

УДК 621.317.4

**ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
НЕНАМАГНІЧЕНОГО ВИСОКОЧАСТОТНОГО ФЕРИТА
У ШИРОКІЙ СМУЗІ ЧАСТОТ**

*Вунтесмері Вол. С.¹, к.т.н. доцент, Максимчук Т. М., магістрантка
Національний технічний університет
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,
Nikartf@yandex.ru*

**RESEARCH OF MAGNETIC PROPERTIES NONMAGNETIZED
HIGH-FREQUENCY FERRITE IN A WIDE FREQUENCY BAND**

*Vountesmery Vol., PhD, Associate Professor; Maksymchuk T., Undergraduate Student
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine,*

Вступ

Високочастотні ферити набули широкого застосування в фазообертачах НВЧ діапазону. Феритові фазообертачі поділяють на дві великі групи — аналогові, які плавно змінюють фазу від 0 до 360° на виході, і дискретні, які змінюють фазу від 0 до 360° дискретно з заданим кроком.

Невзаємні дискретні феритові фазообертачі зберігають інформацію про попередній фазовий стан без зовнішнього магнітного поля. Зміна фази на виході феритового фазообертача залежить від зміни дійсної частини магнітної проникності ферита. Уявна частина магнітної проникності ферита відповідає за втрати в фазообертачі. Досліджуючи характеристики ненамагніченого ферита у широкому діапазоні частот, можна підібрати марку ферита для виготовлення фазообертача з оптимальними характеристиками в заданій смузі робочих частот.

Проблемі вимірювань магнітної проникності феритів присвячені роботи [1–3, 6–9]. Для дослідження магнітної проникності використовують резонаторні, хвилеводні, гібридні, оптичні та інші методи дослідження [5]. В роботі [4] проводились дослідження магнітної проникності ненамагніченого ферита для дискретних хвилеводних фазообертачів.

Відомі методи дозволяють отримати результат на одній частоті. Перехід на іншу частоту потребує переналаштовування вимірювального стенду.

Метою роботи є дослідження дійсної (μ') та уявної частини (μ'') магнітної проникності та дійсної частини ефективної магнітної проникності ($\mu'_{\text{еф}}$) ненамагніченого високочастотного ферита в широкій смузі частот за одну установку.

Теоретична частина

Для дослідження дійсної та уявної частини магнітної проникності та дійсної частини ефективної магнітної проникності ненамагніченого високочастотного ферита в широкій смузі частот за одну установку використовується мікροстрічковий резонатор, довжина якого в декілька разів перевищує довжину хвилі в мікροстрічковій лінії. Такий резонатор використовувався в роботі [9] для дослідження магнітної проникності нанопорошків феритів гексагональної структури.

Довжина l розімкнутого на кінцях відрізка мікροстрічкової лінії (МСЛ), яка використовується в якості мікροстрічкового резонатора (рис.1) кратна цілому числу на півхвиль $\lambda/2$:

$$l = \frac{n\lambda}{2}, \quad (1)$$

де $\lambda = \frac{v_\phi}{f_{0n}}$, v_ϕ — фазова швидкість електромагнітної хвилі, f_{0n} — резонансна частота мікροстрічкового резонатора, $n = 1, 2, \dots$ — число стоячих напівхвиль в резонаторі.

Таким чином, відрізок довгої лінії як резонансна система має нескінченне число власних видів коливань різних частот, що відповідають різним значенням n . Кожне власне коливання збуджується відповідною резонансною частотою.

Основним типом хвиль для МСЛ на феритовій підкладинці є хвиля типу квазі T . Фазова швидкість електромагнітної хвилі типу квазі T в МСЛ:

$$v_\phi = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ef}\mu'_{efn}}}, \quad (2)$$

де c — швидкість світла, μ'_{ef} — дійсна частина ефективної магнітної проникності, ϵ_{ef} — ефективна діелектрична проникність.

