

УДК 537.86

Мовчан М. М., аспірант

Ефект невзаємності в об'ємних феритових резонаторах міліметрового діапазону

Експериментально досліджено ефект невзаємності магнітодіелектричних коливань $HE_{2\delta_1}$ та $HE_{2\delta_2}$ феритового резонатора міліметрового діапазону. Представлено теоретичну модель матриці передачі вимірювальної комірки з феритовим резонатором, в якій враховано два різних коефіцієнта зв'язку резонатора з хвилеводом. Показано, що ефект невзаємності викликаний різницею між коефіцієнтами зв'язку феритового резонатора з відбитою та перевипроміненою хвилями.

Ключові слова: залізо-ітрієвий гранат, магнітодіелектричні коливання, невзаємність, добротність, коефіцієнт зв'язку.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03680, м. Київ, пр-т. Глушкова 4г, e-mail: nicolja3m@gmail.com

Статтю представив д. ф.-м. н., проф. Скришевський В. А.

Вступ

4-мм діапазон є цікавим з практичної точки зору для безпроводних локальних мереж, радіоастрономії, супутникового зв'язку [2] та автомобільних радарів [6]. Розв'язка окремих НВЧ модулів між собою здійснюється за допомогою пасивних невзаємних пристроїв на основі намагніченого фериту – циркуляторів або вентилів. Однак в міліметровому діапазоні класичні конструкції вентилів вимагають значних магнітних полів ($H_0 > 10$ кЕ) або використання гексаферитів з великим полем кристаллографічної анізотропії.

Альтернативним способом отримання вентиляного ефекту в міліметровому діапазоні є використання невзаємності, що виникає при збудженні магнітодіелектричних коливань в слабогіротропних об'ємних феритових резонаторах.

Явище невзаємності ($|S_{21}| \neq |S_{12}|$), що виникає при несиметричному розташуванні феритового резонатора в поперечному перерізі прямокутного

M. M. Movchan, Postgraduate Student

Nonreciprocity effect in bulk ferrite resonators for millimeter waveband

The nonreciprocity effect of magnetodielectric $HE_{2\delta_1}$ and $HE_{2\delta_2}$ modes has been investigated experimentally in the millimeter waveband ferrite resonator. Theoretical model of the S-matrix of the measurement cell with a ferrite resonator taking in account two different coupling factors of the resonator with the waveguide is presented. It was shown that the nonreciprocity effect has been caused by the difference between the coupling factors of the ferrite resonator with reflected and transmitted waves.

Key words: yttrium-iron garnet, magnetodielectric modes, nonreciprocity, quality factor, coupling factor.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 03680, Kyiv, Glushkova st., 4g, e-mail: nicolja3m@gmail.com

хвилеводу було досліджено в [3]. В роботі [7] показано, що невзаємність можлива також при симетричному розташуванні феритового зразка в поперечному перерізі хвилеводу. Для виключення невзаємності, що виникає через несиметричність НВЧ конструкції в [8-9] було досліджено феритові та композитні ферит-діелектричні резонатори, що повністю перебивають поперечний переріз прямокутного хвилеводу вздовж широкої стінки. Невзаємний ефект в [7-9] не вдається пояснити шляхом розрахунків в сучасних САПР [8].

Теоретичні моделі взаємодії твердотільних резонаторів з лінією передачі розроблені в роботі [1]. Однак раніш вони не застосовувались для опису магнітодіелектричних коливань в феритових резонаторах. Також не існує методики визначення параметрів об'ємних феритових резонаторів, наприклад, коефіцієнтів зв'язку з лінією передачі, а також власної та навантаженої добротності.

Ціллю даної публікації є експериментальне дослідження ефекту невзаємності в феритових

резонаторах міліметрового діапазону та розвинення теоретичних методів їх опису.

