

ТЕМПЕРАТУРНА ІМПЕДАНС-СПЕКТРОСКОПІЯ КОМПОЗИТІВ СИСТЕМИ $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$

В.С. Бушкова, О.В. Копаєв

*Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника (Івано-Франківськ)
Україна*

Надійшла до редакції 15.10.2012

Приведено результати дослідження діелектричних та провідних властивостей ферит-п'єзоелектричних композитів складу $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ в інтервалі температур 293 – 723 К в частотному діапазоні $10^{-2} - 10^6$ Гц. За даними імпеданс-спектрів виявлений при $T > 523$ К домінуючий вклад електропровідності на постійному струмі. Показано, що енергія активації електропровідності σ_{dc} при зростанні температури близько 400 К значно збільшується для всіх композитів.

Ключові слова: ферит-п'єзоелектричний композит, електропровідність, енергія активації.

Приведены результаты исследования диэлектрических и проводящих свойств феррит-пьезоэлектрических композитов состава $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ в интервале температур 293 – 723 К в частотном диапазоне $10^{-2} - 10^6$ Гц. По данным импеданс-спектров обнаружено при $T > 523$ К доминирующий вклад электропроводности на постоянном токе. Показано, что энергия активации электропроводности σ_{dc} при возрастании температуры около 400 К значительно увеличивается для всех композитов.

Ключевые слова: феррит-пьезоэлектрический композит, электропроводность, энергия активации.

The results of study dielectric properties of ferrite-piezoelectric composites of $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ are given in the temperature range 293 – 723 K in the frequency range $10^{-2} - 10^6$ Hz. According to the impedance spectra the dominant contribution of electrical conductivity on direct current is detected at $T > 523$ K. It is shown that the activation energy of conductivity σ_{dc} increases significantly with increasing temperature about 400 K for all composites.

Key words: ferrite-piezoelectric composite, electrical conductivity, activation energy.

ВСТУП

Протягом останніх років помітно зросла увага до магнітовпорядкованих матеріалів, що пов'язано з широким їх застосуванням в сучасній техніці [1]. Потреби сучасної науки стимулюють пошук нових властивостей вказаних матеріалів, а також створення та дослідження матеріалів, використання яких дозволить покращити деякі характеристики приладів та розширити їх функціональні можливості. Існування в речовинах магнітної і електричної підсистем та взаємодія між ними вносять ряд особливостей у властивості матеріалу, в реакцію системи на електричне та магнітне поля, зокрема, появу магнітоелектричного (МЕ) ефекту. Магнітоелектричний (МЕ) ефект, вперше передбачений в [2] і експериментально виявлений в [3, 4] полягає у виникненні поляризації під дією магнітного поля, або навпаки, виникненні намагніченості під дією електричного поля. На сьогоднішній день вже

відомо багато як однофазних так і багатофазних МЕ матеріалів [5 – 7] та, незважаючи на це, продовжується пошук нових. Останнім часом велика увага приділяється ферит-п'єзоелектричним МЕ матеріалам [8 – 12], оскільки наявність МЕ ефекту в таких речовинах зумовлена механічною взаємодією феритової та п'єзоелектричної компонент. При намагнічуванні МЕ структури зовнішнім полем деформація феритової компоненти, зумовлена магнітострикцією, призводить до деформації механічно зв'язаної п'єзоелектричної компоненти, що викликає зміну поляризації п'єзоелектрика та появу електричних зарядів на границях розділу вказаних компонент, і, як наслідок, виникнення напруги на поверхнях структури. Таким чином, задача отримання та дослідження МЕ речовин є досить актуальною, зважаючи на те, що показана широка перспектива практичного застосування МЕ матеріалів, зокрема, для створення нового типу пам'яті.

