

В.С. Бушкова

Визначення комплексної магнітної проникності ферит- п'єзоелектричних композитів

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

В даній роботі наведено методику визначення комплексної магнітної проникності композитів складу $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ за результатами вимірювання комплексного опору котушок індуктивності з магнітоелектричним осердям. Встановлено, що магнітна проникність магнітоелектриків в діапазоні частот $10^5 - 6 \cdot 10^5$ Гц практично не залежить від частоти. Показано, що зі збільшенням немагнітної фази в складі композитів зменшується величина магнітної проникності.

Ключові слова: магнітоелектричний композит, котушка індуктивності, комплексна магнітна проникність, активний та реактивний опори.

Стаття поступила до редакції 12.03.2014; прийнята до друку 15.06.2014.

Вступ

Всі магнітоелектричні матеріали, залежно від структурно-технологічних параметрів, поділяють на однофазні та композиційні. До однофазних матеріалів відносять звичайні монокристалічні або полікристалічні речовини. Однофазні магнітоелектричні матеріали, що володіють одночасно електричною і магнітною структурою, було названо сегнетомагнетиками [1, 2], відкриттю яких сприяв період інтенсивного та успішного розвитку фізики магнітних явищ та сегнетоелектрики.

До відкриття сегнетомагнетиків зі значним вмістом йонів заліза призвів пошук нових сегнетоелектричних з'єднань [3, 4]. В 1958 році Г.А. Смоленський та В.А. Іоффе вказали на принципову можливість співіснування сегнетоелектрики і магнетизму в перовскитних сполуках [5, 6], оскільки одночасна присутність спонтанних магнітних моментів і поляризації в речовинах не заперечувала загальним критеріям виникнення феромагнетизму і сегнетоелектрики окремо.

Однак, однофазні магнітоелектрики не знайшли масштабного застосування в техніці, оскільки вони, за малим виключенням, демонструють магнітоелектричні властивості лише при доволі низьких температурах. Тому дослідники звернулися до іншої можливості – створення штучних композитних середовищ, що складаються з двох чи більше фаз, які механічно зв'язані одна з одною. Для створення магнітоелектричних матеріалів, частіше за все, використовують складні оксидні системи, оскільки вони можуть володіти як магнітострикційними, так і

п'єзоелектричними властивостями.

Стрімкий розвиток сучасної електронної техніки спонукає до створення магнітоелектричних матеріалів з оптимальними характеристиками, тому наразі є актуальним отримання композитних матеріалів з великим питомим опором та високим значенням магнітоелектричного ефекту.

Відомий вчений Р.Е. Невнгам та інші автори роботи [7] запропонували класифікацію магнітоелектричних композитів за типами зв'язності, згідно якої композитом із зв'язністю типу 3 – 0 називається композит, одна фаза якого має зв'язність у всіх трьох напрямках та позначається індексом 3. Друга фаза, яка позначається індексом 0, є ізолюваною, тобто не має зв'язності ні в одному напрямку. У зв'язку з цим, розрізняють стержневі, багат шарові та об'ємні композити.

Серед композитних магнітоелектриків стержневі матеріали, що належать до типу зв'язності 1 – 3, володіють найменшою магнітоелектричною взаємодією. Технологія виготовлення таких матеріалів є достатньо складною [8], а технологічні режими обробки призводять до погіршення їх властивостей, у зв'язку з чим вони є мало придатними для створення на їх основі пристроїв функціональної електроніки.

У зв'язку з труднощами синтезу якісних магнітоелектричних матеріалів для вирішення дослідницьких і прикладних завдань було запропоновано використовувати багат шарові структури з типом зв'язності 2 – 2. Фази таких композитів розташовані шарами, причому кожна з фаз має зв'язність у двох напрямках в площинах

шарів, і при цьому вона не пов'язана з іншим шаром тієї ж самої фази. Таким чином, композитні багатошарові магнітоелектричні матеріали [9] створюють за допомогою механічного контакту магнітних і електричних складових структури.

Композитні об'ємні, в загальному випадку багатофазні, матеріали представляють собою механічні суміші магнітних і електричних компонентів, виготовлених за керамічною технологією. Очевидно, що композитний багатошаровий матеріал є одновимірною моделлю композитного об'ємного матеріалу.

