О.П. Федорчук^{1,2*}, С.О. Солопан¹, М.О. Попов³, І.В. Зависяк³, А.Г. Білоус¹

СИНТЕЗ НАНОРОЗМІРНИХ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА БАЗІ ОКСИДНИХ СИСТЕМ І СТВОРЕННЯ НЕВЗАЄМНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЇХ ОСНОВІ

¹ Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І. Вернадського НАН України, просп. академіка Палладіна, 32/34, Київ, 03142, Україна

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вулиця Володимирська, 60, Київ, 01033, Україна

*e-mail: alex1377c9@gmail.com

Синтезовано нанорозмірні частинки твердих розчинів нікель-цинкових феритів $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1$. З використанням синтезованих часток створено керовані магнітним полем композиційні резонатори на основі системи «немагнітний діелектричний резонатор – магнітна плівка», показана принципова можливість створення композиційних резонаторів із характеристиками, задовільними для використання в супергетеродинних передавачах, в якості динамічних фільтрів для пристроїв НВЧ діапазону, вентилів.

К л ю ч о в і с л о в а: композиційна структура, магнітне керування, ферит, товсті плівки, надвисокі частоти.

ВСТУП. На сьогодні стрімко розвиваються мережі бездротового зв'язку (мобільний зв'язок, мережі Wi-Fi – Wireless Fidelity, Bluetooth), при цьому ведеться постійна робота над удосконаленням їх технічного та програмного забезпечення. Для реалізації такого зв'язку необхідно розробляти спеціальні пристрої, наприклад твердотільні генератори, фільтри, приймачі з високим рівнем технічних характеристик. В свою чергу для створення таких пристроїв розроблено діелектричні матеріали з малими діелектричними втратами, високою температурною стабільністю властивостей [1]. Ці матеріали дозволяють розробити фільтри, дуплексери, мультиплексери, генератори, інші пристрої. Основним недоліком діелектричних резонаторів, які використовуються в якості елементної бази пристроїв надвисоких частот (НВЧ)

є те, що неможливо змінювати властивості цих матеріалів при дії зовнішніх електричного чи магнітного полів. Тому цілий ряд пристроїв, які необхідні для удосконалення мереж бездротового зв'язку, не можна розробити на даних діелектричних резонаторах. Наприклад динамічні фільтри НВЧ, гетеродинні передавачі, інші адаптовувані компоненти техніки НВЧ, здатні змінювати свої характеристики відповідно до вимог для вхідного/вихідного сигналу.

З іншого боку відомі феримагнітні матеріали на основі оксидних систем, властивості яких можна змінювати за рахунок впливу постійного магнітного поля. В той же час недоліком цих матеріалів є великі діелектричні втрати в НВЧ діапазоні.

Тому значний інтерес представляє створення композиційних резонансних елементів,

© О.П. Федорчук, С.О. Солопан, М.О. Попов, І.В. Зависяк, А.Г. Білоус., 2019

які складатимуться з діелектричного резонатора з високою добротністю та плівки фериту, властивості якої змінюються під дією на неї зовнішнього постійного магнітного поля, а також з'ясування можливості та механізм впливу на діелектричні характеристики таких композиційних резонаторів.

Метою даної роботи була розробка композиційних резонаторів «діелектрик – магнітна плівка» з магнітним керуванням параметрів; дослідження зміни властивостей отриманих резонаторів під дією магнітного поля та можливості їх використання для створення невзаємних пристроїв НВЧ діапазону.

ЕКСПЕРИМЕНТ ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Синтез нанорозмірних частинок твердих розчинів нікель-цинкових феритів $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1$) й дослідження їх властивостей.