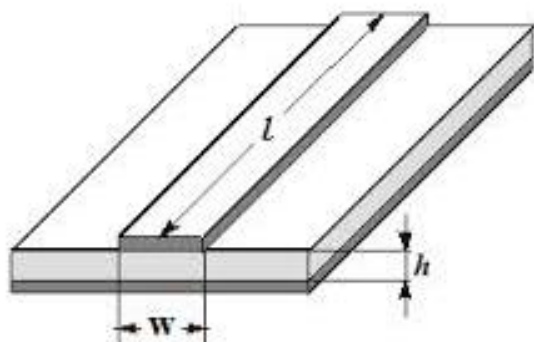


Рис. 1

Величина ϵ_{ef} залежить від відносної діелектричної проникності ϵ підкладинки і співвідношення ширини мікροстрічки w та висоти діелектричної підкладинки h . Фазова швидкість, а отже і ϵ_{ef} хвилі типу квазі T залежить від частоти. Частотну залежність можна знайти експериментально, використовуючи аналогічну лінію передачі на діелектричній підкладинці з

тим же значенням діелектричної проникності, що і ферит. Для простоти

теоретичних розрахунків величини ϵ_{ef} передбачається, що в МСЛ поширюються коливання типу T .

З врахуванням зроблених передбачень розрахункові співвідношення для ϵ_{ef} для вузької стрічки $w/h < 1$ [10]:

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon + 1}{\epsilon} \left[1 + \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1} \frac{\ln(\pi/2) + \frac{(\ln(4/\pi))}{\epsilon}}{\ln(8h/w)} \right].$$

Підставивши рівняння (2) в (1), отримаємо значення дійсної частини ефективною магнітної проникності на частоті f_{0n} :

$$\mu'_{efn}(f_{0n}) = \left(\frac{cn}{2lf_{0n}\sqrt{\epsilon_{ef}}} \right)^2 \quad (3)$$

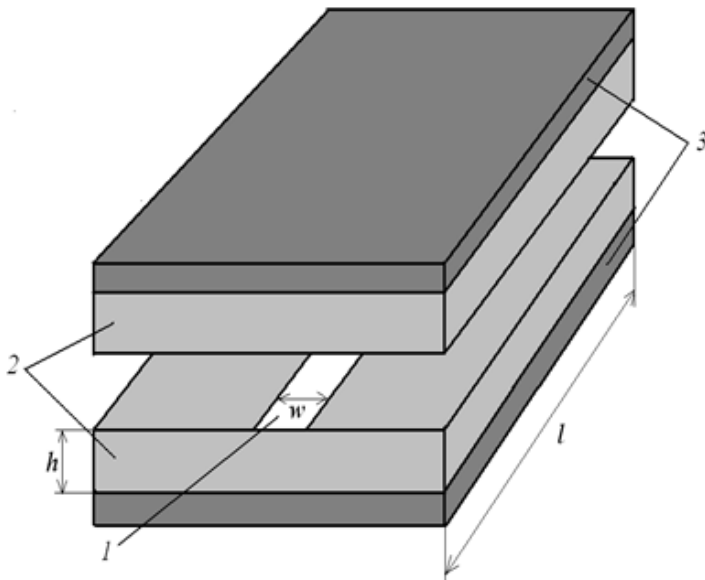


Рис. 2

Для дослідження дійсної частини відносної магнітної проникності ферита необхідна лінія передачі з однорідним діелектричним заповненням, тоді формула для фазової швидкості на частоті f_{0n} в такій симетричній стрічковій лінії (рис.2) буде мати наступний вигляд:

$$v_{\phi}(f_{0n}) = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu'_n}}$$

Тобто, значення магнітної проникності знаходимо за формулою:

$$\mu'_n(f_{0n}) = \left(\frac{cn}{2lf_{0n}\sqrt{\epsilon}} \right)^2 \quad (4)$$

Для визначення μ''_n в залежності від частоти f_{0n} на ряду з вимірюванням резонансних частот мікροстрічкового резонатора вимірювалась добротність резонатора на кожній резонансній частоті:

$$Q_n(f_{0n}) = \frac{f_{0n}}{\Delta f_{0n}}, \quad (5)$$

де Δf_{0n} — ширина резонансної кривої.

