

Рассмотрим в качестве примера основной тип H_{110} в диэлектрическом кубе, которому соответствует колебание H_{101} в сферическом ОДР. В этом случае система (4) принимает вид

$$\frac{2\chi_1 l/2}{\sqrt{2(\chi_1 l/2)^2 + (\chi_z l/2)^2}} \operatorname{ctg} \chi_1 l/2 = \frac{ka}{1 - ka \operatorname{ctg} ka} - \frac{1}{ka};$$

$$\frac{\chi_z l/2}{\sqrt{2(\chi_1 l/2)^2 + (\chi_z l/2)^2}} \operatorname{tg} \chi_z l/2 = \frac{ka}{1 - ka \operatorname{ctg} ka} - \frac{1}{ka}. \quad (5)$$

Результаты численного решения полученной системы уравнений для ряда значений диэлектрической проницаемости представлены в таблице, где в качестве ka берется первый корень уравнения (2) (при $n = 1$).

Проведенные исследования показали, что расчетные значения резонансной частоты находятся в пределах погрешности эксперимента, составляющей порядка 1 %.

1. Ильченко М. Е., Старков М. А. Учет внешних полей при вычислении параметров сферического диэлектрического резонатора. — Вестн. Киев. политехн. ин-та. Радиотехника, 1980, вып. 17, с. 24—27. 2. Bladel J. Van. On the resonances of dielectric resonators of very high permittivity. — IEEE Trans. MTT, 1975, 23, 2, p. 199—208. 3. Gastine M., Courtois L., Dormann J. L. Electromagnetic resonances of free dielectric spheres. — IEEE Trans. MTT, 1967, 15, 12, p. 694—700.

Поступила в редколлегия 20.09.82

УДК 621.372.413

А. А. ТРУБИН, *мл. науч. сотр.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДИСКОВОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Использование дисковых диэлектрических резонаторов в качестве излучателей антенн СВЧ приводит к задаче исследования характеристик полей волновой зоны этого вида открытых диэлектрических резонаторов (ОДР) в свободном пространстве. Для определения характеристик излучения диаграммы направленности и коэффициента связи ОДР со свободным пространством воспользуемся результатами работы [2], связывающим поле излучения с электромагнитным полем, запасаемым вблизи резонатора на одной из его резонансных частот.

Пусть в дисковом диэлектрическом резонаторе возбуждаются электромагнитные, азимутально однородные колебания магнитного вида H_{0sl} , поле которых в одномодовом приближении можно представить в виде [1]. При этом выполнение условия «магнитной стенки» на боковой поверхности диска не является обязательным — поле собственных колебаний ОДР определяется методом частичных областей [3]. Подставляя выражения для полей собственных колебаний на поверхности ОДР в соотношения работы [2] и интегрируя по замкнутой поверхности резонатора, найдем поле ОДР в волновой зоне, с помощью которого определим мощность, излучаемую дисковым диэлектрическим резонатором:

а) при возбуждении в ОДР магнитных колебаний H_{0st}

$$P_D^H = \omega_0 \frac{q_{\perp}^2}{\beta} \left| h_0 \frac{q_{\perp}}{r_0} (\epsilon_1 - 1) \right|^2 i_H(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z); \quad (1)$$

б) при возбуждении электрических колебаний E_{0st}

$$P_D^E = \frac{2\pi}{\omega_0} \left| e_0 \frac{q_{\perp}}{\beta} (\epsilon_{1r} - 1) \right|^2 i_E(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z), \quad (2)$$

где

$$i_H(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z) = \int_0^1 \left| \frac{p_z \sin p_z \cos \xi q_z - \xi q_z \cos p_z \sin \xi q_z}{p_z^2 - (\xi q_z)^2} \times \right. \\ \left. \times \frac{p_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(\eta q_{\perp}) - \eta q_{\perp} J_1(p_{\perp}) J_0(\eta q_{\perp})}{p_{\perp}^2 - (\eta q_{\perp})^2} \right|^2 d\xi; \quad (3)$$

