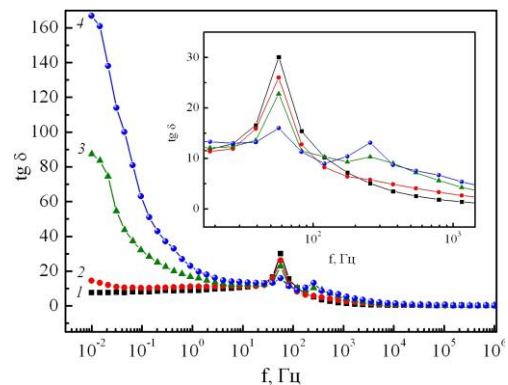


Рис. 7 – Частотна залежність $\text{tg } \delta$: 1 – 298 К, 2 – 323 К, 3 – 348 К, 4 – 373 К

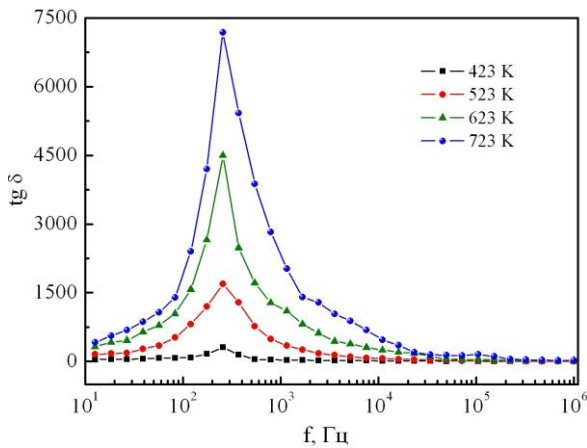


Рис. 8 – Тангенс кута діелектричних втрат як функція частоти за різних температур

В роботі [16] автори для літій-магнієвих феритів також зафіксували пік в області 50 Гц за кімнатної температури. Відомо [17], що, в основному, максимум на частотній залежності тангенса втрат виникає в тому випадку, коли частота перескоку носіїв заряду співпадає з частотою прикладеного зовнішнього поля.

3.3 Вивчення діелектричної проникності CoFe_2O_4 в залежності від температури

Для феритів характерна відносно велика діелектрична проникність, яка залежить від частоти, температури і, насамперед, від складу матеріалу. З підвищенням частоти, як правило, діелектрична проникність феритів падає. Так, наприклад, за кімнатної температури дійсна частина відносної діелектричної проникності фериту кобальту при частоті 10 Гц дорівнює 550, при $f = 10^2$ Гц становить 66, а при $f = 10^3$ Гц – 40.

Експериментальні дані зміни дійсної частини діелектричної проникності з температурою на різних частотах наведено на рис. 9. Для всіх частот ϵ' в інтервалі температур 298-623 К монотонно зростає зі збільшенням температури, проте, в діапазоні температур 623-698 К спостерігається різке збільшення діелектричної проникності. На частоті 10^{-2} Гц крива $\epsilon'(T)$ має максимум за температури 673 К, а на частоті 10^6 Гц – за $T = 698$ К. Таким чином, зміна дійсної частини діелектричної проникності з температурою має максимум в області високих температур, який, зі збільшенням частоти, зсувається в область вищих температур. Великий вплив на поляризаційні властивості феритів надають йони змінної валентності. Зазвичай, зростання діелектричної проникності матеріалу спостерігається зі збільшенням їх концентрації.

Відомо [18, 19], що в полікристалічних феритах діелектрична провідність, так само як і питома провідність, залежить від структури, наприклад, від розміру зерен зразка, яка, в свою чергу, залежить від способу синтезу та складу феритів. На відміну від зерен, їх межі володіють підвищеною концентрацією вакансій та інших неоднорідностей, що, значною мірою, впливає на електрофізичні властивості феритів. Чим більше є у феритах йонних вакансій і слабкозв'язаних електронів, тим більше число диполів

ними утворяться, і тим вищою буде діелектрична проникність. Очевидно, оптимальною для утворення таких диполів на межах зерен є температура в діапазоні 673-698 К в залежності від частоти, що і призводить до різкого зростання значення дійсної частини діелектричної проникності фериту кобальту.