Оскільки, тангенс діелектричних втрат діелектрика вважається меншим ніж тангенс магнітних втрат, будемо вважати, що основні втрати відбуваються за рахунок магнітних втрат, тому

$$\tan \delta = \frac{1}{Q_n} = \frac{\mu''_n}{\mu'_n},$$

Тоді значення уявної частини магнітної проникності з урахуванням (5) знаходимо за формулою:

$$\mu'' = \frac{\mu' \Delta f_{0n}}{f_{0n}} \quad (6)$$

Експериментальне дослідження

Для експериментального дослідження μ'_{ef} використовувався мікροстрічковий резонатор у вигляді МСЛ, довжиною l на феритовій підкладці, який схематично зображений на рис. 1.

Ширина стрічки $w = 0,6$ мм, довжина $l = 51$ мм, висота підкладки $h = 1$ мм, електрична проникність вибраного фериту із залізо-ітрієвого гранату $\epsilon = 14$.

Схематичне зображення вимірювального стенда наведено на рис. 3:

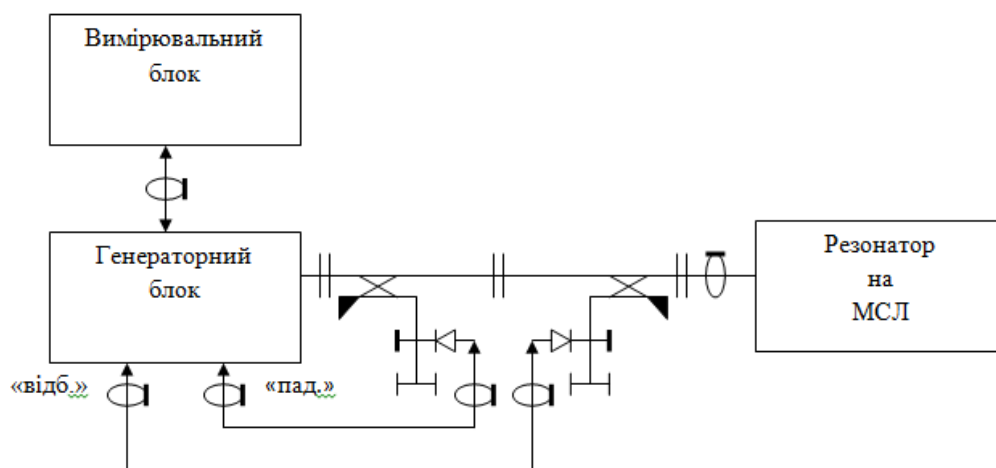


Рис. 3

Резонансні частоти спостерігались на екрані панорамних вимірювачів КСХН типів Р2-54, Я2Р-75.

Номер резонансу знаходили за допомогою зонду по числу стоячих напівхвиль вздовж мікροстрічкового резонатора. Вимірювались резонансні частоти, починаючи з третього резонансу: $f_3 = 4,876$ ГГц, $f_4 = 5,826$ ГГц, $f_5 = 7,046$ ГГц, $f_6 = 8,336$ ГГц, $f_7 = 9,17$ ГГц, $f_8 = 10,295$ ГГц, $f_9 = 11,411$ ГГц, $f_{10} = 12,378$ ГГц.

З формули (3) знаходимо залежність μ_{efn} від частоти (рис.4):

Вимірювальний макет для дослідження уявної та дійсної частини магнітної проникності представлений на рис. 2. Симетрична стрічкова лінія (1), розташована між двома феритовими пластинами (2), та заземленими провідниковими пластинами (3). Ширина стрічки $w = 0,6$ мм, довжина $l = 77$ мм, висота підкладки однієї феритової пластини $h = 0,8$ мм, електрична проникність вибраного фериту із залізо-ітрієвого гранату $\epsilon = 14$.