Синтез нанорозмірних частинок твердих розчинів нікель-цинкових феритів проводився методом співосадження з водних розчинів гідроксидів. Для синтезу використовувались водні розчини нітратів заліза $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, нікелю $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ та цинку $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, у якості осаджувача використовували 1М розчин гідрооксиду натрію. Осадження солей проводили послідовно при різних значеннях рН, підібраних індивідуально для кожного металу. На першому етапі при значенні рН $4 \div 4,5$ проводили осадження солі $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. Далі при рН рівному $7,0 \div 7,2$ при неперервному перемішуванні проводили осадження солі $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$. Після осадження $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ та $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ рН маточного розчину підвищували до $8,5 \div 8,7$ і послідовно при неперервному перемішуванні осаджували розчин солі $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$.

Після повного осадження всіх компонентів проводили старіння осадів, для цього суспензію доводили до кипіння і кип'ятили впродовж 1 години. Під час кипіння підтримувати початковий об'єм суспензії.

Одержаний осад фільтрували та промивали дистильованою водою. Отриманий про-

дукт висушували в сушильній шафі при температурі $110-120^\circ\text{C}$. Кінцевий продукт отримувався після прожарювання осадів у муфельній печі в атмосфері повітря в широкому температурному діапазоні $500-800^\circ\text{C}$.

Розміри та морфологія частинок фериту визначали за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ) на приладі JEM 1400 Jeol.

Синтезовані порошки $\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1$, досліджували методом рентгенофазового (РФА) аналізу на дифрактометрі ДРОН-4 ($\text{CuK}\alpha$ -випромінювання). За методикою, представленою в [2], визначався ступінь кристалічності синтезованих нанорозмірних часток фериту.

Проводилось вимірювання магнітних властивостей отриманих порошків за допомогою вібраційного магнітометра LDJ-9500.

Виготовлення композиційних резонансних елементів «немагнітний високодобротний діелектрик – плівка фериту» та дослідження їх властивостей.

Для створення композиційних резонаторів спочатку готувалась плівкоутворююча суспензія, яка в подальшому наносилась на поверхню немагнітного діелектричного резонатора, виготовленого із легованого тетратитанату барію $\text{BaTi}_4\text{O}_9\text{-ZnO}$ [3]. Суспензія складалася з порошку фериту та фотополімеру Permabond UV630 й розмішувалась гомогенізатором ІКА T10 Standard впродовж 10-и хвилин. Далі отримана суспензія наносилась на один із торців циліндричного діелектричного резонатора, накривалась захисним склом й піддавалась полімеризації під дією УФ ламп. Полімеризація здійснювалась у полі, паралельному та перпендикулярному до осі зразка. При цьому використовувались дві лампи: перша лампа (6 Вт) забезпечувала плавну рівномірну полімеризацію при намагнічуванні частинок фериту в плівці протягом 1 год, друга лампа (36 Вт) забезпечувала остаточну полімеризацію фотополімеру в плівці у

всьому її об'ємі.

Як показали попередні дослідження, проведені в [4], оптимальною товщиною плівки фериту є 100 нм. Тому в подальшому робота велась із композиційними резонаторами з магнітними плівками товщиною 100 нм.

Вимірювання електрофізичних властивостей проводились за допомогою векторного аналізатора НВЧ класу Agilent N5230A (PNA-L Network Analyzer) в режимі біжучої хвилі в сантиметровому діапазоні довжин хвиль у вимірювальній комірці, яка представляла собою прямокутний металевий X-band хвилевід, площа перерізу хвилеводу $23 \times 10 \text{ мм}^2$. Зразки розміщувались безпосередньо на металевій стінці хвилеводу, магнітне поле створювалось постійним магнітом з регульованою відстанню між полюсами у напрямку, паралельному до осі резонаторів. Така конструкція комірки забезпечує екранування досліджуваних зразків й усуває втрати на випромінювання діелектричного резонатора. Скляна підкладка віддаляла резонатор від металевих стінок хвилеводу, що сприяло зменшенню втрат за рахунок вихрових струмів. Оптимальне значення величини зв'язку підбиралось шляхом поперечного переміщення композитного резонатора в межах хвилеводу. Були отримані спектри поглинання створених композиційних резонаторів.