Теоретична модель

Згідно [1] матриця розсіювання відрізка узгодженої лінії передачі з неоднорідністю в вигляді намагніченого феритового резонатора в випадку невзаємного зв'язку резонатора з лінією передачі має вигляд

$$S = \frac{1}{1 + K_1 + K_2 + i\xi} \begin{pmatrix} 2\sqrt{K_1 K_2} & 1 - K_1 + K_2 + i\xi \\ 1 - K_1 + K_2 + i\xi & 2\sqrt{K_1 K_2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

тут $\xi = Q_0 \left(\frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right)$ – узагальнена розстройка, f_0 – резонансна частота, Q_0 – власна добротність резонатора, K_1 та K_2 – коефіцієнти зв'язку з хвилями, що поширюються до навантаження та до генератора відповідно. В (1) зроблено припущення, що резонансна лінія резонатора має лоренцевий профіль.

З (1) знайдені вирази для коефіцієнтів відбиття та передачі відрізка хвилеводу з феритовим резонатором:

$$\begin{aligned} |S_{11}| = |S_{22}| &= 2 \sqrt{\frac{K_1 K_2}{(1 + K_1 + K_2)^2 + \xi^2}}, \\ |S_{21}| &= \frac{\sqrt{\left((1 + K_1)^2 - K_2^2 + \xi^2 \right)^2 + 4\xi^2 K_2^2}}{(1 + K_1 + K_2)^2 + \xi^2}, \\ |S_{12}| &= \frac{\sqrt{\left((1 + K_2)^2 - K_1^2 + \xi^2 \right)^2 + 4\xi^2 K_1^2}}{(1 + K_1 + K_2)^2 + \xi^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Коефіцієнти зв'язку резонатора з лінією передачі K_1 та K_2 можуть бути обчислені за відомими з експерименту коефіцієнтами передачі $|S_{21}|_0$ та $|S_{12}|_0$ на резонансній частоті ($\xi = 0$) використовуючи формули (3).

$$K_1 = \frac{1 - 10^{-\frac{|S_{12}|_0}{20}}}{\frac{|S_{12}|_0}{10^{-20}} + 10^{-\frac{|S_{21}|_0}{20}}}, \quad K_2 = \frac{1 - 10^{-\frac{|S_{21}|_0}{20}}}{\frac{|S_{12}|_0}{10^{-20}} + 10^{-\frac{|S_{21}|_0}{20}}}. \quad (3)$$

В (3) $|S_{21}|_0$ та $|S_{12}|_0$ вимірюються в децибелах.

Власна добротність феритового резонатора визначається за формулою (4).

$$Q_0 = \frac{f_0}{\Delta f_{Q_0}}. \quad (4)$$

де Δf_{Q_0} – ширина резонансної кривої на рівні ослаблення, що відповідає розстройці $\xi = 1$.

При підстановці $\xi = 1$ в (2) отримано значення коефіцієнтів передачі (5) при яких вимірюються ширина резонансної кривої Δf_{Q_0} .

$$\begin{aligned} |x_{21}|_{Q_0} [\text{дБ}] &= 10 \lg \frac{\left((1 + K_1)^2 - K_2^2 + 1 \right)^2 + 4K_2^2}{\left((1 + K_1 + K_2)^2 + 1 \right)^2}, \\ |x_{12}|_{Q_0} [\text{дБ}] &= 10 \lg \frac{\left((1 + K_2)^2 - K_1^2 + 1 \right)^2 + 4K_1^2}{\left((1 + K_1 + K_2)^2 + 1 \right)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

У випадку невзаємного зв'язку феритового резонатора з лінією передачі $|x_{21}|_{Q_0} \neq |x_{12}|_{Q_0}$.

Навантажена добротність феритового резонатора в випадку невзаємного зв'язку з лінією передачі визначається як

$$Q_l = \frac{Q_0}{1 + K_1 + K_2} = \frac{f_0}{\Delta f_{Q_l}}. \quad (6)$$

де Δf_{Q_l} – ширина резонансної кривої на рівні ослаблення, що відповідає розстройці $\xi = 1 + K_1 + K_2$.