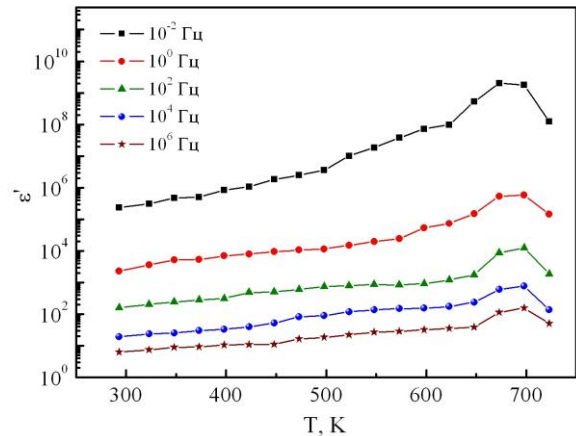


Рис. 9 – Залежність дійсної частини діелектричної проникності від температури за різних частот

На рис. 10 показано температурну залежність уявної частини діелектричної проникності. Видно, що вони описуються плавними кривими, хід яких залежить від частоти. При низьких частотах спостерігається круте зростання ϵ'' .

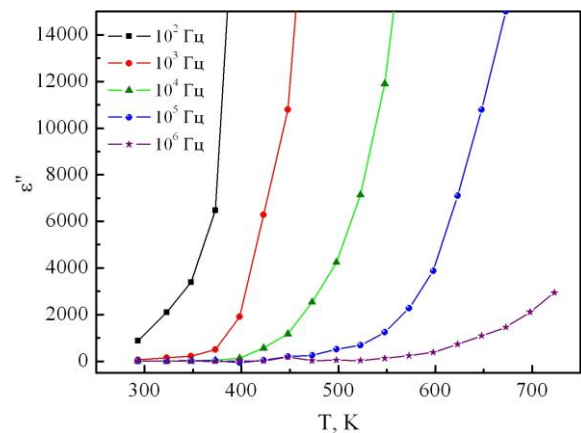


Рис. 10 – Залежність уявної частини діелектричної проникності від температури за різних частот

Така частотна залежність ϵ'' є наслідком поляризації меж зерен, яка базується на двошаровій моделі Максвелла-Вагнера. Внаслідок структурної неоднорідності у феритах виникає зерномежова поляризація. Завдяки існуванню вільних зарядів, електрони, які здійснюють перескоки при низькій частоті, можуть бути захоплені неоднорідностями [20], які перешкоджають вільному переносу електричних зарядів у зразку, в результаті чого останні накопичуються в деяких визначених його ділянках. Збільшення ϵ'' з ростом температури при певній частоті є наслідком зменшення опору феритів. Внаслідок низького опору, що сприяє електронним перескокам, і спостерігається вища поляризованість, тобто збільшується величина ϵ'' .

3.4 Температурна залежність питомої провідності фериту

За електричними властивостями ферити відносяться до класу напівпровідників. Їх електропровідність обумовлена процесами електронного обміну між йонами змінної валентності. Електрони, що беруть участь в обміні, можна розглядати як носії заряду, концентрація яких практично не залежить від температури. Разом з тим, при підвищенні температури експоненціально збільшується ймовірність перескоку електронів між йонами змінної валентності, тобто зростає рухливість носіїв заряду. Тому температурну зміну питомої провідності феритів з достатньою для практичних цілей точністю можна описати наступною формулою:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_A}{kT}\right), \quad (11)$$

де σ_0 – передекспоненційний множник, який не залежить від температури, ΔE_A – енергія активації носіїв постійного струму, k – стала Больцмана.

На рис. 11, а представлено частотну залежність дійсної частини питомої провідності в логарифмічних координатах. За кімнатної температури при $f > 10^3$ Гц залежність $\sigma'(f)$ починає зростати. Відхилення від лінійності частотної залежності дійсної частини електропровідності спостерігається для випадку, коли $T \leq 523$ К, причому частота відхилення від лінійності збільшується з ростом температури, а за $T \geq 548$ К (рис. 11, б) вищевказана залежність виходить на плато. Це свідчить про те, що в досліджуваному фериті має місце електропровідність на постійному струмі, вклад якої в діелектричний відгук зростає з температурою і стає домінуючим за $T \geq 548$ К.