ВИСНОВКИ. Рентгенограми синтезованих частинок твердого розчину нікель-цинкового фериту на прикладі складу $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ після термообробки при різних температурах представлені на рисунку 1, а. Як показали результати РФА-досліджень, утворення однофазних кристалічних частинок нікель-цинкових феритів відбувається вже за температури 500°C в одну стадію. Однак, зважаючи на малий ступінь кристалічності й розміри частинок продукту, оптимальними обрано частинки, синтезовані за температури 800°C . Ступінь кристалічності для частинок фериту після термообробки за різних температур: 500°C – 32,66%; 600°C –

Рис. 1. Рентгенограми частинок твердого розчину нікель-цинкового фериту $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ після термообробки за температури 1 – 500°C , 2 – 600°C , 3 – 650°C , 4 – 700°C , 5 – 800°C (а) та мікрофотографія частинок фериту (б). На вставці до рис. 1, б наведено розподіл частинок фериту за розмірами.

Таблиця. 1

Насипна намагніченість та коерцитивна сила для синтезованих нанорозмірних часток твердих розчинів нікель-цинкових феритів $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Склад	$M_s, \text{А/м}^2\text{кг}$	$H_c, \text{Е}$
ZnFe_2O_4	1,0	31
$\text{Ni}_{0,05}\text{Zn}_{0,95}\text{Fe}_2\text{O}_4$	1,6	34,4
$\text{Ni}_{0,1}\text{Zn}_{0,9}\text{Fe}_2\text{O}_4$	2,0	34,6
$\text{Ni}_{0,15}\text{Zn}_{0,85}\text{Fe}_2\text{O}_4$	4,2	27,4
$\text{Ni}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{Fe}_2\text{O}_4$	6,0	28,1
$\text{Ni}_{0,25}\text{Zn}_{0,75}\text{Fe}_2\text{O}_4$	11,3	25,1
$\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$	20,9	19,6
$\text{Ni}_{0,75}\text{Zn}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$	17,3	12,4
NiFe_2O_4	16,3	63,2

34,21%; 650°C – 41,65%; 700°C – 51,68%; 800°C – 89,13%. Середній розмір частинок відповідно до мікрофотографій становив 50 нм.

Були виміряні магнітні властивості порошків усіх синтезованих складів. Як видно з результатів, наведених в табл., найвище значення намагніченості насичення спостерігається для фериту $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$, при зміні вказаного співвідношення між йонами нікелю та цинку у фериті відбувається зменшення намагніченості в сформованій структурі частково оберненої шпінелі.

Розрахунок взаємодії полів у композиційній структурі з використанням теорії збурень [5, 6] показує, що зміщення частоти резонансу пропорційне намагніченості фериту, а, отже, обмежується намагніченістю насичення матеріалу. Тому саме ферит $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ було використано для подальшої роботи.

Рис. 2. Спектри поглинання композиційних резонаторів з плівками фериту $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (напрямок поля при полімеризації магнітної плівки зображено на вставках). Величина зовнішнього змещуючого магнітного поля: 1, 4 – 1430; 2 – 3530; 3 – 800 Е (а); 2, 4 – 0; 1, 3 – 800 Е (б).

Спектри поглинання композиційних резонаторів з плівкою нікель-цинкового фериту $\text{Ni}_{0,5}\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ представлені на рис. 2. Було показано, що зміщення резонансної частоти елементів під впливом постійного магнітного поля може досягати величини до 71 МГц на частотах порядку 10-11 ГГц. Такого зміщення достатньо для використання в якості динамічних фільтрів у радарних системах (погодні, морські навігаційні радары, ін.) або у зв'язку стандарту GSM за умови виготовлення резонаторів для менших частот. Зазначимо, що вплив магнітного поля на характеристики композиційних резонаторів більш відчутний, якщо феритові плівки при полімеризації намагнічувалися вздовж осі резонатора, й менш відчутний, якщо плівка полімеризувалася у полі, перпендикулярному до осі резонатора. Це може бути пов'язано з більшою узгодженістю напрямку зовнішнього магнітного поля і внутрішнього поля фериту у вимірювальній комірці для композиційного резонансного елементу з плівкою, яка при полімеризації намагнічувалася вздовж його осі.