На даний час створено та досліджено багато ферит-п'єзоелектричних композитів на основі сегнетоелектрика BaTiO_3 та кобальтового чи нікелевого феритів, легованих іонами цинку, міді, марганцю та ін. [13 – 15]. В представлений роботі приводяться результати досліджень електричних властивостей магнітоелектричних композитів системи $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$, феромагнітним матеріалом яких служить магнітом'який ферит MgFe_2O_4 , що володіє високим значенням питомого опору [16].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Відомо, що більшим значенням МЕ ефекту володіють неоднорідні композитні системи, тому феритова складова композитів була синтезована за допомогою методу золь-гель з участю автогоріння [17 – 18], який дозволяє отримувати частинки нанометрового розміру. В якості сегнетоелектричної фази використано мікрочастинки титанату барію, який було отримано, використовувачи керамічну технологію. Таким чином, була досягнута неоднорідність в даних композитах за рахунок різниці у розмірі частинок кожного компоненту. МЕ композити 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'ємних % були створені шляхом пресування у брикети механічної суміші порошків феромагнітного та сегнетоелектричного матеріалів з додаванням 10% ПВС. Отримані зразки діаметром 1,7 см та висотою близько 0,1 см піддавалися спіканню при температурі 1280 °С протягом 7 годин в атмосфері повітря з повільним охолодженням. На поверхню спечених зразків осаджувався тонкий шар срібла, який впікався при температурі 700 °С протягом 1 години.

Фазовий склад контролювався за допомогою рентгеноструктурного аналізу, який проводився на дифрактометрі ДРОН-3 з використанням CuK_α -випромінювання. Проведений аналіз підтвердив існування в синтезованих композитах магнітної і сегнетоелектричної фаз зі структурою шпінелі та перовскиту відповідно. Діелектричні та провідні характеристики досліджуваних композитів визначались за параметрами комплексного імпедансу, вимірювання якого проводилось з використанням спектрометра Autolab PGSTAT 12/FRA-2 в

діапазоні частот $10^{-2} - 10^6$ Гц в інтервалі температур 293 – 723 К з кроком 50 К.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 представлені імпедансні спектри композиту складу $75\text{MgFe}_2\text{O}_4 - 25\text{BaTiO}_3$ в координатах Нейквіста при температурах 293 – 473 К. На діаграмі $z''(z')$ чітко виділяються дві області, що мають форму дуги. Перша область відповідає за вклад в діелектричний відгук об'єму зерен композиту. Наявність другої області, що розташована правіше попередньої області, може бути пов'язана з вкладом в діелектричний відгук границь зерен чи інших електричних бар'єрів [19] в даних зразках. Зі збільшенням температури друга область на діаграмі Найквіста звужується і при температурі 423 К зовсім зникає. Подібний характер залежності $z''(z')$ спостерігається для всіх досліджуваних композитів системи $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$. Аналіз діаграм $z''(z')$ показав, що значення опору зразків значно зменшується з підвищенням температури.

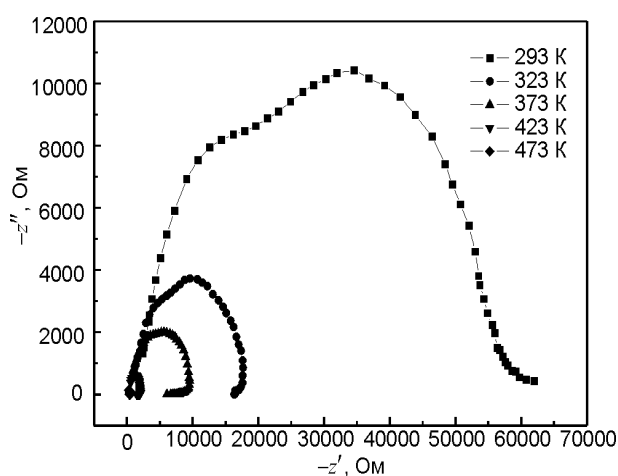


Рис. 1. Температурні залежності годографів імпедансу композиту при $x = 25\%$.

На рис. 2 зображена частотна залежність тангенса втрат для композиту з 25% об'ємним вмістом сегнетоелектрика. З даного рисунка видно, що для вказаних температур спостерігається загальна тенденція зменшення величини діелектричних втрат зі збільшенням частоти. Характерне зростання $\text{tg}\delta$ при зниженні частоти є ознакою появи dc – електропровідності. Для підтвердження вказаного ефекту на

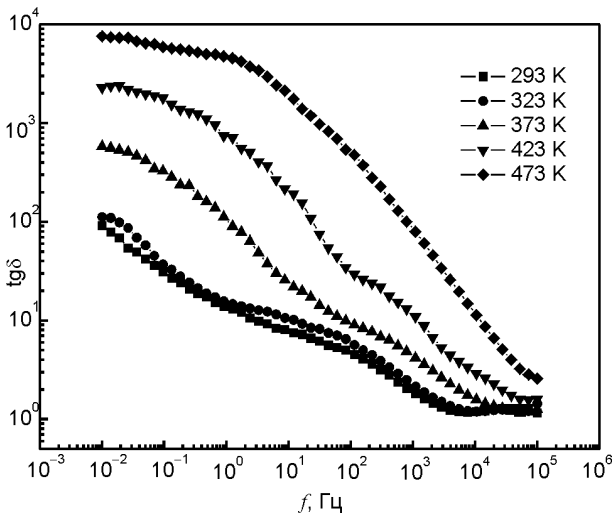


Рис. 2. Тангенс кута діелектричних втрат як функція частоти за різних температур.