Частотна залежність дійсної складової питомої електропровідності описується за допомогою релаксаційної формули Дебая:

$$\sigma = \sigma_{dc} + A\omega^n, \quad (12)$$

де A і n – параметри, що залежать від температури та складу. За поляризаційну складову питомої електропровідності відповідає доданок $A\omega^n$. Коефіцієнт пропорційності A визначається формулою:

$$A = \frac{nq^2\delta^2v}{6k}, \quad (13)$$

де v – частота коливань йонів у вузлах кристалічної ґратки, n , q і δ – відповідно концентрація, заряд і довжина вільного пробігу носіїв, k – стала Больцмана.

Величину σ_{dc} для CoFe_2O_4 за різних температур оцінено з використанням діаграм $\sigma''(\sigma')$ шляхом екстраполяції співвідношень між σ'' і σ' , які в області низьких частот мають вигляд відрізків прямих, до перетину з віссю абсцис (рис. 12).

3.5 Визначення енергії активації носіїв струму

Серед багатьох факторів, що впливають на електричний опір феритів, основним є концентрація в

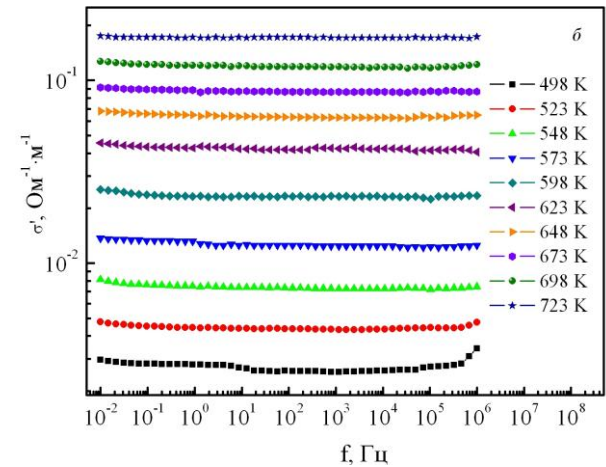
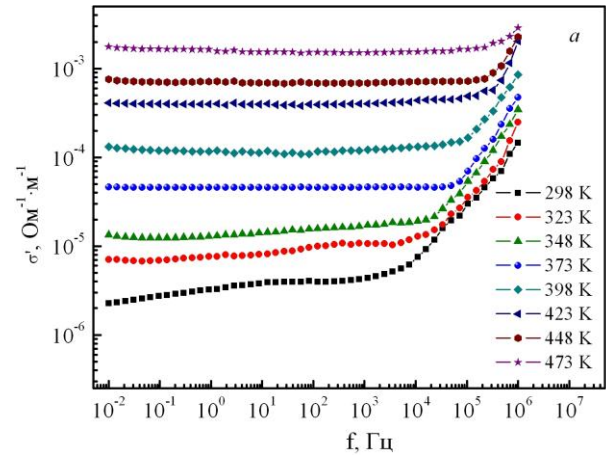


Рис. 11 – Частотна залежність дійсної складової питомої провідності фериту кобальту за різних температур: а – $T \leq 473$ К, б – $T \geq 498$ К