Важливою перевагою об'ємних композитних матеріалів, крім простоти їх виготовлення, над іншими композитами є те, що за допомогою вибору компонентів магнітоелектричного матеріалу з необхідними значеннями електричної та магнітної проникності і шляхом варіювання процентного вмісту його фаз можна досягти необхідних значень заданого комплексу параметрів. При цьому фази композиту не повинні вступати в хімічну реакцію, а для досягнення максимального магнітоелектричного ефекту необхідне хороше механічне їх з'єднання. Отже, велике значення для фізичних параметрів композиту має тип зв'язності його компонентів.

Таким чином, в композитних матеріалах можуть спостерігатися ефекти, які відсутні в кожному з компонентів. Зокрема, загальною тенденцією для всіх цих матеріалів є наявність в них магнітоелектричної взаємодії, завдяки чому композити знаходять широке практичне застосування [10-12].

Метою даної роботи є розробка методики визначення та вивчення комплексної магнітної проникності магнітоелектричного матеріалу системи $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$, де $x = 0,0; 12,5; 25,0; 37,5; 50,0; 62,5$ об. %, в слабких магнітних полях за результатами вимірювань активного та реактивного опорів котушки індуктивності з осердям у формі тороїда.

I. Експериментальна частина

У досліджуваних композитах магнітострикційна фаза, в якості якої виступає магнієвий ферит, має значно менший опір, ніж п'єзоелектрична фаза – титанат барію, що призводить до сильної залежності опору композиту від зв'язності фаз. Переважна кількість феритів – напівпровідники, в яких опір сильно знижується при підвищенні температури. Для того, щоб п'єзоелектричний ефект в п'єзоелектричній компоненті був максимально можливим, необхідно матеріал поляризувати. Проте, вже за кімнатної температури виникає проблема при електричній поляризації магнітоелектричних матеріалів, яка при вищій температурі із-за високої провідності фериту практично стає неможливою. Використання об'ємних композитів системи $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$ з типом зв'язності 3-0 дозволяє підвищити їх опір і полегшує поляризацію.

Методика виготовлення котушок індуктивності

на основі композитів складу $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$ описана в [13].

Фазовий склад контролювався за допомогою рентгеноструктурного аналізу, який проводився на дифрактометрі ДРОН-3 з використанням $\text{Cu}(K\alpha)$ -випромінювання. Проведений аналіз підтвердив існування в синтезованих композитах магнітної фази зі структурою шпінелі і сегнетоелектричної – зі структурою перовскиту.

Вимірювання імпедансу котушок індуктивності з магнітоелектричним осердям проведено за допомогою спектрометра Autolab PGSTAT 12/FRA-2 в діапазоні частот $10^2 - 10^6$ Гц.

II. Результати досліджень та їх обговорення

Для феромагнітних матеріалів, які застосовують на різних частотах, важливою характеристикою є частотні залежності початкової магнітної проникності і магнітних втрат, які ще називають магнітними спектрами [14].

Якщо магнітне поле змінюється за законом синуса, тобто

$$H = H_0 e^{j\omega t}, \quad (1)$$

то індукція, відповідно, через втрати відставатиме за фазою на деякий кут δ :

$$B = B_0 e^{j(\omega t - d)} \quad (2)$$

Для того, щоб охарактеризувати явища, що протікають у феромагнітних матеріалах, які знаходяться у змінних магнітних полях, використовують поняття комплексної магнітної проникності [15]:

$$m = \frac{B}{H} = \frac{B_0}{H_0} e^{-jd}. \quad (3)$$

Звідки

$$m = \frac{B_0}{H_0} \cos d - j \frac{B_0}{H_0} \sin d = m' - jm'', \quad (4)$$

де $m' = \frac{B_0}{H_0} \cos d$ – дійсна частина магнітної

проникності, а $m'' = j \frac{B_0}{H_0} \sin d$ – уявна.

Величина m' характеризує оборотну проникність, при якій втрати відсутні, m'' – проникність, пов'язану з необоротними процесами, тобто з процесами, при яких енергія витрачається на роботу перемагнічування та на нагрівання струмами Фуко.

Магнітні втрати зазвичай характеризуються співвідношенням:

$$\text{tg} d = \frac{\sin d}{\cos d} = \frac{m''}{m'} \quad (5)$$

Відомо, що зміна намагніченості зумовлена коливаннями доменних границь і поворотом вектора

намагніченості, тому частотна залежність m' і m'' характеризується критичними частотами цих двох процесів, тобто резонансом доменних границь і більш високочастотним резонансом прецесії намагніченості в доменах.