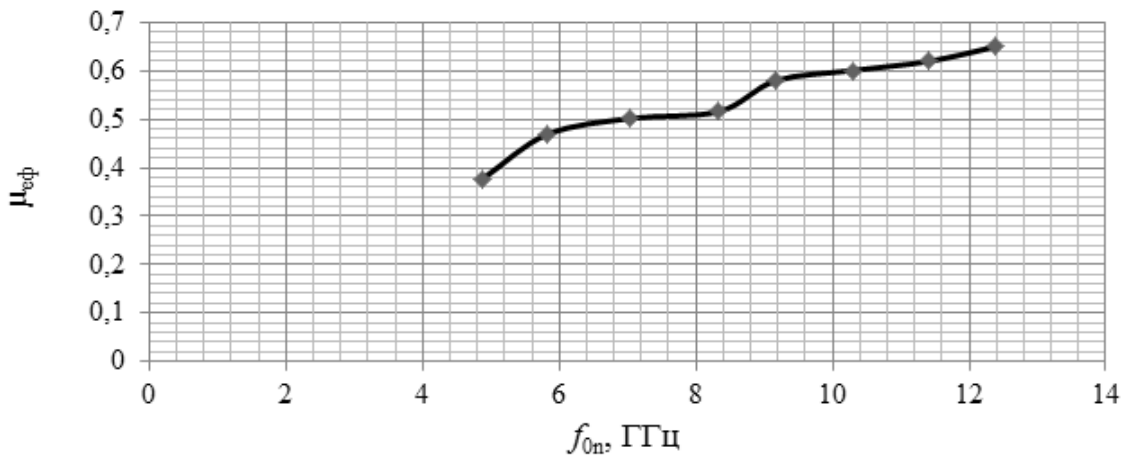


Рис. 4

По описаній вище методиці з використанням формули (4) був побудований графік залежності значення дійсної частини магнітної проникності від частоти (рис.5).