рис. 3 представлена частотна залежність дійсної частини питомої провідності в логарифмічних координатах. Для низьких температур при частотах $f > 10$ Гц спостерігається відхилення від лінійності частотної залежності дійсної частини електропровідності, а при високих температурах криві $\sigma'(f)$ виходять на плато.

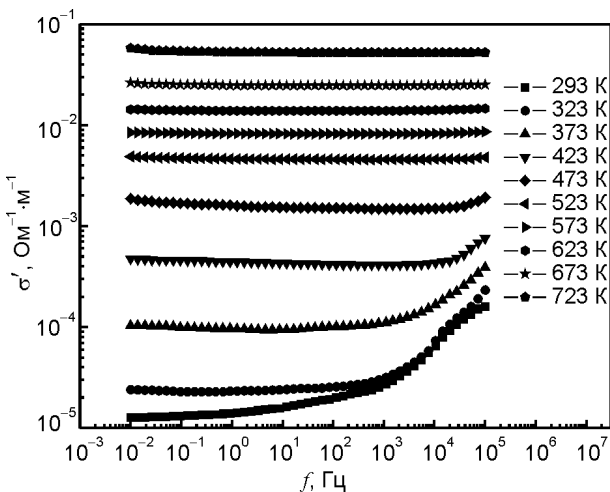


Рис. 3. Частотна залежність дійсної частини питомої провідності для складу при $x = 25\%$.

Це свідчить про те, що в досліджуваних композитах має місце електропровідність на постійному струмі, вклад якої в діелектричний відгук зростає з температурою і стає домінуючим при $T > 523$ К. Потрібно відмітити, що подібний характер залежності $\sigma'(f)$ має місце для всіх складів системи $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4-x\text{BaTiO}_3$. Частотна залежність дійсної складової питомої електропровідності описується за допомогою співвідношення:

$$\sigma' = \sigma_{dc} + A\omega^n, \quad (1)$$

де A і n – параметри, що залежать від температури та складу композитів. Коефіцієнт пропорційності A визначається формулою:

$$A = \frac{nq^2\delta^2\nu}{6k_B}, \quad (2)$$

де ν – частота коливань іонів у вузлах кристалічної решітки, n , q і δ – відповідно концентрація, заряд і довжина вільного пробігу носіїв, k_B – стала Больцмана. Другий доданок у виразі (1) відповідає за поляризаційну складову питомої електропровідності. Величини σ_{dc} для всіх композитів при різних температурах оцінені 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. 4).

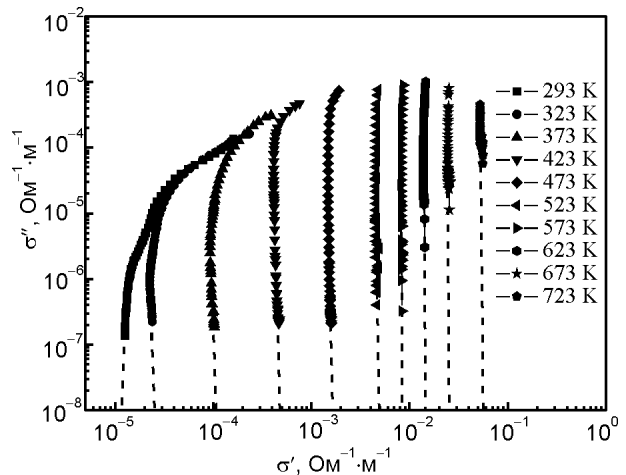


Рис. 4. Діаграми $\sigma''(\sigma')$ при різних температурах.

