

М. Е. ИЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук

О ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ ФЕРРИТОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ СВЧ

Для проектирования СВЧ-фильтров на монокристаллах ферритов с использованием взаимной связи между отдельными резонаторами необходимы расчетные соотношения, характеризующие степень этой связи в зависимости от параметров резонаторов, СВЧ-структуры и их взаимного расположения. Взаимная связь гиромагнитных ферритовых резонаторов (ГФР) в свободном пространстве впервые исследована А. Л. Микаэляном и

В. Я. Антоньянцем [5]. В последующих работах [1, 3, 4] изучена взаимная связь ГФР в прямоугольном волноводе на частотах выше критической как в ближней, так и в дальней зоне при значительных расстояниях между резонаторами. Рассчитаем собственные частоты и коэффициент связи в представляющих практический интерес случаях связи ГФР через отрезки круглого или прямоугольного волновода на частотах, ниже критической (за предельном волноводе).

При расчете исходим из уравнения движения намагниченности, а проекции векторов переменной намагниченности \vec{m} и высокочастотного магнитного поля \vec{h} представим в виде

$$m_x = \chi h_x + j\chi_a h_y, \quad (1)$$

$$m_y = -j\chi_a h_x + \chi h_y,$$

где

$$\chi = (\omega_m \omega_\phi / \omega_\phi^2 - \omega^2); \quad \chi_a = (\omega_m \omega) / (\omega_\phi^2 - \omega^2);$$

$$\omega_\phi = \mu_0 \gamma H_p; \quad \omega_m = \mu_0 \gamma M_0;$$

ω — круговая частота СВЧ магнитного поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м; $\gamma = 1,76 \times 10^{11}$ к/кг; M_0 — намагниченность насыщения феррита; H_p — напряженность поля подмагничивания, соответствующая частоте ферромагнитного резонанса ω_ϕ .

В случае размещения резонаторов только в области линейной поляризации СВЧ магнитного поля взаимодействие между ними осуществляется по одной составляющей переменной намагниченности (например, m_x), и уравнение (1) устанавливает обычную связь между переменной намагниченностью m_x и полем h_x . При этом, следуя методике [5], для определения собственных частот связанной системы в качестве поля h_x для первого резонатора считается поле излучения второго ГФР в месте расположения первого — h_2 , а для второго, наоборот, $h_x = h_1$. Учитывая, что поле излучения ГФР всегда пропорционально его дипольному моменту [2], а следовательно, и переменной намагниченности феррита, можно обобщенно записать

$$h_1 = A_0 m_{x1}; \quad (2)$$

$$h_2 = B_0 m_{x2},$$

где A_0, B_0 — амплитудные коэффициенты, зависящие от вида СВЧ-структуры, параметров резонаторов и расстояния между ними.

Решение системы уравнений (1) для переменной намагниченности первого и второго резонаторов с учетом (2) приводит к обобщенному соотношению для резонансных частот ω_2 связанной системы в виде

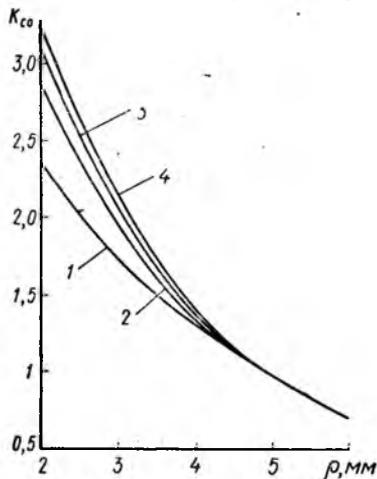
$$\omega_2^1 = \sqrt{\frac{(\omega_{\phi 1}^2 + \omega_{\phi 2}^2)^2 \pm \sqrt{(\omega_{\phi 1}^2 + \omega_{\phi 2}^2)^2 + 4\omega_{\phi 1}^2 \omega_{\phi 2}^2 K_c^2}}{2}}, \quad (3)$$

где K_c — коэффициент взаимной связи между резонаторами, уравнение для которого

$$K_c = \sqrt{\frac{\omega_{m1}\omega_{m2}}{\omega_{\phi1}\omega_{\phi2}} \operatorname{Re}(A_0 B_0)}. \quad (4)$$

Таким образом, в соответствии с формулой (4) расчет коэффициента взаимной связи при известных параметрах резонаторов и выбранной электродинамической структуре, в которой расположены эти резонаторы, сводится к вычислению амплитудных коэффициентов A_0 , B_0 . Нами проведены такие вычисления для случаев, представляющих практический интерес.

