

**И.К. КУЗЬМИЧЕВ**, канд. техн. наук., с.н.с., Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

### ПРИМЕНЕНИЕ РУПОРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ СОГЛАСОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В РЕЗОНАТОРАХ

Coherent excitation of oscillations in resonators is realized using of horn ray radiators with the diffraction grating.

За допомогою рупорного випромінювача з дифракційною решіткою показана можливість узгодженого збудження коливань у резонаторах.

С помощью рупорного излучателя с дифракционной решеткой показана возможность согласованного возбуждения колебаний в резонаторах.

**Введение.** Для возбуждения колебаний КВЧ диапазона в резонаторах, геометрические размеры которых во много раз больше длины волны генератора, возникает необходимость рассмотрения задачи по применению рупорных излучателей для согласованного возбуждения электромагнитных колебаний в резонаторе. Данная задача может быть решена на основе теории синтеза четырехполюсника и дифракции волн на решетках [1, 2].

**Цель, задание исследования.** Определение влияния коэффициентов передачи и отражения поляризованной проволочной решетки на согласованное возбуждение резонатора.

**Модель призматического резонатора.** Рассмотрим модель

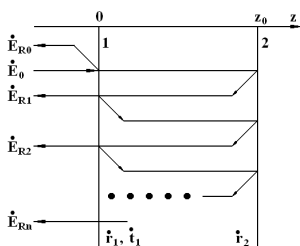


Рис. 1. Модель призматического резонатора

призматического резонатора с полупрозрачной торцевой стенкой, состоящую из двух неоднородностей 1 и 2 (рис. 1), и определим коэффициент отражения от такой системы. Длина резонатора равна  $z_0$ . Решение задачи будем искать в приближении плоских волн. Обозначим коэффициенты отражения и передачи входной торцевой стенки резонатора ( $z=0$ ) через  $\hat{r}_1 = r_1 \exp(j\varphi_{r1})$ ,  $\hat{t}_1 = t_1 \exp(j\varphi_{t1})$ , а коэффициент отражения второй торцевой стенки ( $z=z_0$ ) через  $\hat{r}_2 = r_2 \exp(j\varphi_{r2})$ . Здесь  $r_1, r_2$  и  $t_1$  – модули, а  $\varphi_{r1}, \varphi_{r2}$  и  $\varphi_{t1}$  – фазы коэффициентов отражения и передачи, соответ-

венно. Тогда можем написать

$$|t_1|^2 = 1 - |r_1|^2. \quad (1)$$

Поскольку, как мы отметили выше, входная торцевая стенка рассматриваемого резонатора представляет собой одномерную  $\vec{E}$  – поляризованную проволочную решетку, то  $|t_1|$  и  $|r_1|$  – коэффициенты передачи и отражения этой решетки. После взаимодействия падающей волны  $\dot{E}_0 = E_0 \exp(-jkz)$  с входной торцевой стенкой резонатора отраженная волна

$$\dot{E}_{R0} = \dot{r}_1 E_0 \exp(-jkz) \quad (2)$$

поступает в запитывающий тракт, а прошедшая волна  $\dot{E}_{\text{пр}1} = \dot{t}_1 \dot{E}_0$  (рис. 1) на пути от плоскости 1 до плоскости 2 испытывает фазовый набег  $kz_0$ . После отражения от второй торцевой стенки она снова распространяется по резонатору и опять испытывает фазовый набег  $kz_0$ . Частично пройдя через входную торцевую стенку, эта волна поступает в запитывающий волновод

$$\dot{E}_{R1} = E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-jk(z+2z_0)), \quad (3)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $S_M$  и  $S_D$  – резонансные коэффициенты передачи по полю за проход волны от одной торцевой стенки до другой, которые определяются потерями в металле, из которого изготовлен резонатор, и потерями в диэлектрике, заполняющем резонансный объем. В общем случае  $S_M = \exp(-\alpha_M/2)$ ,  $\alpha_M = P_M/P_p$  и  $S_D = \exp(-\alpha_D/2)$ ,  $\alpha_D = P_D/P_p$ . Здесь  $P_M$  и  $P_D$  – потери мощности в стенках резонатора и диэлектрике, а  $P_p$  – мощность, поступившая в резонатор. Аналогичным образом запишем выражение для второй отраженной волны

$$\begin{aligned} \dot{E}_{R2} = E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-jk(z+2z_0)) \times \\ \times (\dot{r}_1 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-j2kz_0)) \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь можем записать выражение для  $n$ -ой отраженной волны

$$\begin{aligned} \dot{E}_{Rn} = E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-jk(z+2z_0)) \times \\ \times (\dot{r}_1 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-j2kz_0))^{n-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Суммируя все волны (5), запишем комплексную амплитуду отраженной волны  $\dot{E}_{R\Sigma}$  на входе ( $z=0$ ) без учета (2)

$$\begin{aligned} \dot{E}_{R\Sigma} = E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-jk2z_0) \times \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{r}_1 \dot{r}_2 S_M^2 S_D^2 \exp(-j2kz_0))^{n-1} \end{aligned} \quad (6)$$

Так как  $|r_1|$ ,  $|r_2|$ ,  $S_M$  и  $S_D$  в общем случае меньше единицы, то ряд (6) – сходящаяся геометрическая прогрессия, суммируя которую,

получим выражение

$$\dot{E}_{R\Sigma} = E_0 t_1^2 r_2 S_m^2 S_\delta^2 \frac{\exp(-j(2kz_0 - 2\varphi_{r1} - \varphi_{r2}))}{1 - r_1 r_2 S_m^2 S_\delta^2 \exp(-j(2kz_0 - \varphi_{r1} - \varphi_{r2}))}. \quad (7)$$