При підстановці $\xi = 1 + K_1 + K_2$ в (2) отримано значення коефіцієнтів передачі (7) на яких вимірюється Δf_{Q_l} .

$$\begin{aligned} |x_{21}|_{Q_l} &= 10 \lg \frac{\left((1 + K_1)^2 - K_2^2 + (1 + K_1 + K_2)^2 \right)^2 + 4(1 + K_1 + K_2)^2 K_2^2}{4(1 + K_1 + K_2)^4}, \\ |x_{12}|_{Q_l} &= 10 \lg \frac{\left((1 + K_2)^2 - K_1^2 + (1 + K_1 + K_2)^2 \right)^2 + 4(1 + K_1 + K_2)^2 K_1^2}{4(1 + K_1 + K_2)^4}. \end{aligned} \quad (7)$$

$|x_{21}|_{Q_l} \neq |x_{12}|_{Q_l}$ в випадку $K_1 \neq K_2$ та відрізняються від прийнятого в радіотехніці рівня ослаблення -3 дБ на якому вимірюють ширину резонансної лінії, що відповідає навантаженій добротності для сильного зв'язку резонатора з лінією передачі.

Методику визначення власної та навантаженої добротності феритових резонаторів з резонансної кривої $|S_{21}|(f)$ проілюстровано на рис. 1. На ньому зображено частотні залежності $|S_{12}|$ та $|S_{21}|$, а також всі величини, що необхідні для вимірювання параметрів феритового резонатора.

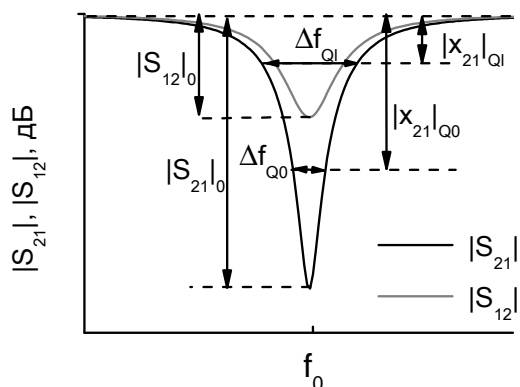


Рис. 1 Ілюстрація вимірювання власної та навантаженої добротності феритового резонатора в випадку невзаємного зв'язку з лінією передачі.

Варто зазначити, що запропонований в [5] метод визначення власної добротності діелектричних резонаторів незастосовний до об'ємних феритових резонаторів, що демонструють ефект невзаємності.

Методика експерименту

Для експериментального дослідження ефекту невзаємності був виготовлений резонатор з полікристалічного ЗІГ марки 30СЧЗБ в формі паралелепіпеда з розмірами $a = 3.55$ мм, $h = 0.3$ мм, $L = 1.8$ мм (див. рис. 2). Розміри резонатора підібрані таким чином, щоб спектр резонансних частот його власних коливань лежав в Е діапазоні (50-75 ГГц).

Резонатор було розміщено в вимірювальній комірці, що мала вигляд відрізка прямокутного хвильоводу з перерізом 3.6×1.8 мм². Резонатор повністю перекривав широку стінку хвильоводу та знаходився в безпосередньому контакті з металом. Підмагнічуюче поле створювалося за допомогою електромагніту та було спрямовано вздовж нормалі до розвиненої поверхні феритового резонатора. Розміри та розташування резонатора в вимірювальній секції показано на рис. 2.

Варто зазначити, що при запропонованій геометрії експерименту ефект невзаємності пов'язаний з несиметричним розташуванням резонатора в поперечному перерізі хвильоводу виключається.

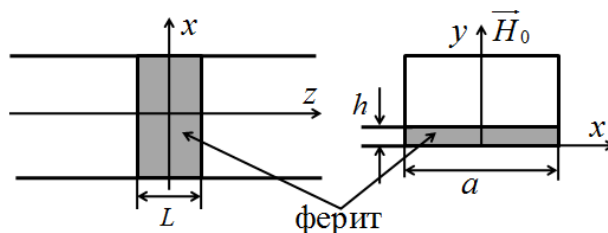


Рис. 2 Розташування феритового зразка в поперечному перерізі хвильоводу.