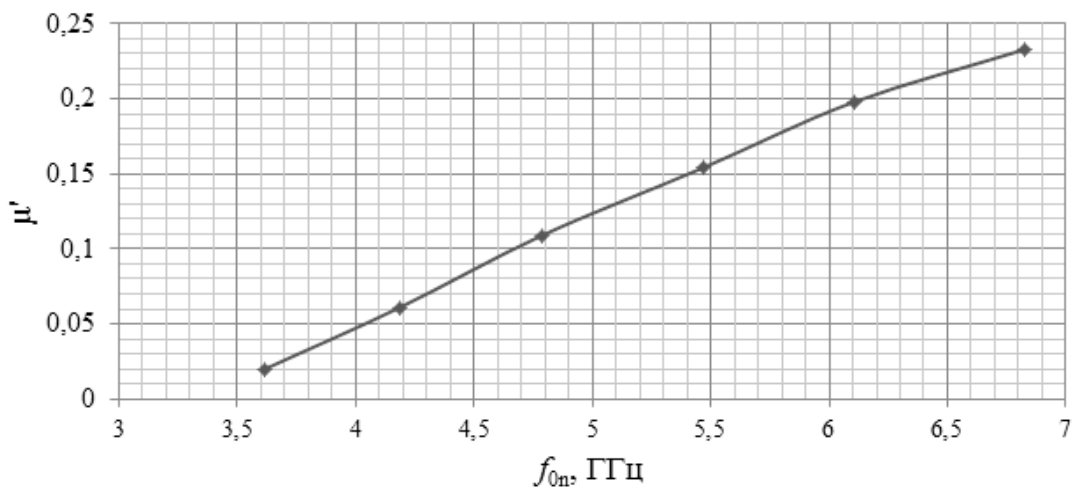


Рис. 5

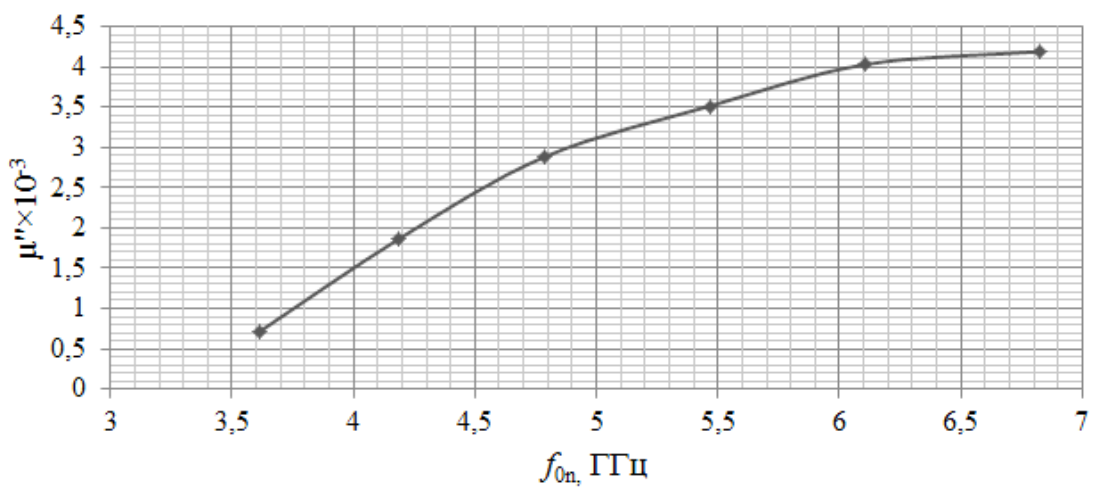


Рис. 6

Для резонатора на симетричній лінії передачі у діапазоні частот 3,5..7 ГГц на кожній резонансній частоті була визначена ширина резонансної кривої на кожній частоті резонансу. По формулі (6) визначили залежність уявної частини магнітної проникності від частоти (рис. 6).

З рис. 5 та 6 видно, що на частоті 3,6 ГГц μ' та μ'' переходять через нуль, а далі переходить в область від'ємних значень, які обумовленні ферромагнітним резонансом у внутрішніх магнітних полях не намагніченого фериту.

Висновок

Для дослідження в широкій смузі частот матеріалів для феритових фазообертачів досить зручним і надійним є використання багатомодового резонатора на стрічкових та мікrostрічкових лініях передачі.

Для вибору необхідного діапазону частот, необхідно враховувати як значення μ' , так і μ'' , яке відповідає за втрати електромагнітної енергії в феритовому пристрої.

Перелік посилань

1. Никольский В. В. Измерение параметров ферритов на сверхвысоких частотах / В. В. Никольский // Радио и электроника. – 1956. – Т.1, №4. – С. 447-468.
2. Пильщиков А. П. О методе определения параметров ферромагнитного резонанса по экспериментальным данным / А. П. Пильщиков // ЖЭТФ. – 1955. – Т. 29, №.6. – С. 798.
3. Васильев З. Н. Новый метод измерения параметров намагниченных ферритов на сантиметровых волнах / Радиотехника и электроника. – 1956. – Т.1, № 11. – С.1444-1460.
4. Покусин Д. Н. Тензор магнитной проницаемости феррита, находящегося в состоянии остаточного намагничивания. / Д. Н. Покусин, М. Ю. Залесский // Труды конференций по электронной технике. Ферритовые СВЧ приборы и материалы. – Москва, «Электроника», Вып.1 (17). – 1970. – С.239-243.
5. Абаренкова С. Г. Методики измерения компонент тензора магнитной проницаемости ферритов в диапазоне СВЧ / С. Г. Абаренкова, В. Б. Виноградов, Ю. Н. Носков. – М. : «Электроника», 1972. – 30 с.
6. Дударев М. С. Исследование частотной зависимости магнитной проницаемости ферромагнитных изделий : дис. ... кандидата физ-мат наук. : 01.04.11 / М. С. Дударев. – Екатеринбург, 1999 – 27 с.
7. Беляев Б.А. Исследование электромагнитных параметров бикомплексных сред на СВЧ с помощью нерегулярного микрополоскового резонатора / Б.А. Беляев, В.А. Журавлев, В.И. Суляев и др. // Препринт №735-ф. Красноярск. Ин-т физики СО АН СССР. 1994. – 54 с.
8. Коровин Е.Ю. Частотные зависимости магнитной проницаемости наноразмерных порошков гексаферритов системы CoZnW / Е.Ю. Коровин, О.А. Доценко, В.И. Суляев // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. –с. 310 - 312.
9. Доценко О. А. Использование нерегулярных микрополосковых резонаторов для измерения температурных зависимостей магнитной проницаемости порошков ферритов : дис. канд. физ-мат. наук в форме науч. докл. 01.04.11 / О. А. Доценко. – Томск,