Залежність отриманої електропровідності σ_{dc} при кімнатній температурі від складу композитів показана на рис. 5, з якого видно, що при $x = 12.5\%$ дана величина набуває максимального значення, після чого починає монотонно спадати. Така ж поведінка спостерігається для залежності ущільнення зразків при збільшенні концентрації сегнетоелектрика у складі композитів. Даний ефект пояснюється наступним чином: атоми барію при високій температурі спікання можуть утворювати з феритом рідку фазу [20], яка збільшує щільність матеріалів, очевидно при $x = 12.5\%$ утворюється максимальна кількість такої фази. Таким чином, зміна величини провідності корелює з лінійним ущільненням досліджуваних зразків.

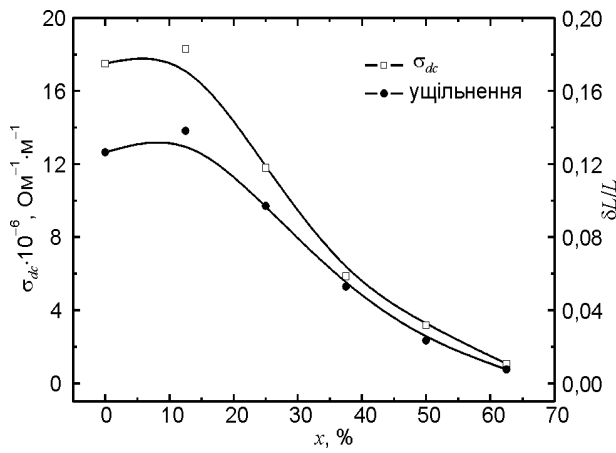


Рис. 5. Залежність провідності σ_{dc} та ущільнення від складу композитів.

Аналіз отриманих даних dc – електропровідності показав, що температурну залежність σ_{dc} для всіх композитів можна описати за допомогою виразу:

$$\sigma_{dc} = \sigma_{dc0} \exp\left(-\frac{\Delta E_{dc}}{k_B T}\right), \quad (3)$$

де σ_{dc0} – передекспоненційний множник, який не залежить від температури, ΔE_{dc} – енергія активації носіїв заряду постійного струму, k_B – стала Больцмана.

На рис. 6 представлено залежності $\ln \sigma_{dc}$ від оберненої температури для складів $x = 12.5\%$, 37.5% та 62.5% . Видно, що прямі лінії, які описують вказану залежність, мають різний нахил в області низьких та високих температур. Крім цього, явно виражений злам цієї залежності в області температур близько 400 К притаманний всім композитам. Враховуючи формулу (3) та залежність $\ln \sigma_{dc}(T^{-1})$ встановлені в даних температурних областях енергії акти-

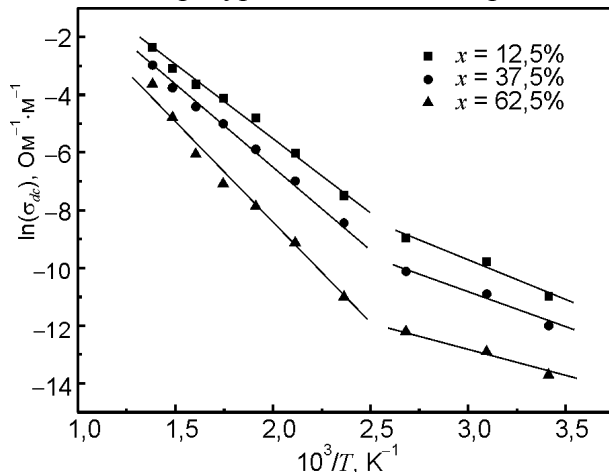


Рис. 6. Залежність питомої провідності постійного струму від оберненої температури.

вації ΔE_{dc} носіїв заряду постійного струму, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1
Значення енергії активації носіїв для твердих розчинів $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$

$x, \%$	$\Delta E_{dc}, \text{eV}$	$\Delta E'_{dc}, \text{eV}$
0.0	0.44	0.24
12.5	0.43	0.24
25.0	0.46	0.23
37.5	0.49	0.21
50.0	0.54	0.19
62.5	0.60	0.15