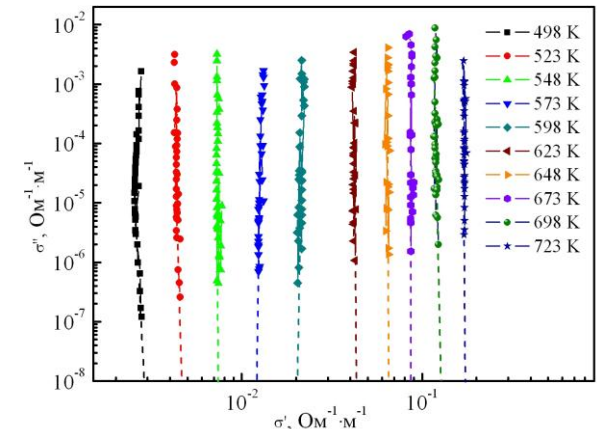


Рис. 12 – Діаграми $\sigma''(\sigma')$ за $T \geq 498$ К

них йонів двовалентного заліза Fe^{2+} . Під впливом теплового руху слабкоз'язані електрони перескакують від йонів заліза Fe^{2+} до йонів Fe^{3+} і знижують валентність останніх. Із збільшенням концентрації двовалентних йонів заліза лінійно зростає провідність матеріалу і одночасно зменшується енергія активації ΔE_A . Для фериту кобальту також можливим є обмін джок між йонами Co^{2+} та Co^{3+} [21]. Звідси випливає, що при зближенні йонів змінної валентності знижується висота енергетичних бар'єрів, які

повинні долати електрони при переході від одного йона до сусіднього. Зазвичай у феритів-шпінелей енергія активації електропровідності лежить в межах від 0,1 до 0,5 еВ. Найбільшою концентрацією йонів двовалентного заліза і, відповідно, найменшим питомим опором володіє магнетит Fe_3O_4 , у якого $\rho = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [22].

На рис. 13 представлено залежність $\ln(\sigma_{dc})$ від оберненої температури. З рисунка видно, що вищевказана залежність у координатах Ареніуса є лінійною. Наявність прямолінійної ділянки на температурній залежності питомої провідності, представленої в координатах $\ln(\sigma_{dc})$ від $10^3/T$, є свідченням реалізації активаційного механізму електропровідності.

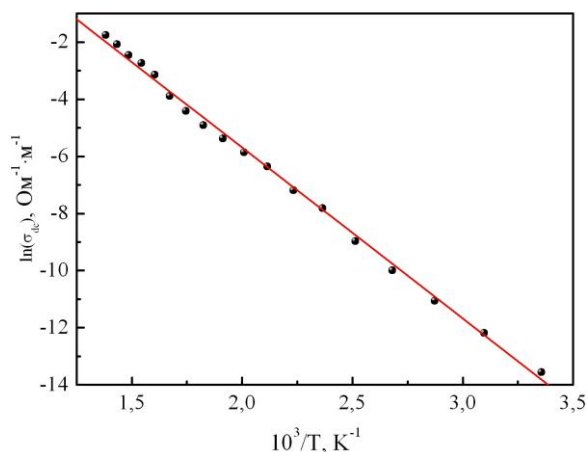


Рис. 13 – Залежність логарифма питомої провідності постійного струму від оберненої температури

Величину енергії активації розраховано за формулою:

$$\Delta E_A = \frac{kT_1T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (14)$$

де $T_1 = 723 \text{ K}$, $T_2 = 298 \text{ K}$, σ_1 , σ_2 – питомі провідності

на постійному струмі, що відповідають вказаним температурам.

Розрахунки показали, що $\Delta E_A = 0,49 \text{ eV}$. Лінійний ріст dc – провідності з температурою зафіксували автори роботи [23], які досліджували ферит NiFe_2O_4 , отриманий за допомогою механохімічного методу синтезу, при цьому енергія активації носіїв заряду становила 0,45 еВ. Разом з цим, в роботі [24] було зафіксовано, що для цього ж складу фериту, отриманого золь-гель синтезом, $\Delta E_A = 0,58 \text{ eV}$.

4. ВИСНОВКИ

Таким чином, дослідження діелектричних характеристик, знайдених із аналізу імпеданс-спектрів за різних температур, дозволило виявити закономірності їх зміни в залежності від частоти. Судячи з діаграм Найквіста, з підвищенням температури значно зменшуються значення опору фериту кобальту.

Температурна залежність діелектричних характеристик фериту кобальту пов'язана з процесом термічного збудження носіїв заряду. Таким чином, на поляризацію у фериті CoFe_2O_4 впливає електронний обмін між йонами Fe^{2+} та Fe^{3+} . Окрім цього, немонотонний характер температурної залежності дійсної частини діелектричної проникності свідчить про існування внеску в поляризацію процесів на межах зерен, який проявляється в околі температур 673 – 698 К.