$$i_E(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z) = \int_0^1 \left| \frac{1}{|p_z^2 - (\xi q_z)^2| |p_{\perp}^2 - (\eta q_{\perp})^2|} \times \right. \\ \left. \times \{ p_{\perp} q_{\perp} \xi (\xi q_z \sin p_z \cos \xi q_z - p_z \cos p_z \sin \xi q_z) | p_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(\eta q_{\perp}) - \right. \\ \left. - \eta q_{\perp} J_1(p_{\perp}) J_0(\eta q_{\perp}) | + p_{\perp} q_z \eta (p_z \sin p_z \cos \xi q_z - \xi q_z \cos p_z \sin \xi q_z) \times \right. \\ \left. \times | \eta q_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(\eta q_{\perp}) - p_{\perp} J_1(p_{\perp}) J_0(\eta q_{\perp}) | \right|^2 d\xi. \quad (4)$$

Здесь $\eta = (1 - \xi^2)^{\frac{1}{2}}$, $p_{\perp} = \beta r_0$, $p_z = \beta L/2$, $q_{\perp} = k_0 r_0$, $q_z = k_0 L/2$, $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, $\Delta = L/2r_0$, h_0, e_0 — амплитуда колебаний; r_0 — радиус диска, L — высота диска.

Мощность потерь в диэлектрике найдем, согласно работе [2]:

а) при возбуждении магнитных колебаний H_{0st}

$$P_D^H = |h_0|^2 \frac{\pi \omega r_0^2 L \epsilon_{1r} \mu_0}{4Q_0} \cdot \frac{q_{\perp}^2}{p_{\perp}^2 p_z} (p_z + \sin p_z \cos p_z) \times \\ \times [J_1^2(p_{\perp}) - J_0(p_{\perp}) J_2(p_{\perp})]; \quad (5)$$

б) при возбуждении электрических колебаний E_{0st}

$$P_D^E = |e_0|^2 \frac{\pi \omega r_0^3 \epsilon_{1r}}{Q_0 L} \cdot \frac{1}{p_{\perp} p_z} \{ p_z^2 (p_z - \sin p_z \cos p_z) [J_1^2(p_{\perp}) - \\ - J_0(p_{\perp}) J_2(p_{\perp})] + \Delta^2 p_{\perp}^2 (p_z + \sin p_z \cos p_z) [J_1^2(p_{\perp}) + J_0^2(p_{\perp})] \}. \quad (6)$$

Откуда определим коэффициенты связи дискового ОДР со свободным пространством [1]: $k_s = P_{\Sigma}/P_D$:

а) при возбуждении магнитных колебаний H_{0sl}

$$k_S^H = 4Q_0 \frac{(\epsilon_{1r} - 1)^2}{\epsilon_{1r}} \rho_z q_z q_{\perp}^2 \times \frac{i_H(\rho_{\perp}, \rho_z, q_{\perp}, q_z)}{(\rho_z + \sin \rho_z \cos \rho_z) [J_1^2(\rho_{\perp}) + J_0(\rho_{\perp}) J_2(\rho_{\perp})]}; \quad (7)$$

б) при возбуждении электрических колебаний E_{0sl}

$$k_S^E = 4Q_0 \frac{(\epsilon_{1r} - 1)^2}{\epsilon_{1r}} \cdot \rho_z q_z \times \frac{i_E(\rho_{\perp}, \rho_z, q_{\perp}, q_z)}{\rho_z^2 (\rho_z - \sin \rho_z \cos \rho_z) [J_1^2(\rho_{\perp}) - J_0(\rho_{\perp}) J_2(\rho_{\perp})] + \Delta^2 \rho_{\perp}^2 (\rho_z + \sin \rho_z \cos \rho_z) [J_1^2(\rho_{\perp}) + J_0^2(\rho_{\perp})]}. \quad (8)$$

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента связи от $\Delta = L/2r_0$ для дисковых ОДР, изготовленных из материала с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{1r} = 80$, собственной добротностью 10^3 , возбуждаемых на резонансной частоте $f_0 = 7$ ГГц низшего, магнитного типа колебаний. Для сравнения полученных зависимостей связи k