Відомо, що електропровідність феритових матеріалів з напівпровідниковими властивостями може визначатися двома механізмами провідності: активаційним і стрибковим [21]. Активаційний механізм провідності має місце при низькій концентрації локалізованих станів носіїв заряду поблизу рівня Фермі. В такому випадку електропровідність визначається дрейфом електронів в напрямку електричного поля. Стрибковий механізм електропровідності по локалізованих станах навколо рівня Фермі реалізується при достатньо високій густині локалізованих станів поблизу цього рівня. Як правило, стрибковий механізм електропровідності домінує при низьких температурах, а активаційний – при високих. Оскільки в низькотемпературній області для всіх композитів енергія активації електропровідності постійного струму $\Delta E'_{dc}$ набагато менша в порівнянні з її значенням у високотемпературній області, то можна припустити, що при температурі близько 400 К має місце зміна механізму провідності. З іншого боку в роботах [22 – 24] була зафіксована зміна величини ΔE_{dc} при температурах, близьких до температури фазового переходу, пов'язаного з характером дипольного впорядкування. В титанаті барію при температурі близько 400 К відбувається перехід з тетрагональної у кубічну структуру, що супроводжується фазовим переходом сегнетоелектрик – параелектрик, з яким може бути пов'язане різке збільшення енергії активації при підвищенні температури.

ВИСНОВКИ

Таким чином, на основі аналізу імпедансних спектрів, досліджено електричні характеристики композитів системи $(1-x)\text{MgFe}_2\text{O}_4 -$

$x\text{BaTiO}_3$ при різних температурах, які дозволили виявити закономірності їх зміни в залежності від частоти, температури і складу. Характерний вигляд частотних залежностей $\text{tg} \delta$ і $\text{с}'$ свідчить про існування в досліджуваних зразках електропровідності постійного струму, вклад якої в діелектричний відгук при $T > 523 \text{ K}$ значно зростає з температурою. 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. При $T > 400 \text{ K}$ енергія активації носіїв заряду значно більша за $\Delta E'_{dc}$ в низькотемпературній області. Приріст енергії активації при температурі близько 400 K співпадає з фазовим переходом в титанаті барію та може свідчити про існування в даних зразках двох механізмів провідності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боков В.А. Физика магнетиков. – Санкт-Петербург: Невский Диалект, 2002. – 256 с.
2. Дзялошинский И.Б. К вопросу о магнитоэлектрическом эффекте в антиферромагнетиках//ЖЭТФ. – 1959. – Т. 37. – С. 881-882.
3. Астров Д.Н. Магнитоэлектрический эффект в окиси хрома//ЖЭТФ. – 1961. – Т. 40. – С. 1035-1041.
4. Folen V.J., Rado G.T., Stalder E.W. Anisotropy of the magnetoelectric effect in Cr_2O_3 //Phys. Rev. Lett. – 1961. – Vol. 6, № 11. – P. 607-608.
5. Покатилов В.С., Покатилов В.В., Сигов А.С. Локальные состояния ионов железа в мультиферроиках $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ //ФТТ. – 2009. – Т. 51, Вып. 3. – С. 518-524.
6. Бичурин М.И., Петров В.М., Филиппов Д.А., Сринивасан Г. Магнитоэлектрический эффект в композиционных материалах. – Великий Новгород: ИПЦ НовГУ, 2005. – 227 с.