В результаті проведених досліджень була виявлена надзвичайно висока невзаємність поглинання елементів. Величина невзаємності (розв'язка) становила ~ 53 дБ (рис. 2б). Це означає, що зменшення інтенсивності сигналу при його проходженні в протилежних напрямках у хвилеводі відрізняється приблизно в 440 раз. При цьому максимальне поглинання рівне 68 дБ (більше 99,9 %). Для прикладу: розв'язка для стандартних одноелементних феритових НВЧ вентилів становить 20 дБ (10 разів) [7]. Однак вентиль мусить практично повністю пропускати енергію хвилі в одному з напрямків і не пропускати в зворотному напрямку. А для створеного композиційного резонатора, розміщеного в хвилеводі, поглинання в «прямому» напрямку досягає значення 14 дБ (80%), в «зворотному» напрямку – 68 дБ (99%). Тобто затухання сигналу залишається високим в обох напрямках

проходження хвилі через вимірювальну комірку.

Для з'ясування принципової можливості використання композиційних резонаторів в невзаємних пристроях НВЧ (вентилі) було здійснене моделювання вимірювальної комірки за допомогою програмного забезпечення *Ansys HFSS* [8] рис. 3.

Рис. 3. Модель композиційного резонатора у хвилеводі.

Параметри модельного резонатора та хвилеводу підбирались максимально наближеними до параметрів їх реальних прототипів. При підборі правильної позиції резонатора в хвилеводі, аналогічно до практичного дослідження, вдалось досягти поставленої мети, отриманий спектр поглинання представлений на рис. 4.

Рис. 4. Спектр поглинання моделі композиційного резонатора. S_{21} – спектр при «зворотному» напрямку проходження хвилі у фериті, S_{12} – поглинання енергії в «прямому» напрямі

Як показали розрахунки, поглинання в резонансі в «прямому» напрямі проходження хвилі не перевищувало 0,8 дБ, а в «зворотному» складало 34 дБ (98%), що повністю відповідає вимогам практичного застосування.

Розрахунок розподілу магнітного поля у змодельованій вимірювальній комірці показав, що напруженість магнітного поля всередині композиційного резонатора, зокрема в феритовій плівці, перевищує напруженість поля у решті об'єму хвилеводу в 8 разів. При цьому, відповідно до розрахунків, сама плівка не здатна забезпечити достатню розв'язку. Отримані значення поглинання для магнітної плівки без діелектричного резонатора не перевищують 1,6 дБ. Однак у випадку композиційного елемента спостерігається синергетичний ефект: немагнітна складова резонатора затягує електромагнітне поле в об'єм резонатора, за рахунок чого магнітна плівка працює набагато більш ефективно.

Подібні композиційні елементи можуть бути використані в якості заміни використовуваних феритових вентилів, при цьому вимагатимуть менших зміщуючих полів, внеситимуть менші енергетичні втрати поза областю феромагнітного резонансу.

ВИСНОВКИ. В роботі було синтезовано нанорозмірні частинки твердих розчинів нікель-цинкових феритів методом співосадження гідроксидів металів з відповідних водних розчинів, досліджено їх властивості. З використанням синтезованих частинок створено циліндричні композиційні резонансні елементи, які склались із високодобротного діелектричного немагнітного резонатора та магнітної плівки, нанесеної на торці резонатора.

Отримано спектри поглинання композиційних резонаторів, які підтверджують, що є можливим керування частотою композиційної структури та поглинанням за допомогою зовнішнього постійного магнітного поля. Результати проведеного додаткового моделювання вимірювальної комірки з роз-

міщенням всередині композиційним резонатором показують, що є можливим створення композиційних резонаторів з необхідним для практичного використання рівнем характеристик й керованості.