1. Сферические ферритовые резонаторы расположены по оси круглого запердельного волновода радиусом R на расстоянии ρ друг от друга, причем поле подмагничивания направлено вдоль продольной оси волновода. При этом



$$K_c = \frac{1}{2\pi R^3} \sqrt{\frac{v_1 v_2 \chi_{1p}'' \chi_{2p}''}{Q_{01} Q_{02}}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_{m1}^3 e^{-\alpha_{m1} \rho}}{(A_{m1}^2 - 1) J_1^2(A_{m1})}, \quad (5)$$

где v , χ_p'' — соответственно объем и магнитная восприимчивость резонатора при резонансе; Q_0 — добротность резонатора; A_{m1} — корни производной функции Бесселя; $\alpha_{m1} = 2\pi/\lambda_{кр m1}$, $\lambda_{кр m1}$ — критическая длина волны.

2. Сферические ферритовые резонаторы расположены по оси прямоугольного запердельного волновода и намагничены вдоль его продольной оси. При этом

$$K_c = \frac{1}{ab} \sqrt{\frac{v_1 v_2 \chi_{1p}'' \chi_{2p}''}{Q_{01} Q_{02}}} \left[\sum_{m=1,3,5,\dots} \frac{m\pi}{a} e^{-\alpha_{m0} \rho} + \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{n\pi}{b} e^{-\alpha_{0n} \rho} \right], \quad (6)$$

где a , b — размеры поперечного сечения волновода; $\alpha_{mn} = 2\pi/\lambda_{кр mn}$; $\lambda_{кр mn}$ — критическая длина волны.

На рисунке в качестве примера показано влияние на величину $K_{co} = K_c Q_0$ различного числа типов волн (1—4 — число учитываемых при расчете типов волн) в случае применения круглого запердельного волновода диаметром 12 мм и идентичных сферических ферритовых резонаторов диаметром 1,8 мм и маг-

нитной восприимчивостью при резонансе, равной 860. Как видно, в ближней зоне ($\rho < 4$ мм) учет высших типов волн сказывается существенно на величине коэффициента взаимной связи. При выводе формул (5) и (6) нами учитывались только H -типы волн в волноводе, поскольку анализ показал, что влияние E -типов волн на величину K_c обычно меньше чем на порядок по сравнению с волнами H -типа и поэтому их можно не учитывать при инженерных расчетах фильтров, использующих взаимную связь ферритовых резонаторов.

Список литературы: 1. *Бобрин Л. Ф.* Расчет коэффициента взаимной связи между двумя ферритовыми шариками в волноводе с учетом высших типов волн.— Труды Моск. энергетич. ин-та, 1975, вып. 278, с. 88. 2. *Ильченко М. Е., Кудинов Е. В.* Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Изд-во Киев. ун-та, 1973. 173 с. 3. *Максимов В. И.* К вопросу о взаимной связи двух ферритовых резонаторов в волноводе (дальняя зона).— Радиотехника и электроника, 1971, т. 16, № 6, с. 946. 4. *Максимов В. И.* Экспериментальное исследование явлений взаимной связи двух ферритовых резонаторов в волноводе (ближняя зона).— Радиотехника и электроника, 1970, т. 15, № 3, с. 601. 5. *Микаэлян А. Л., Антонынец В. Я.* Явления взаимной связи в системе ферритовых образцов.— Радиотехника и электроника, 1962, т. 7, № 4, с. 623.

М. Е. Ilchenko

ABOUT THE MUTUAL COUPLING OF THE MICROWAVE FERRITE REZONATORS

Coupling is determined by coefficient including parameters resonators and its disposition. Simple formulas are obtained for coupling coefficient of the ferrite resonators inside cut off rectangular and circular waveguides.