2007 – 115 с.

10. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ / Л. Г. Малорацкий. – М. : «Сов.радио», 1976. – 216 с.

Reference

1. Nikol'skii V.V. (1956) Izmerenie parametrov ferritov na sverkhvysokikh chastotakh [Measurement of the parameters of ferrites at microwave frequencies]. Radio i elektronika, Vol. 1, No 4, pp. 447-468.
2. Pil'shchikov A.P. (1955) O metode opredeleniya parametrov ferrimagnitnogo rezonansa po eksperimental'nym dannym [The method of determining the parameters of the ferrimagnetic resonance from the experimental data]. ZhETF, Vol. 29, No. 6, pp. 798.
3. Vasil'ev Z.N. (1956) Novyi metod izmereniya parametrov namagnichennykh ferritov na santimetrovykh volnakh [New method for measuring the parameters of magnetized ferrites at centimeter wavelengths]. Radiotekhnika i elektronika, Vol.1, No 11. pp.1444-1460.
4. Pokusin D.N. and Zalesskii M.Yu. (1970) Tenzor magnitnoi pronitsaemosti ferrita, nakhodyashchegosya v sostoyanii ostatochnogo namagnichivaniya [The magnetic permeability tensor of ferrite in a state of residual magnetization]. Ferritovye SVCh pribory i materialy, Trudy konferentsii po elektronnoi tekhnike [Microwave ferrite devices and materials, Conf. proc. in electronic engineering], Moscow, Elektronika Publ., Issue 1 (17), pp.239-243.
5. Abarenkova S.G., Vinogradov V.B. and Noskov Yu.N. (1972) Metodiki izmereniya komponent tenzora magnitnoi pronitsaemosti ferritov v diapazone SVCh [Methods of measuring the components of the permeability tensor of ferrite in Microwave range]. Moscow, Elektronika Publ., 30 p.
6. Dudarev M. S. (1999) Issledovanie chastotnoi zavisimosti magnitnoi pronitsaemosti ferromagnitnykh izdelii. Diss kandidata fiz.-mat. nauk [Methods of measuring the components of the permeability tensor of ferrite in the Microwave range. Dis. Cand of Science]. Ekaterinburg, 27p.
7. Belyaev B.A., Zhuravlev V.A. and Suslyayev V.I. (1994) Issledovanie elektromagnitnykh parametrov bikompleksnykh sred na SVCh s pomoshch'yu neregulyarnogo mikropoloskovogo rezonatora [Study of electromagnetic parameters of bicomplex media Microwave using irregular microstrip resonator]. Preprint No 735-f, Krasnoyarsk, In-t fiziki SO AN SSSR, 54 p.
8. Korovin E.Yu., Dotsenko O.A. and Suslyayev V.I.(2004) Chastotnye zavisimosti magnitnoi pronitsaemosti nanorazmernykh poroshkov geksaferritov sistemy CoZnW [Frequency dependence of the magnetic permeability of hexaferrite nanopowders CoZnW]. Sovremennye problemy radioelektroniki, Sb. nauch. tr. [Modern Problems of Radio Electronics, Conf. Proc.], Krasnoyarsk, IPTs KGTU, pp. 310-312.
9. Dotsenko O.A. (2007) Ispol'zovanie neregulyarnykh mikropoloskovykh rezonatorov dlya izmereniya temperaturnykh zavisimostei magnitnoi pronitsaemosti poroshkov ferritov. Diss kandidata fiz.-mat. nauk [Use of irregular microstrip resonators for measuring the temperature dependence of the magnetic permeability ferrite powder. Dis. Cand of Science]. Tomsk, 115 p.
10. Maloratskii L.G. (1976) Mikrominuityarizatsiya elementov i ustroystv SVCh [Miniaturization of components and devices Microwave]. Moscow, Sov. radio Publ., 216 p.