Показано, що подібні елементи можна використати в супергетеродинних передавачах, в якості динамічних фільтрів для пристроїв НВЧ діапазону, вентилів. Порівняно зі стандартними вентилями, отримані структури потребують менших зміщуючих полів для роботи, використовують менший об'єм магнітного матеріалу, що потенційно зменшує втрати енергії поза областю резонансу композиційних елементів.

СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ И СОЗДАНИЕ НЕВЗАИМНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Федорчук А.П.^{1,2*}, Солопан С.А.¹, Попов М.А.³, Зависляк И.В.³, Белоус А.Г.¹

¹Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины, просп. академика Палладина, 32/34, Киев, 03142, Украина

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

³Киевский национальный университет имени Тараса Шевченка, улица Владимирская, 60, Киев, 01033, Украина

*e-mail: alex1377c9@gmail.com

Синтезировано наноразмерные частицы твердых растворов никель-цинковых ферритов $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$, $x = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 1$. С использованием синтезированных частиц созданы управляемые магнитным полем композиционные резонаторы на основе системы «немагнитный диэлектрический резонатор – магнитная пленка», показана принципиальная возможность создания композиционных резонаторов с характеристиками, удовлетворительными для использования в супергетеро-

динных передатчиках, в качестве динамических фильтров для устройств СВЧ диапазона, вентилей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: композиционная структура, магнитное управление, феррит, толстые пленки, сверхвысокие частоты.

SYNTHESIS OF NANOSCALED MAGNETIC MATERIALS ON THE BASIS OF OXIDE SYSTEMS AND MANUFACTURING OF NON-RECIPROCAL COMPOSITE ELEMENTS BASED ON THEM

Fedorchuk O.P.^{1,*}, Solopan S.O.¹, Popov M.O.³, Zavislyak I.V.³, Belous A.G.¹

¹Vernadsky Institute of general and inorganic chemistry of the Ukrainian National Academy of Sciences, akademika Palladina av., 32/34, Kyiv, 03142, Ukraine

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy av., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, Volodymyrska street, 60, Kyiv, 01033, Ukraine

*e-mail: alex1377c9@gmail.com

Nanoscaled particles of nickel-zinc ferrites solid solutions were synthesized by the method of precipitation from aqueous solutions, as initial reagents were used nitrates solutions, namely $Fe(NO_3)_3$, $Ni(NO_3)_2$ and $Zn(NO_3)_2$. Cylindrical composite resonant elements in a form of systems "high-Q non-magnetic dielectric – magnetic film" were manufactured using synthesized particles. As a non-magnetic dielectric was used barium tetratitanate $BaTi_4O_9$ with a doping of ZnO. For this the film-forming suspension consisted of synthesized ferrite particles and photopolymer was prepared. The suspension was applied on the end face of the dielectric resonator and polymerized by the UV radiation. Magnetic field of electromagnet was applied to the composite resonators during the magnetic film polymerization process (parallel or normal to the resonators axis).

Absorption spectra of composite resonators in the waveguide measuring cell under influence of an external magnetic field were obtained. Spectra confirm the opportunity to control the resonance frequency of the composite structure and energy

absorption in it using the external permanent magnetic field. The tuning of composite resonators parameters was more efficient for the resonators with the film polymerized in the parallel to the resonator axis field. For the frequency shift and electromagnetic isolation were obtained the values of 71 MHz and 53 dB respectively but with a high “straight” energy losses in the area of ferromagnetic resonance. So, the measuring cell with the composite resonator located in it was simulated using an Ansys HFSS software. Respective absorption spectra were obtained. It is shown that it is possible to manufacture composite resonators with a needed for the practical applications characteristics level (reverse losses were 34 dB, straight losses were 0.8 dB) and a tuning ability for the development of superheterodyne transmitters, dynamic filters for microwave technics, microwave valves, etc.