7. Liu Y.X., Wan J.G., Liu J.-M., Nan C.W. Numerical modeling of magnetoelectric effect in a composite structure//J. Appl. Phys.– 2003. – Vol. 94, №8. – P. 5111-5117.
8. Zhou J. Magnetoelectric $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ double-layer thin film prepared by pulsed-laser deposition //App. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88. – P. 103-111.
9. Филиппов Д.А. Магнитоэлектрический эффект в широкой пластинке из гомогенного феррит-пьезоэлектрического композита//ФММ. – 2005. – Т. 99, № 6. – С. 1-5.
10. Wan J.G., Liu J.-M., Chand H.L.W, Choy C.L., Wang G.H., Nan C.W. Giant magnetoelectric effect of a hybrid of magnetostrictive and piezoelectric composites//J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93, № 12. – P. 9916-9919.
11. Laletsin V., Padubnaya N., Srinivasan G., De Vreugd C.P. Frequency dependence of magnetoelectric interactions in layered structures of ferromagnetic alloys and piezoelectric oxide//Appl. Physics. – 2004. – Vol. A78. – P. 33-37.
12. Ryu J., Carazo A.V., Uchino K., Kim H.E. Piezoelectric and Magnetoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate / Ni-Ferrite Particulate Composites//J. Electroceram. – 2001. – Vol. 7. – P. 17-24.
13. Shen X. Synthesis and magnetic properties of nanocomposite $\text{BaTiO}_3-\text{Ni}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ fibers by organic gel-thermal decomposition process//J. Sol-Gel Sci. Technol. – 2010. – Vol. 53. – P. 405-411.
14. Zheng H., Wang J., Lofland S.E. and el. Multiferroic $\text{BaTiO}_3-\text{CoFe}_2\text{O}_4$ Nanostructures//Science. – 2004. – Vol. 303. – P. 661-663.
15. Mahajan R.P. Magnetoelectric effect in cobalt ferrite-barium titanate composites and their electrical properties//Pramana. – 2002. – Vol. 58. – P. 1115-1124.
16. Рабкин Л.И. Высокочастотные ферромагнетики. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 528 с.
17. Копаев А.В., Остафийчук Б.К., Яремий И.П., Вилка И.Я. Структура и магнитные свойства Ni-Al-ферритовых порошков, синтезированных золь-гель методом автогорения//Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – Т. 10. – С. 79-83.
18. Коряев А.В., Остафийчук В.К., Вилка И.Я., Zhdnipyannyu D.L. Peculiarities of nickelaluminium ferrites nanopowder structure//Mat.-wiss. u. Werkstofftech.–2009.–Vol. 40, № 4.–P. 255-257.
19. Олехович Н.М., Мороз И.И., Пушкарев А.В., Радюш Ю.В., Салак А.Н. Температурная импеданс-спектроскопия твердых растворов $(1-x)\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3-x\text{LaMg}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_3$ //ФТТ. – 2008. – Т. 50, Вып. 3. – С. 472-478.
20. Hamelin A., Paulcel M. Croissance disconfime dans le ferrite de manganese dope au barium//Comptes Rendus. Hebdomadaires des sJances de L'academie des sciences. – 1968. – Vol. 266, № 23.
21. Малышев А.В., Пешев В.В., Притулов А.М. Температурные зависимости диэлектрических свойств литий-титановой ферритовой керамики//ФТТ. – 2004. – Т. 46, Вып. 1. – С. 185-188.
22. Kumar M.M., Srinivas A., Suryanarayana S.V., Bhimasankaram T. Dielectric and Impedance Stu-