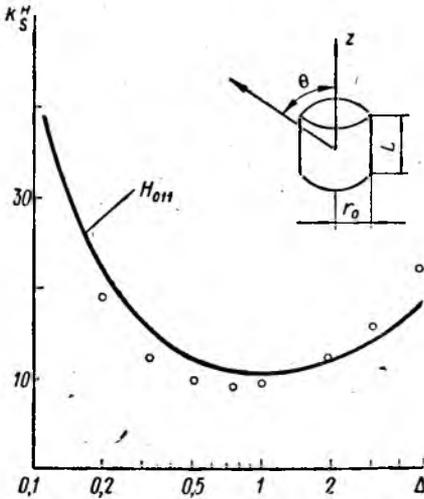


Рис. 1

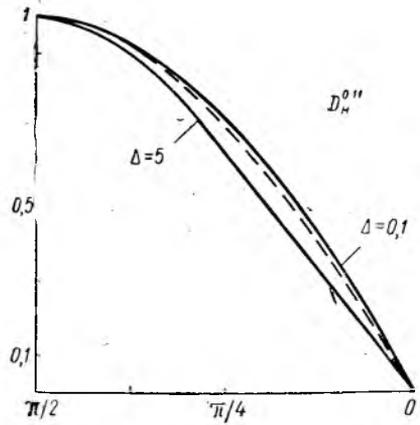


Рис. 2

от Δ кружками нанесены значения коэффициентов связи, вычисленные по результатам работы [4] по эквивалентной формуле $k = Q_0/Q_{\Sigma}$ (где $Q_0 = 10^3$, а Q_{Σ} определялась из таблицы [4]). Небольшое расхождение указанных значений с приведенной на рис. 1 зависимостью объясняется несколько завышенными значениями характеристических чисел ρ_{\perp} , ρ_z , получаемых из модели работы [3]. Как следует из результатов расчета, увеличение связи дискового диэлектрического ре-

зонатора со свободным пространством может быть достигнуто использованием ОДР с минимальным отношением Δ .

Приведем выражения для диаграмм направленности ($D = |\vec{E}| / |\vec{E}_{\max}|$) полей излучения при возбуждении в диске азимутально однородных колебаний:

а) H_{0sl}

$$D_{H}^{0sl} = \frac{p_z}{p_z^2 - (q_z \cos \theta)^2} \cdot \frac{p_{\perp}^2 - q_{\perp}^2}{p_{\perp}^2 - (q_{\perp} \sin \theta)^2} \times \\ \times |p_z \cos(q_z \cos \theta) - q_z \cos \theta \operatorname{ctg} p_z \sin(q_z \cos \theta)| \times \\ \times \left| \frac{p_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp} \sin \theta) - q_{\perp} \sin \theta J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp} \sin \theta)}{p_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp}) - q_{\perp} J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp})} \right|, \quad (9)$$

б) E_{0sl}

$$D_E^{0sl} = \frac{p_z}{q_z [p_z^2 - (q_z \cos \theta)^2]} \cdot \frac{p_{\perp}^2 - q_{\perp}^2}{p_{\perp} [p_{\perp}^2 - (q_{\perp} \sin \theta)^2]} \times \\ \times \left| \frac{1}{q_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp}) - p_{\perp} J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp})} \{ q_{\perp} p_z \cos \theta [g_z \cos \theta \cos(q_z \cos \theta) - \right. \\ \left. - p_z \operatorname{ctg} p_z \sin(q_z \cos \theta)] [p_{\perp} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp} \sin \theta) - q_{\perp} \sin \theta J_1(p_{\perp}) \times \right. \\ \left. \times J_0(q_{\perp} \sin \theta)] + p_{\perp} p_z \sin \theta [p_z \cos(q_z \cos \theta) - q_z \cos \theta \operatorname{ctg} p_z \sin \times \right. \\ \left. \times (q_z \cos \theta)] [q_{\perp} \sin \theta J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp} \sin \theta) - p_{\perp} J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp} \sin \theta)] \right|. \quad (10)$$

Диаграммы направленности (ДН) дискового ОДР при возбуждении в нем магнитных колебаний H_{011} для двух дисков с $\Delta = 0,1$ и $\Delta = 5$, рассчитанные по формуле (9), показаны на рис. 2. Для сравнения штриховой кривой нанесены ДН магнитного диполя. Как следует из представленных кривых, диаграммы направленности дисковых ОДР близки к диаграмме направленности диполя. Уменьшение отношения Δ приводит к расширению ДН, увеличение — к сужению ДН по сравнению с диаграммой направленности магнитного диполя. При этом диаграмма направленности дискового ОДР с $L/2r_0 = 1$ максимально приближена к дипольной.