Розглянемо включену в коло змінного струму котушку індуктивності, створену шляхом нанесення на композитне осердя обмотки з тонкого мідного дроту. Тоді комплексну потужність, що поглинається в осерді даної котушки, можна описати формулою:

$$P = UIe^{id} = UI \cos d + jUI \sin d = P' + jP'', \quad (6)$$

де P' – активна потужність, що характеризує швидкість необоротного перетворення електричної енергії в інші види енергії (теплову і електромагнітну), P'' – реактивна потужність, яка характеризує навантаження, що створюють в електротехнічних пристроях коливання енергії у колі синусоїдального змінного струму.

З іншого боку комплексну потужність можна виразити через потужність магнітних втрат P_k за допомогою формули [16]:

$$P = P_k + j \frac{P_k}{\operatorname{tg} d} \quad (7)$$

Згідно з [17] магнітні втрати в композитному осерді можна описати співвідношенням:

$$P_k = 2pfm_r m_0 H^2 V \sin d, \quad (8)$$

де H – напруженість магнітного поля, m_r – відносна магнітна проникність матеріалу, m_0 – магнітна стала, δ – кут магнітних втрат матеріалу осердя.

Як відомо, напруженість магнітного поля виражається формулою:

$$H = \frac{\Phi}{m_r m_0 S}, \quad (9)$$

де Φ – магнітний потік, S – площа поперечного перерізу осердя.

Підставивши останній вираз у формулу (8), отримуємо:

$$P_k = \frac{2pfV\Phi^2 \sin d}{m_r m_0 S^2}, \quad (10)$$

Аналогічно, після підстановки виразу (10) у (7), отримуємо:

$$P = \frac{2pfV\Phi^2 \sin d}{m_r m_0 S^2} + j \frac{2pfV\Phi^2 \cos d}{m_r m_0 S^2}, \quad (11)$$

звідки

$$P = \frac{2pfV\Phi^2}{m_r m_0 S^2} (\sin d + j \cos d), \quad (12)$$

Комплексну потужність можна записати у наступному вигляді:

$$P = UI^* = I^2 Z = \frac{U^2}{Z^*}, \quad (13)$$

де U , I та Z – комплексні напруга, струм та імпеданс відповідно, $*$ – оператор комплексного спряження. Зі співвідношення (13) виразимо спряжений

комплексний опір котушки:

$$Z^* = \frac{U^2}{P}, \quad (14)$$

Підставимо в останню формулу вираз (12) і одержимо:

$$Z^* = \frac{m_r m_0 S^2 U^2}{2pfV\Phi^2 (\sin d + j \cos d)} \quad (15)$$

Враховуючи властивість комплексно-спряжених чисел $Z \cdot \bar{Z} = |Z|^2$, формула для обчислення комплексного опору матиме наступний вигляд:

$$Z = \frac{m_r m_0 S^2 U^2}{2pfV\Phi^2} (\sin d + j \cos d), \quad (16)$$

Якщо виділити дійсну та уявну частини, то отримаємо співвідношення для активного та реактивного опорів котушки:

$$Z' = \frac{m_r m_0 S^2 U^2}{2pfV\Phi^2} \sin d, \quad (17)$$

$$Z'' = \frac{m_r m_0 S^2 U^2}{2pfV\Phi^2} \cos d, \quad (18)$$

Оскільки $U = 2pfw\Phi$, а $V = Sl$, де w – число витків котушки, l – довжина середньої магнітної лінії осердя, то можна записати:

$$Z' = \frac{2pfm_r m_0 S w^2}{l} \sin d, \quad (19)$$

$$Z'' = \frac{2pfm_r m_0 S w^2}{l} \cos d, \quad (20)$$

Використовуючи вирази (4), (19) та (20) визначимо складові комплексної магнітної проникності:

$$m' = m_r \cos d = \frac{l}{2pfm_0 S w^2} \cdot Z'', \quad (21)$$

$$m'' = m_r \sin d = \frac{l}{2pfm_0 S w^2} \cdot Z', \quad (22)$$

Беручи до уваги, що $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, а для тороїда $l = \pi d_{cp}$, де d_{cp} – середній діаметр осердя, одержимо:

$$m' = \frac{d_{cp} \cdot 10^7}{8pfS w^2} \cdot Z'', \quad (23)$$

$$m'' = \frac{d_{cp} \cdot 10^7}{8pfS w^2} \cdot Z', \quad (24)$$

Тоді абсолютну величину магнітної проникності знайдемо за формулою:

$$m = \sqrt{(m')^2 + (m'')^2}. \quad (25)$$

На рис. 1 наведено частотну залежність абсолютної величини магнітної проникності. Зі збільшенням частоти змінного поля спостерігається зменшення магнітної проникності μ для всіх досліджуваних композитів, що було відмічено в

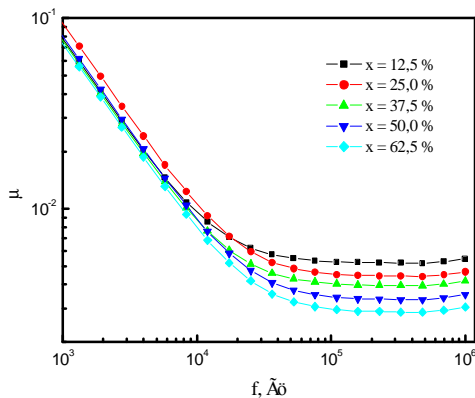


Рис. 1. Залежність магнітної проникності композитів $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$ від частоти.

роботі [13]. Як правило, у феромагнетиках це відбувається внаслідок поверхневого ефекту, зумовленого вихровими струмами, оскільки струми Фуко перешкоджають проникненню магнітного поля в матеріали.

Однак, і при відсутності струмів Фуко в напівпровідниках також спостерігається дисперсія магнітної проникності [18]. Оскільки досліджувані композитні матеріали володіють високим питомим опором, то вплив струмів Фуко на величину магнітної проникності є незначним. В цьому випадку зі зростанням частоти магнітна індукція всередині осердя із-за різних причин уже не може слідувати за височастотним магнітним полем, і тому спостерігається зменшення магнітної проникності з ростом частоти. Однією з причин частотної залежності магнітної проникності є процеси зміщення границь між доменами.

Судячи з рис. 1, магнітна проникність композитів в діапазоні частот $10^5 - 6 \cdot 10^5$ Гц практично не залежить від частоти.

В змінних магнітних полях в магнітних матеріалах виникають втрати енергії, обумовлені, головним чином, втратами на гістерезис і на вихрові струми. Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування визначаються площею статичної петлі гістерезису, отриманої при повільній зміні магнітного поля.

Втрати на вихрові струми визначаються величиною електричного опору магнітного матеріалу і залежать від частоти перемагнічування, зростаючи пропорційно квадрату збільшення частоти зміни магнітного поля. Як уже було зазначено вище, композити складу $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$ володіють великим питомим опором [19], тому

втратами на вихрові струми можна знехтувати.

Відомо [20], що в слабких магнітних полях при низьких частотах основним джерелом втрат в осерді є втрати на гістерезис.

Втрати в магнітному матеріалі, в змінному полі можна оцінювати за допомогою тангенса кута магнітних втрат $\text{tg}d_m$, який, згідно експериментальних даних, зменшується з ростом частоти. Підтвердженням цього є робота [21], де досліджено процеси перемагнічування ферит-п'єзоелектричних композитів складу $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$, в результаті чого було отримано петлі гістерезису при різних частотах. Виявлено, що зі збільшенням частоти петля магнітного гістерезису звужувалась, коерцитивна сила зменшувалась, при цьому залишкова магнітна індукція залишалась сталою. Це значить, що з ростом частоти зменшується площа петлі гістерезису, і відповідно, зменшуються втрати магнітного поля на гістерезис.

Для застосування магнітних матеріалів у змінних полях важливе значення мають не тільки їх магнітні, але і електричні властивості. При великому електричному опорі у магнітоелектриків необхідно враховувати також їх діелектричні властивості, що характеризуються діелектричною проникністю і тангенсом кута діелектричних втрат. В.К. Аркадев назвав їх бікомплексними, оскільки основні їх властивості у змінних полях можна описати двома комплексними величинами: комплексною магнітною проникністю та комплексною діелектричною проникністю [20].