Характерне зростання $\text{tg } \delta$ при зниженні частоти є ознакою присутності dc – електропровідності. З діаграм $\sigma''(\sigma')$ оцінена величина σ_{dc} як функція від температури, поведінка якої добре описується експоненціальним законом, тобто dc – електропровідність закономірно зростає зі збільшенням температури. За результатами вимірювання провідності постійного струму шпінелі CoFe_2O_4 знайдено енергію активації носіїв заряду, яка для досліджуваного інтервалу температури становить 0,49 еВ.

Effect of Temperature on the Dielectric Properties of CoFe_2O_4 Ferrite

V.S. Bushkova, B.K. Ostafiychuk, T.O. Semko

Vasyl Stefanyk Pre-Carpathian National University, 57, Shevchenko st., 76025 Ivano-Frankivsk, Ukraine

In work the temperature-frequency dependence of the dielectric constants cobalt ferrite prepared by sol-gel participation of auto-combustion was studied by method of impedance spectroscopy. It was found that course of curves represented in coordinates Nyquist, depends on temperature. With increasing frequency the real ϵ' and imaginary ϵ'' components of the dielectric permeability decreases through a process of polarization process that is characteristic of the ferrites. In the frequency dependence of the dielectric loss tangent $\text{tg } \delta$ at a temperature of 298 K at $f = 56 \text{ Hz}$ detected maximum because for this frequency frequency hopping carriers coincides with the frequency of the applied external field. It is shown that with increasing temperature also increases conductivity ferrite CoFe_2O_4 . The dependence of $\sigma(f)$ indicates the existence of conductivity direct current in the sample, which contributed to the significantly increasing of dielectric response with increasing of temperature. It was established that the activation energy carriers ΔE_A is 0.49 eV.

Keywords: Sol-gel technology, Cobalt ferrite, Impedance spectroscopy, Dielectric permeability, Specific conductivity, Activation energy.

Влияние температуры на диэлектрические свойства феррита CoFe_2O_4

В.С. Бушкова, Б.К. Остафийчук, Т.О. Семко

ГВНЗ «Прикарпатский национальный университет имени Василия Стефаника»,
ул. Шевченко, 57, 76025 Ивано-Франковск, Украина

В работе методом импедансной спектроскопии исследованы температурно-частотные зависимости диэлектрических констант феррита кобальта, полученного методом золь-гель с участием автогорения. Установлено, что ход кривых, представленных в координатах Найквиста, зависит от температуры. С ростом частоты действительная ϵ' и мнимая ϵ'' составляющие диэлектрической проницаемости уменьшаются благодаря механизму поляризационного процесса, что характерно для ферритов. На частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ при температуре 298 К при $f = 56$ Гц обнаружено максимум, так как при этой частоте частота перескока носителей заряда совпадает с частотой приложенного внешнего поля. Показано, что с ростом температуры также увеличивается удельная проводимость феррита CoFe_2O_4 . Зависимость $\sigma(f)$ свидетельствует о существовании в исследуемом образце электропроводности постоянного тока, вклад которой в диэлектрический отклик значительно возрастает с температурой. Установлено, что энергия активации носителей заряда ΔE_A составляет 0,49 эВ.