- dies on BiFeO₃–BaTiO₃ Solid Solutions//Phys. Status Solidi A.– 1998. – Vol. 165. – P. 317-326.
23. Lanfredi S., Dessemond L., Rodrigues A.C.M. Effect of Porosity on the Electrical Properties of Polycrystalline Sodium Niobate: I, Electrical Conductivity//J. Am. Ceram. Soc.– 2003. – Vol. 86. – P. 291-298.
 24. Бушкова В.С., Копяев А.В. Исследования электрических свойств композитов системы $(1-x)\text{NiAl}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ //Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 52, № 4/5. – С. 43-47.
- ### LITERATURA
1. Bokov V.A. Fizika magnetikov. – Sankt-Peterburg: Nevskij Dialekt, 2002. – 256 s.
 2. Dzyaloshinskij I.B. K voprosu o magnitoelektricheskom effekte v antiferromagnetikah//ZhETF. – 1959. – Т. 37. – С. 881-882.
 3. Astrov D.N. Magnitoelektricheskiy effekt v okisi hroma//ZhETF. – 1961. – Т. 40. – С. 1035-1041.
 4. Folen V.J., Rado G.T., Stalder E.W. Anisotropy of the magnetoelectric effect in Cr₂O₃//Phys. Rev. Lett. – 1961. – Vol. 6, № 11. – P. 607-608.
 5. Pokatilov V.S., Pokatilov V.V., Sigov A.S. Lokalnye sostoyaniya ionov zheleza v multiferroikah Bi_{1-x}La_xFeO₃//FTT. – 2009. – Т. 51, Vyp. 3. – С. 518-524.
 6. Bichurin M.I., Petrov V.M., Filippov D.A., Srinivasan G. Magnito elektricheskiy effekt v kompozicionnyh materialah. – Velikij Novgorod: IPC NovGU, 2005. – 227 c.
 7. Liu Y.X., Wan J.G., Liu J.-M., Nan C.W. Numerical modeling of magnetoelectric effect in a composite structure//J. Appl. Phys.– 2003. – Vol. 94, № 8. – P. 5111-5117.
 8. Zhou J. Magnetoelectric CoFe₂O₄/Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃ double-layer thin film prepared by pulsed-laser deposition//App. Phys. Let. – 2006. – Vol. 88. – P. 103-111.
 9. Filippov D.A. Magnito elektricheskiy effekt v shirokoj plastinke iz gomogennogo ferritpezeoelektricheskogo kompozita//FMM. – 2005. – Т. 99, № 6. – С. 1-5.
 10. Wan J.G., Liu J.-M., Chand H.L.W, Choy C.L., Wang G.H., Nan C.W. Giant magnetoelectric effect of a hybrid of magnetostrictive and piezoelectric composites//J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93, № 12. – P. 9916-9919.
 11. Laletsin V., Padubnaya N., Srinivasan G., Devreugd C.P. Frequency dependence of magnetoelectric interactions in layered structures of ferromagnetic alloys and piezoelectric oxide//Appl. Physics. – 2004. – Vol. A78. – P. 33-37.
 12. Ryu J., Carazo A.V., Uchino K., Kim H.E. Piezoelectric and Magnetoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate/Ni-Ferrite Particulate Composites//J. Electroceram. – 2001. – Vol. 7. – P. 17-24.
 13. Shen X. Synthesis and magnetic properties of nanocomposite BaTiO₃–Ni_{1-x}Co_xFe₂O₄ fibers by organic gel-thermal decomposition process//J. Sol-Gel Sci. Technol. – 2010. – Vol. 53. – P. 405-411.
 14. Zheng H., Wang J., Lofland S.E. and el. Multiferroic BaTiO₃–CoFe₂O₄ Nanostructures//Science. – 2004. – Vol. 303. – P. 661-663.
 15. Mahajan R.P. Magnetoelectric effect in cobalt ferrite-barium titanate composites and their electrical properties// Pramana. – 2002. – Vol. 58. – P. 1115-1124.
 16. Rabkin L.I. Vysokochastotnye ferromagnetiki. – M.: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1960. – 528 s.
 17. Kopaev A.V., Ostafijchuk B.K., Yaremij I.P., Vylka I.Ya.. Struktura i magnitnye svojstva Ni-Al-ferritovyh poroshkov, sintezirovannyh zol-gel metodom avtogoreniya//Poverhnost. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. – 2007. – Т. 10. – С. 79-83.
 18. Kopayev A.V., Ostafijchuk B.K., Vylka I.Y., Zhdnipyanny D.L. Peculiarities of nickelaluminium ferrites nanopowder structure//Mat.-wiss. u. Werkstofftech. – 2009. – Vol. 40, № 4. – P. 255-257.
 19. Olehovich N.M., Moroz I.I., Pushkarev A.V., Radyush Yu.V., Salak A.N. Temperaturnaya impedans-spektroskopiya tverdyh rastvorov $(1-x)\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2}\text{TiO}_3 - x\text{LaMg}_{1/2}\text{Ti}_{1/2}\text{O}_3$ //FTT. – 2008. – Т. 50, Vyp. 3. – С. 472-478.
 20. Hamelin A., Paulcel M. Croissance disconfime dans le ferrite de manganese dope au barium//Comptes Rendus. Hebdomadaires des séances de Lacademie des sciences. – 1968. – Vol. 266, № 23.
 21. Malyshev A.V., Peshev V.V., Pritulov A.M. Temperaturnye zavisimosti dielektricheskikh svojstv litij-titanovoj ferritovoj keramiki//FTT. – 2004. – Т. 46, Vyp. 1. – С. 185-188.
 22. Kumar M.M., Srinivas A., Suryanarayana S.V., Bhimasankaram T. Dielectric and Impedance Studies on BiFeO₃–BaTiO₃ Solid Solutions//Phys. Status Sol. A. – 1998. – Vol. 165. – P. 317-326.
 23. Lanfredi S., Dessemond L., Rodrigues A.C.M. Effect of Porosity on the Electrical Properties of Polycrystalline Sodium Niobate: I, Electrical Conductivity//J. Am. Ceram. Soc. – 2003. – Vol. 86. – P. 291-298.
 24. Bushkova V.S., Kopaev A.V. Issledovaniya elektricheskikh svojstv kompozitov sistemy $(1-x)\text{NiAl}_{0.5}\text{Fe}_{1.5}\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ //Vostochno-Europejskiy zhurnal peredovyh tehnologij. – 2011. – Т. 52, № 4/5. – С. 43-47.