Відомо, що при застосуванні бікомплексних речовин в якості осердь котушок індуктивності діелектричні втрати, які в них створюються, можуть впливати на тангенса кута врат таких котушок.

Висновки

Таким чином, в даній роботі одержано формули, які дають змогу обчислити дійсну та уявну частини комплексної магнітної проникності за вимірними активним та реактивним опорами котушки індуктивності.

У ферит-п'єзоелектричних композитах складу $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$, які були використані для виготовлення магнітних осердь, завдяки великому питомому опором, втрати на вихрові струми практично відсутні. При цьому магнітні втрати на гістерезис зменшуються з ростом частоти.

- [1] G.A. Smolens'kij, I.E. Chupis, *Uspehi fizicheskikh nauk* 137(3), 415 (1982).
- [2] Ju.N. Venevcev, V.V. Gagulin, V.N. Ljubimov, *Segnetomagnetiki* (Nauka, Moskva, 1982).
- [3] G.A. Smolenskij, A.I. Agranovskaja, *ZhJeTF* 28, 1491 (1958).
- [4] G.A. Smolenskij, A.I. Agranovskaja, S.N. Popov, *ZhTF* 28, 2152 (1958).
- [5] G.A. Smolenskii, V.A. Bokov, *J. Appl. Phys.* 35, 915 (1964).
- [6] G.A. Smolenskij, V.A. Isupov, N.N. Krajnik, *Izv. AN SSR. Ser. Fizicheskaja* 25(11), 1333 (1961).

- [7] R.E. Newnham, D.P. Skinner, L.E. Cross, *Mat. Res. Bull.* 13, 525 (1978).
- [8] Z. Shi, C.W. Nan, J. Zhang, *J. Appl. Phys.* 99(12), 1241 (2006).
- [9] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, S.V. Averkin, *FTT* 52 (10), 1975 (2010).
- [10] A. Kopaev, V. Bushkova, B. Ostafiychuk, *Sol-Gel Synthese und Eigenschaften der weichmagnetischen Nanoferrite und Verbundwerkstoffen. Physik und Technologie der Nanoferrite mit dem Bariumtitanat* (Lap Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2013).
- [11] D.A. Filippov, T.A. Galkina, G. Srinivasan, *Pis'ma v ZhTF* 36(21), 23 (2010).
- [12] R. P. Mahajan, K.K. Patankar, M.B. Kothale, S.C. Chaudhari, V.L. Mathe, S.A. Patil, *Pramana* 58, 1115 (2002).
- [13] V.S. Bushkova, *Fizika i himija tverdogo tila* 13(3), 645 (2012).
- [14] S. Krupichka, *Fizika ferritov i rodstvennyh im materialov* (Mir, Moskva, 1976).
- [15] Ju. Sitidze, H. Sato, *Ferrity* (Mir, Moskva, 1964).
- [16] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy jelectrotehniki* (Vysshaja shkola, Moskva, 1973).
- [17] K.M. Polivanov, *Ferromagnetiki* (Gos. jenergeticheskoe izd-vo, Moskva, 1957).
- [18] E.S. Borovik, V.V. Eremenko, A.S. Mil'ner, *Lekcii po magnetizmu* (Fizmatlit, Moskva, 2005).
- [19] V.S. Bushkova, O.V. Kopaev, *Fizichna inzhenerija poverhni* 10(4), 308 (2012).
- [20] L.I. Rabkin, *Vysokochastotnye ferromagnetiki* (Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, Moskva, 1960).
- [21] V.S. Bushkova, O.V. Kopaev, *Fizika i himija tverdogo tila* 13(2), 363 (2012).

V.S. Bushkova

Determination of Complex Magnetic Permeability of Ferrite-Piezoelectric Composites

In this paper the $(1-x) \text{MgFe}_2\text{O}_4 - x \text{BaTiO}_3$ composite systems in the form of toroid were obtained. It was presented the method of determining of complex magnetic permeability of ferrite-piezoelectric materials by the results of measuring complex impedance of inductance coil with magnetoelectric core. It was found that magnetic permeability of magnetoelectric composites in the frequency range $10^5 - 6 \cdot 10^5$ Hz does not depend on frequency. It was shown that with increasing concentration of ferroelectric phase in the composites magnetic permeability decreases.

Key words: magnetoelectric composite, inductance coil, complex magnetic permeability, real resistance and reactance.