Ключевые слова: Золь-гель технология, Феррит кобальта, Импедансная спектроскопия, Диэлектрическая проницаемость, Удельная проводимость, Энергия активации.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.А. Боков, *Физика магнитных материалов* (Санкт-Петербург: Невский диалект: 2002) (V.A. Bokov, *Fizika magnitnykh materialov* (Sankt-Peterburg: Nevskiy dialekt: 2002)).
2. Y.H. Hou, Y.J. Zhao, Z.W. Liu, H.Y. Yu, X.C. Zhong, W.Q. Qiu, D.C. Zeng, L.S. Wen, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 44 (2010).
3. С. Крупицка, *Физика ферритов и родственных им материалов* (Мир: Москва: 1976) (S. Krupichka, *Fizika ferritov i rodstvennykh im materialov* (Mir: Moskva: 1976)).
4. P. Zbigniew, *J. Eur. Ceramic Soc.* **24**, 1053 (2004).
5. Q. Song, Z.J. Zhang, *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 6164 (2004).
6. M.A. Ahmed, N. Okasha, L. Salah, *J. Magn. Magn. Mater.* **264**, 241 (2003).
7. X. Cao, L. Gu, *Adv. Nan. Phy.* **16**, 180 (2005).
8. J. Ding, Y.J. Chen, Y. Shi, S. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **77**, 6398 (1995).
9. Y. Suzuki, R.B. Van Dover, E.M. Gyorgy, J.M. Philips, V. Korenivski, D.J. Werder, C.H. Chen, R.J. Cava, J.J. Krajewski, W.F. Peck, K.B. Do, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 714 (1996).
10. J. Ding, T. Reynold, W.F. Miao, P.G. McCormick, R. Street, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 7074 (1994).
11. B. Zhou, Y.W. Zhang, Y.J. Yu, C.S. Liao, C.H. Yan, L.Y. Chen, S.Y. Wang, *Phys. Rev. B* **68**, No 22 24426 (2003).
12. V.S. Bushkova, *J. Nano-Electron. Phys.* **7**, No 1 01023 (2015).
13. V.S. Bushkova, *J. Nano-Electron. Phys.* **7**, No 3 03021 (2015).
14. Н.М. Олегович, И.И. Мороз, А.В. Пушкарёв, Ю.В. Радиш, А.Н. Салак, *ФТТ* **50**, 472 (2008) (N.M. Olegovich, I.I. Moroz, A.V. Pushkarev, Yu.V. Radish, A.N. Salak, *Phys. Solid State* **50**, 472 (2008)).
15. M.A. Ahmed, Samiha T. Bishay, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34**, 1339 (2001).
16. Б.К. Остафийчук, І.М. Гасюк, Л.С. Кайкан, В.В. Угорчук, П.П. Якубовський, В.А. Цап, Ю.С. Кайкан, *Металлофиз. новейшие технол.* **36** No 1 89 (2014) (B.K. Ostafiychuk, I.M. Hasyuk, L.S. Kaykan, V.V. Uhorchuk, P.P. Yakubovskyy, V.A. Tsap, Yu.S. Kaykan, *Metallofiz. Noveyshie Tekhnol.* **36** No 1 89 (2014)).
17. А.В. Мальшев, В.В. Пешев, А.М. Притулов, *Изв. вузов. Физика* № 7, 48 (2003) (A.V. Malyshev, V.V. Peshev, A.M. Pritulov, *Izv. vuzov. Fizika* No 7, 48 (2003)).
18. M.N. Abdullah, A.N. Yusoff, *J. Alloys Compd.* **233**, 129 (1996).
19. M.N. Abdullah, A.N. Yusoff, *J. Mater. Sci.* **32**, 5817 (1997).
20. М.П. Богданович, В.Н. Варской, В.П. Лебедев и др., *Изв. вузов. Физика* № 1, 58 (1983) (M.P. Bogdanovich, V.N. Varskoy, V.P. Lebedev i dr., *Izv. vuzov. Fizika* No 1, 58 (1983)).
21. Hasan Mehmood Khan, Misbah-ul-Islam, Irshad Ali, Mazhar-ud-din Rana, *Mater. Sci. Appl.* **2**, 1083 (2011).
22. D. Tripathy, A.O. Adeyeye, *J. Appl. Phys.* **103**, 07F701 (2008).
23. Z.Ž. Lazarević, Č. Jovalekić, D. Sekulić, M. Slankamenac, M. Romčević, A. Milutinović, N.Ž. Romčević, *Sci. Sintering* **44**, 331 (2012).
24. S. Balaji, R. Kalai Selvan, L. John Berchmans, S. Angappan, K. Subramanian, C.O. Augustin, *Mater. Sci. Engin. B* **119**, 119 (2005).