Вунтесмері Вол. С., Максимчук Т. М. Дослідження магнітних властивостей не-намагніченого високочастотного ферита у широкій смузі частот. Розглянуто експериментальний метод дослідження дійсної (μ') та уявної частини (μ'') магнітної проникності та дійсної частини ефективної магнітної проникності (μ'_{ef}) немагніченого високочастотного ферита в широкій смузі частот за одну установку. Представлені графіки залежності μ' , та μ'' від резонансної частоти. Показано, що для вибору необхідного діапазону частот, необхідно враховувати як значення μ' , так і μ'' , яке відповідає за втрати електромагнітної енергії в феритовому пристрої.

Ключові слова: мікстрічкова лінія передачі; магнітна проникність; ефективна діелектрична проникність; фазообертач, ферит.

Вунтесмери Влад. С., Максимчук Т. М. Исследование магнитных свойств немагнитного высокочастотного феррита в широкой полосе частот. Рассмотрены экспериментальный метод исследования действительной (μ') и мнимой части (μ'') магнитной проницаемости и действительной части эффективной магнитной проницаемости ($\mu'_{\text{эф}}$) немагнитного высокочастотного феррита в широкой полосе частот за одну установку. Представлены графики зависимости μ' , и μ'' от резонансной частоты. Показано, что для выбора необходимого диапазона частот, необходимо учитывать как значение μ' , так и μ'' , которое отвечает за потери электромагнитной энергии в ферритовом устройстве.

Ключевые слова: микрополосковая линия передачи; магнитная проницаемость; эффективная диэлектрическая проницаемость; фазовращатель; феррит.

Vountesmyery Vol., Maksymchuk T. *Research of magnetic properties nonmagnetized high-frequency ferrite in a wide frequency band*

Introduction. Existing methods for investigating magnetic permeability allows to obtain results on the same frequency. Moving to a different frequency requires reconfiguring. Method for measuring the permeability over a wide frequency range in a single setup is proposed..

The main part. Measurements were made using microstrip resonator ferrite substrate 3,5-7 GHz frequency range. The measurements were performed using a ferrite microstrip resonators and stripline in the frequency range 3-8 GHz. The experimental methods for the study of the real (μ') and the imaginary part (μ'') magnetic permeability and the real part of the effective magnetic permeability (μ'_{ef}) nonmagnetized high-frequency ferrite in a wide frequency band in a single setup are considered. The graphs of the μ' , μ'' and μ'_{ef} from the resonance frequency are shown.

Conclusions. For research in a wide band materials for ferrite phase shifters the use of multimode resonator on tape and microstrip transmission lines is quite convenient and reliable. To select the desired frequency band, it is necessary to take into account the value of μ' , and μ'' , which is responsible for the loss of electromagnetic energy in the ferrite devices.

Keywords: microstrip transmission line; magnetic permeability; effective dielectric constant; phase shifter, ferrite.