При этом полное отраженное поле с учетом (2) имеет вид

$$\dot{E}_R = \dot{E}_{R0} + \dot{E}_{R\Sigma}, \quad (8)$$

или

$$\dot{E}_R = E_0 r_1 \exp(j\varphi_{r1}) + E_0 R_\Sigma \exp(j\varphi_{R\Sigma}). \quad (9)$$

Для нахождения  $R_\Sigma$  и  $\varphi_{R\Sigma}$  введем обозначения

$$\begin{cases} \alpha = 2kz_0 - 2\varphi_{r1} - \varphi_{r2}, \\ \beta = 2kz_0 - \varphi_{r1} - \varphi_{r2}, \end{cases} \quad (10)$$

и воспользуемся формулой Эйлера [3]  $\exp(\pm j\gamma) = \cos \gamma \pm j \sin \gamma$ . Опуская промежуточные выкладки запишем в окончательном виде

$$R_\Sigma = \frac{t_1^2 r_2 S_m^2 S_\delta^2}{(1 - 2r_1 r_2 S_m^2 S_\delta^2 \cos \beta + (r_1 r_2 S_m^2 S_\delta^2)^2)^{1/2}}, \quad (11)$$

$$\varphi_{R\Sigma} = -\arcsin \frac{\sin \alpha + r_1 r_2 S_m^2 S_\delta^2 \sin(\beta - \alpha)}{(1 - 2r_1 r_2 S_m^2 S_\delta^2 \cos \beta + (r_1 r_2 S_m^2 S_\delta^2)^2)^{1/2}}. \quad (12)$$

Теперь запишем коэффициент отражения по полю от рассматриваемого резонатора

$$\dot{R} = \dot{E}_R / E_0 = R \exp(j\varphi_R), \quad (13)$$

или с учетом выражения (9)

$$\dot{R} = r_1 \exp(j\varphi_{r1}) + R_\Sigma \exp(j\varphi_{R\Sigma}), \quad (14)$$

или

$$\dot{R} = (r_1 \cos \varphi_{r1} + R_\Sigma \cos \varphi_{R\Sigma}) + j(r_1 \sin \varphi_{r1} + R_\Sigma \sin \varphi_{R\Sigma}). \quad (15)$$

Если теперь комплексное число (15) представить в показательной форме, то тогда получим

$$R = (r_1^2 + R_\Sigma^2 + 2r_1 R_\Sigma \cos(\varphi_{r1} - \varphi_{R\Sigma}))^{1/2}, \quad (16)$$

$$\varphi_R = \arcsin \frac{r_1 \sin \varphi_{r1} + R_\Sigma \sin \varphi_{R\Sigma}}{(r_1^2 + R_\Sigma^2 + 2r_1 R_\Sigma \cos(\varphi_{r1} - \varphi_{R\Sigma}))^{1/2}}. \quad (17)$$

Для того, чтобы связать фазы коэффициентов отражения и передачи, воспользуемся выражениями для симметричного обратимого реактивного четырехполюсника [1]. В наших обозначениях эти выражения имеют вид

$$\begin{cases} \varphi_{r1} + \varphi_{r2} = 2\varphi_{t2} \pm \pi, \\ \varphi_{r1} = \varphi_{r2}; \varphi_{t1} = \varphi_{t2}. \end{cases} \quad (18)$$

С учетом соотношений (10) и (18) преобразуем синус разности  $\sin(\beta - \alpha)$ , входящий в выражение (12). После подстановок получим, что  $\sin(\beta - \alpha) = -\sin \varphi_{r1}$ , а уравнение (12) примет вид

$$\varphi_{R\Sigma} = -\arcsin \frac{\sin \alpha - r_1 r_2 S_M^2 S_\Delta^2 \sin \varphi_{r1}}{\left(1 - 2r_1 r_2 S_M^2 S_\Delta^2 \cos \beta + (r_1 r_2 S_M^2 S_\Delta^2)^2\right)^{1/2}}. \quad (19)$$

Если теперь аналогичным образом преобразуем  $\sin \alpha$  и наложим условие резонанса  $\beta = 2kz_0 - \varphi_{r1} - \varphi_{r2} = 2\pi h$ ,  $h = 1, 2, \dots$ , то тогда выражение (19) можем записать в окончательном виде

$$\varphi_{R\Sigma} = -(\pi - \varphi_{r1}). \quad (20)$$

Соотношение (11) тоже упростится, если на него наложить условие резонанса

$$R_\Sigma = \frac{t_1^2 r_2 S_M^2 S_\Delta^2}{\left(1 - r_1 r_2 S_M^2 S_\Delta^2\right)}. \quad (21)$$

Рассмотрим выражение (16), которое после подстановки значения  $\varphi_{R\Sigma}$  из (20), примет вид

$$R = r_1 - R_\Sigma. \quad (22)$$

После подстановки (21) в (22), получим уравнение для резонансного коэффициента отражения

$$R = r_1 - \frac{t_1^2 r_2 S_M^2 S_\Delta^2}{\left(1 - r_1 r_2 S_M^2 S_\Delta^2\right)}. \quad (23)$$

**Выводы.** Для того чтобы найти при каком значении  $r_1$  будет иметь место согласованное возбуждение резонатора ( $R = 0$ ), необходимо определить потери мощности в металлических стенках резонатора  $S_M$  (омические потери) и потери в диэлектрике  $S_\Delta$ , заполняющем резонансный объем.

**Список литературы:** 1. *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р.* Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ. – М.: Связь, 1965. – 352 с. 2. *Шестопалов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г.* Дифракция волн на решетках. – Харьков: Изд-во Харьковск. ун-та, 1973. – 288 с. 3. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

*Поступила в редколлегию 16.02.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*