За допомогою панорамного вимірювача КСХН та ослаблень Р2-69 було досліджено частотні залежності коефіцієнтів передачі $|S_{21}|$ та $|S_{12}|$ вимірювальної комірки з феритовим зразком в залежності від величини зовнішнього магнітного поля H_0 .

Експериментально встановлено, що вимірювання частотної залежності коефіцієнта передачі $|S_{21}|$ при зміні напрямку зовнішнього магнітного поля на 180° повністю еквівалентне до вимірювання частотної залежності коефіцієнта передачі $|S_{12}|$.

Порівняння теорії та результатів експерименту

Для теоретичної інтерпретації експериментальних результатів було використано чисельний розв'язок рівнянь Максвелла методом кінцевого інтегрування (finite integration technique - FIT), який реалізований для випадку пасивних НВЧ вузлів, що містять намагнічений ферит, в пакеті програм CST Microwave Studio.

При моделюванні в Microwave Studio відтворено геометрію експерименту, та використано властивості полікристалічного ЗІГ: тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta_\epsilon = 2 \times 10^{-4}$, намагніченість насичення $4\pi M_s = 1200$ Гс та ширина лінії ФМР $\Delta H = 45$ Е. Найкраще узгодження теоретичних та експериментальних частотних залежностей коефіцієнтів передачі досягнуто при значенні діелектричної проникності ЗІГ $\epsilon = 13.7$.

На рис. 3 зроблено порівняння експериментальних та розрахованих в Microwave Studio частотних залежностей коефіцієнтів передачі $|S_{21}|$ та $|S_{12}|$ вимірювальної комірки з досліджуваним феритовим резонатором.

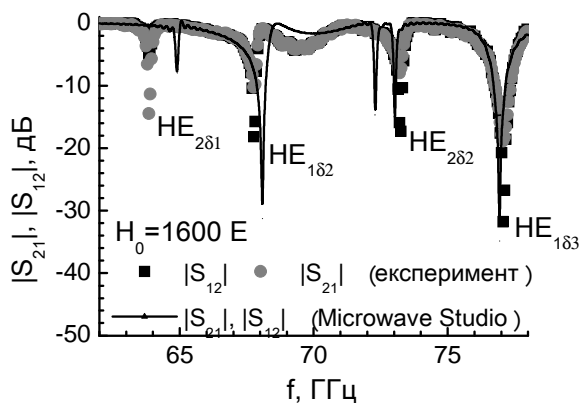


Рис. 3 Порівняння експериментальних та розрахованих в Microwave Studio АЧХ вимірювальної комірки з феритовим резонатором.

Класифікацію типів коливань на рис. 3 проведено відповідно до розподілів магнітного та електричного поля всередині резонатора. При розсіянні моди H_{10} на феритовому резонаторі збуджуються коливання типу HE_{mnl} , де m відповідає кількості варіацій поля вздовж вісі x , n - вздовж вісі y , l - вздовж вісі z (напрямки осей координат показано на рис. 2). Оскільки феритовий резонатор розміщувався на металевій стінці хвилеводу і частково заповнював його поперечний переріз по висоті, то в експерименті спостерігалися лише найнижчі коливання з $n = \delta \approx 0.5$.

На рис. 3 має місце задовільне узгодження теоретичних і експериментальних АЧХ коливань в широкому частотному діапазоні, однак розрахунки в Microwave Studio не пояснюють появу невзаємності.

Невзаємний ефект спостерігається на всіх резонансних частотах феритового резонатора. Найбільшу невзаємність демонструють коливання з парною кількістю варіацій поля вздовж вісі x , наприклад, $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$. Варто зазначити, що ці коливання слабо зв'язані з модою H_{10} прямокутного хвилеводу при відсутності зовнішнього магнітного поля.

При намагнічуванні феритового резонатора резонансні частоти його коливань змінюються внаслідок появи недиагональних компонент тензора магнітної проникності та слабого зв'язку коливань між собою. Перебудова резонансних частот коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ магнітним полем показана на рис. 4.