Форма диаграммы направленности и характер зависимости ДН от Δ при возбуждении в ОДР низших электрических колебаний аналогичны описанным выше, хотя зависимость ширины ДН от Δ для электрических видов колебаний носит более выраженный характер, что объясняется большим влиянием формы ОДР на структуру поля этих видов колебаний.

Таким образом, полученные выше соотношения для коэффициентов связи дискового ОДР и диаграмм направленности позволяют вычислить в явном виде и исследовать основные характеристики излучения ОДР, необходимые для решения задачи синтеза антенных устройств, состоящих из ряда открытых дисковых резонаторов и сделать выводы, что зависимости коэффициентов связи дискового диэлектрического резонатора со свободным пространством от величины Δ , полученные на основе подхода [2], хорошо согласуются с данными, рас-

считанными при использовании численных методов для низших магнитных колебаний. Диаграмма направленности дискового ОДР при возбуждении в нем низших магнитных колебаний имеет форму ДН магнитного диполя и сужается при увеличении отношения $L/2r_0$.

1. Ильченко М. Е., Кудинов Е. В. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1973. 173 с. 2. Трубин А. А. Расчет коэффициентов связи диэлектрических резонаторов со свободным пространством. — В кн.: Методы функциональной электроники в реализации радиотехнических устройств. Киев: УКРНИИТИ, 1982. 45 с. 3. Jtoh T., Rudokas R. Nuv method for computing the resonant frequencies of dielectric resonators. — IEEE Trans. 1977, MTT — 25, 1, p. 52—54. 4. Verplanck M., van Bladel J. The magnetic-dipole resonances of ring resonators of very high permittivity. IEEE Trans., 1979, MTT=27, 4, p. 328—333.

Поступила в редколлегию 07.09.82

УДК 621.372.832

В. И. ЦЫМБАЛ, ст. науч. сотр., Г. Н. ШЕЛАМОВ, канд. техн. наук

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СВЧ-РЕЗОНАТОРЫ В ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ ЛИНИИ

Резонаторы, объемы которых, по крайней мере, на порядок меньше объема металлического резонатора на основе стандартного прямоугольного волновода, относятся к категории малогабаритных. Отметим, что не все малогабаритные СВЧ-резонаторы рационально применять в сочетании с волноводно-щелевыми линиями [1, 2]. Так, планарность конструкции сохраняется при использовании диэлектрического петлевого в виде короткозамкнутого проволочного витка, ферритового и металлического дисков типов резонаторов.

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования характеристик взаимодействия (см. таблицу) малогабаритных СВЧ-резонаторов I с волноводно-щелевой линией на основе стандартного прямоугольного волновода сечением 17×8 мм. С целью уменьшения воздушного зазора магнитной системы при исследовании ферритовых резонаторов использовался волновод сечением 17×4 мм. Толщина диэлектрической подложки $2s = 0,3$ мм, диэлектрическая проницаемость $\delta = 2,2$, зазор между металлическими пластинами $3t = 1$ мм. Петлевой резонатор изготовлен из посеребренной проволоки диаметром 0,5 мм, а металлический диск — из пластины толщиной 0,2 мм. Материал ферритового резонатора — железиттриевый гранат с намагниченностью насыщения 0,175 Тл и шириной линии ферромагнитного резонанса 40 а/М. Размеры диэлектрического резонатора выбраны таким образом, чтобы резонансные частоты $H_{10\delta}$ - и $E_{11\delta}$ -колебаний, соотношение между которыми определяется отношением диаметра D к толщине s резонатора [3], оказывались в рабочем диапазоне частот используемого волновода.

Результаты измерений сведены в таблицу, в которой указаны геометрические размеры резонаторов, а также резонансная частота f_r и коэффициент передачи в точке резонанса T_p .

Резонаторы, укрепленные на перемещаемом поперек волновода пенопластовом держателе, располагались со стороны диэлектрической