Keywords: composite structure, magnetic tuning, ferrite, thick films, microwave frequencies

ЛІТЕРАТУРА

1. Belous, O. Ovchar, M. Valent [et al.]. Abnormal behavior of the dielectric parameters of $\text{Ba}_{6-x}\text{Ln}_{8+2x/3}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$ (Ln = La-Gd) solid solutions // *Journal of Applied Physics*. -2002. -**92**, -N. 7. -P. 3917-3922.
2. Barbieri L., Ferrari A., Lancelotti I., Leonelli C., Rincón J.M. Crystallization of $(\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO})-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glassy systems formulated from waste products. // *J. Am. Ceram. Soc.* -2000. -**83**. -P. 2515-2520.
3. Белоус А. Г. Высокодобротные сверхвысокочастотные диэлектрики. - [Наукова думка](#), 2016.
4. K.D. Solovyova, O.P. Fedorchuk, M.A. Popov, I.V. Zavislyak, A.G. Belous. Development of composite magnetically tuned nanoheterostructures based on the system “the thick film of nickel ferrite with a spinel structure – dielectric resonator of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ” // *Ukrainian chemical journal*. - 2016. -**82**, -N. 5. -P. 10 – 14.
5. Zavislyak I.V., Popov Maksym A., Solovyova Ekateryna D., Solopan Sergiiv,

Belous Anatolii Grigorovich. Dielectric ferrite film heterostructures for magnetic field controlled resonance microwave components. // *Materials Science and Engineering B*. -July 2015. -**197**. -P. 36-42.

6. Popov M. A., Zavislyak I. V., Chumak H. L., Strugatsky M. B., Yagupov S. V., Srinivasan G. Ferromagnetic resonance in a single crystal of iron borate and magnetic field tuning of hybrid oscillations in a composite structure with a dielectric: Experiment and theory. // *J. of Appl. Phys.* -2015. -**118**, -N. 1. -P. 013903-1 - 013903-9.
7. UIY.inc. RF waveguide isolators. https://www.uiy.com/Waveguide_Isolator.
8. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. –Москва, 2004.

REFERENCES

1. Belous, O. Ovchar, M. Valent [et al.]. Abnormal behavior of the dielectric parameters of $\text{Ba}_{6-x}\text{Ln}_{8+2x/3}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$ (Ln = La-Gd) solid solutions. *Journal of Applied Physics*. 2002. **92**, 7: 3917-3922.
2. Barbieri L., Ferrari A., Lancelotti I., Leonelli C., Rincón J.M. Crystallization of $(\text{Na}_2\text{O}-\text{MgO})-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ glassy systems formulated from waste products. *J. Am. Ceram. Soc.* 2000. **83**: 2515-2520.
3. Belous A. G. *High-Q microwave dielectrics*. (Naukova Dumka, 2016). [in Russian].
4. K.D. Solovyova, O.P. Fedorchuk, M.A. Popov, I.V. Zavislyak, A.G. Belous. Development of composite magnetically tuned nanoheterostructures based on the system “the thick film of nickel ferrite with a spinel structure – dielectric resonator of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ”. *Ukrainian chemical journal*. 2016. **82**, 5: 10 – 14. [in Ukrainian].
5. Zavislyak I.V., Popov Maksym A., Solovyova Ekateryna D., Solopan Sergiiv,

- Belous Anatolii Grigorovich. Dielectric ferrite film heterostructures for magnetic field controlled resonance microwave components. *Materials Science and Engineering B*. July 2015. **197**: 36-42.
6. Popov M. A., Zavislyak I. V., Chumak H. L., Strugatsky M. B., Yagupov S. V., Srinivasan G. Ferromagnetic resonance in a single crystal of iron borate and magnetic field tuning of hybrid oscillations in a composite structure with a dielectric: Experiment and theory. *J. of Appl. Phys.* 2015. **118**, 1: 013903-1 - 013903-9.
7. UIY inc. RF waveguide isolators. https://www.uiy.com/Waveguide_Isolator.
8. Bankov S.E., Kurushyn A.A., Razevig V.D. *Analysis and optimization of microwave structures using HFSS*. (Moscow, 2004). [in Russian].

Надійшла 08.07.2019