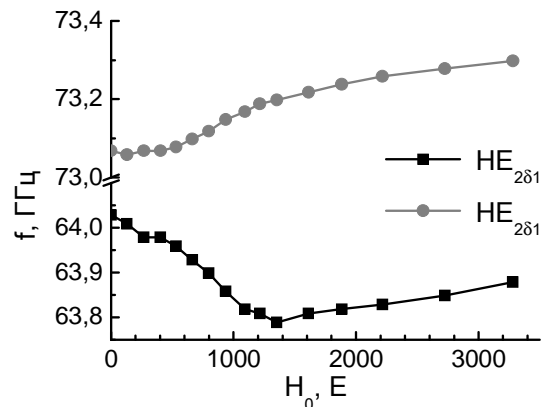


Рис. 4 Залежність резонансних частот коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ від магнітного поля.

Залежності резонансних частот коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ від магнітного поля H_0 якісно відрізняються. В області малих магнітних полів $H_0 < 1$ кЕ резонансна частота коливання $HE_{2\delta 1}$ монотонно спадає, а для коливання $HE_{2\delta 2}$ зростає. Ця відмінність викликана зв'язком власних коливань феритового резонатора через намагніченість і аналогічна до ефекту розщеплення азимутально неоднорідних коливань в феритових резонаторах циліндричної форми [4].

Як раніш зазначалось, при намагнічуванні феритового зразка спостерігається невзаємність коефіцієнтів передачі вимірювальної комірки $|S_{21}| \neq |S_{12}|$ для обох мод $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$. Експериментальні залежності коефіцієнтів передачі $|S_{21}|$ та $|S_{12}|$ на резонансній частоті від магнітного поля H_0 представлені на рис. 5.

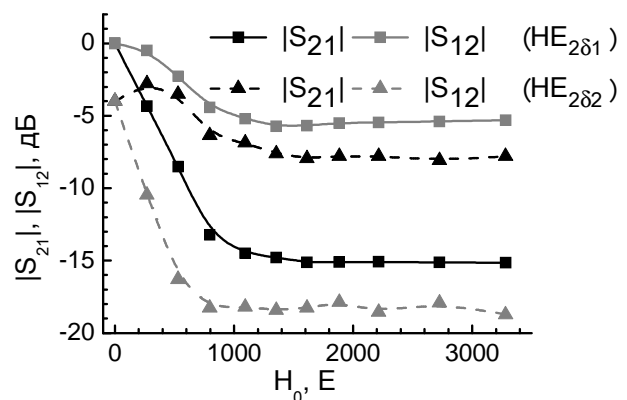


Рис. 5 Експериментальна залежність коефіцієнтів передачі $|S_{21}|$ та $|S_{12}|$ від магнітного поля.

З рис. 5 видно, що характер невзаємності для різних коливань феритового резонатора відрізняється. Для коливання $HE_{2\delta 1}$ переважають прямі втрати $|S_{21}| < |S_{12}|$, а для коливання $HE_{2\delta 2}$ зворотні втрати $|S_{21}| > |S_{12}|$. Залежності $|S_{21}|$ та $|S_{12}|$ від магнітного поля H_0 міняються місцями при зміні напрямку поля на 180° .

Невзаємність коефіцієнтів передачі $|S_{21}|$ та $|S_{12}|$ становить близько 10 дБ для обох коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ при внесених втратах 5 дБ для коливання $HE_{2\delta 1}$ та 8 дБ для $HE_{2\delta 2}$. Отримана величина внесених втрат не дозволяє говорити про практичне застосування ефекту, але проведені раніш дослідження композитних ферит-діелектричних резонаторів з епітаксійними плівками ЗП та резонаторів, що частково заповнюють поперечний переріз хвилеводу [7] показують, що внесені втрати можуть бути зменшені до < 1 дБ при збереженні величини невзаємності. Слід відмітити, що для коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ має місце рівність $|S_{11}| = |S_{22}|$, тобто відбиття хвилі від феритового резонатора носить взаємний характер.

Користуючись (3) та залежностями наведеними на рис. 5 обчислено коефіцієнти зв'язку K_1 та K_2 феритового резонатора з хвилеводом. Отримані залежності коефіцієнтів зв'язку досліджуваного резонатора від магнітного поля H_0 для коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ представлені на рис. 6.

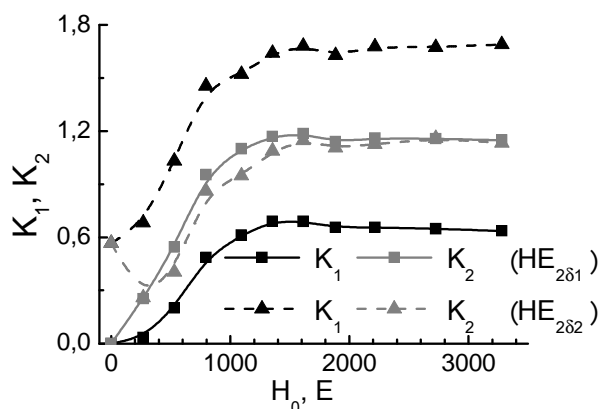


Рис. 6 Залежність коефіцієнтів зв'язку феритового резонатора з прямокутним хвилеводом від магнітного поля.

Однією з найважливіших характеристик резонатора є його власна добротність.

Користуючись формулами (4-5) знайдено залежність власної добротності феритового резонатора від магнітного поля H_0 для коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ (рис. 7).

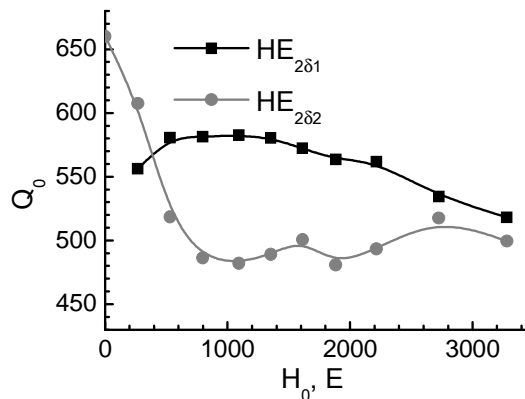


Рис. 7 Залежність власної добротності феритового резонатора від магнітного поля для коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$.

При полі підмагнічування $H_0 > 1$ кЕ (насичений стан фериту) власна добротність резонатора дуже слабо залежить від магнітного поля, тому головним фактором, що спричиняє ефект невзаємності для феритових резонаторів в міліметровому діапазоні є різниця в коефіцієнтах зв'язку резонатора з лінією передачі (рис. 6).

Для перевірки застосовності моделі твердотілого резонатора (1-2) до опису магнітодіелектричних коливань феритових резонаторів на рис. 8 наведено порівняння експериментальних та розрахованих за (2) залежностей $|S_{21}|(f)$ та $|S_{12}|(f)$ для значення магнітного поля $H_0 = 1600$ Е.

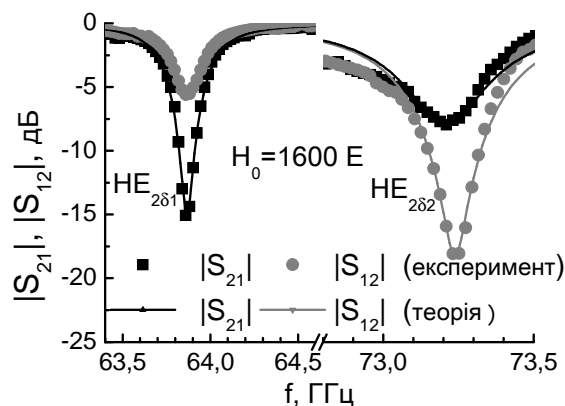


Рис. 8 Порівняння експериментальних АЧХ та теоретичного розрахунку за (2).

При теоретичних розрахунках представлених на рис. 8 були використані раніш визначені значення f_0 , K_1 , K_2 та Q_0 з рис. 4, 6 та 7 відповідно. Модель намагніченого феритового резонатора поміщеного як неоднорідність в лінію передачі [1] чудово апроксимує резонансну криву для коливання $HE_{2\delta 1}$. Дещо гірше ця модель описує резонансну криву коливання $HE_{2\delta 2}$ внаслідок її асиметричності, що спричинена впливом вищих типів коливань.

Висновки

Дослідження коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ феритового резонатора показало, що модель взаємодії твердотільного резонатора з лінією передачі [1] добре описує ефект невзаємності зафіксований в експерименті. Розвинена методика вимірювання власної та навантаженої добротності, а також коефіцієнтів зв'язку резонатора з лінією передачі, дозволяє охарактеризувати феритовий резонатор

Список використаних джерел

1. *Ilchenko M.E., Kudinov E.V.*, Ferrite and dielectric microwave resonators. – K: Kyiv University publishing house, 1973. – 176 p. (in Russian).
2. *Vizard D.R.* Millimeter wave applications: From satellite communications to security systems // *Microwave Journal*. – 2006. – **49**. – P. 22-36.
3. *Popov M.A., Zavislyak I.V., Srinivasan G.* Tunable magnetodielectric resonator for W-band isolators // *Electronics letters*. – 2009. – **45**, № 24. – P. 1216-1218.
4. *Movchan N.N., Zavislyak I.V., Popov M.A.* Splitting axially heterogeneous modes in microwave gyromagnetic and gyroelectric resonators // *Radioel. and Comm. Syst.* – 2012 – **55**, №12. – P. 549-558.
5. *Khana A.P.S.* Q measurement of microstrip-coupled dielectric resonators // *Microwaves and R. F.* – 1984. – **23**. – P. 81-86.

скінченим набором величин f_0 , K_1 , K_2 та Q_0 та використовувати їх в задачах оптимізації та синтезу НВЧ пристроїв з намагніченими феритовими резонаторами.

Показано, що головною причиною ефекту невзаємності є різниця в коефіцієнтах зв'язку феритового резонатора з хвилею, що поширюється в бік навантаження та хвилею відбитою в бік генератора.

Власна добротність феритового резонатора для коливань $HE_{2\delta 1}$ та $HE_{2\delta 2}$ слабо залежить від магнітного поля та становить для резонаторів з ЗГ, які лежать на металевому екрані $Q_0 \approx 500 - 600$.

Ефект невзаємності разом з можливістю магнітної перебудови резонансної частоти та порівняно високою власною добротністю коливань дозволяє створювати на основі слабкогіротропних феритових резонаторів вузькосмугові невзаємні елементи резонансного типу для міліметрового та субміліметрового діапазонів довжин хвиль.

6. *Schneider M.* Automotive radar – status and trends // *German Microwave Conference (GeMiC 2005)*, April 5-7, 2005, Ulm, German: proceedings. – 2005. – P.144-147.
7. *Popov M.A.* Magnetic field controlled nonreciprocal band-stop filter for the W-band using magnetic polariton modes in yttrium-iron garnet / *M.A. Popov, I.V. Zavislyak, G. Srinivasan* // *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, August 12-15, 2013, Stockholm, Sweden: abstracts. – 2013. – P. 32.
8. *Movchan N.N.* Features of weakly gyrotropic ferrite resonators excitation in millimeter band / *Movchan N.N.* // *Microwave & Telecommunications technology (CriMiCo 2012)*, September 10-14, 2012, Sevastopol, Ukraine: proceedings. – 2012. – P. 581-582.
9. *Movchan N.N.* Nonreciprocal excitation ferrite-dielectric composite resonator of millimeter range / *Movchan N.N.* // *Modern Issues in Radio Engineering and Telecommunications (RT-2012)*, April 23-27, 2012, Sevastopol, Ukraine: proceedings. – 2012. – P. 417.

Надійшла до редколегії 11.12.13