УДК 631.371

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 длинны 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 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 $\dot{r}_1 = r_1 \exp(j\varphi_{r1})$, $\dot{t}_1 = t_1 \exp(j\varphi_{t1})$, а коэффициент отражения второй торцевой стенки ($z = z_0$) через $\dot{r}_2 = r_2 \exp(j\varphi_{r2})$. Здесь r_1, r_2 и t_1 – модули, а φ_{r1}, φ_{r2} и φ_{t1} – фазы коэффициентов отражения и передачи, соответст-

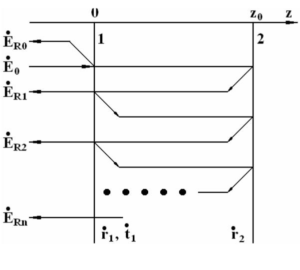

Рис. 1. Модель призматического резонатора

венно. Тогда можем написать

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

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

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

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

$$\dot{E}_{R1} = E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_{\text{м}}^2 S_{\text{д}}^2 \exp(-jk(z + 2z_0)), \qquad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; $S_{\text{м}}$ и $S_{\text{д}}$ – 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 $S_{\text{м}} = \exp(-\alpha_{\text{м}}/2)$, $\alpha_{\text{м}} = P_{\text{м}}/P_{\text{р}}$ и $S_{\text{д}} = \exp(-\alpha_{\text{д}}/2)$, $\alpha_{\text{д}} = P_{\text{д}}/P_{\text{р}}$. Здесь $P_{\text{м}}$ и $P_{\text{д}}$ – потери мощности в стенках резонатора и диэлектрике, а $P_{\text{р}}$ – мощность, поступившая в резонатор. Аналогичным образом запишем выражение для второй отраженной волны

$$\begin{aligned} \dot{E}_{R2} &= E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_{м}^2 S_{д}^2 \exp(-jk(z + 2z_0)) \times \\ &\times \left(\dot{r}_1 \dot{r}_2 S_{м}^2 S_{д}^2 \exp(-j2kz_0)\right). \end{aligned} \qquad (4)$$

Теперь можем записать выражение для n-ой отраженной волны

$$\begin{aligned} \dot{E}_{Rn} &= E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_{м}^2 S_{д}^2 \exp(-jk(z + 2z_0)) \times \\ &\times \left(\dot{r}_1 \dot{r}_2 S_{м}^2 S_{д}^2 \exp(-j2kz_0)\right)^{n-1}. \end{aligned} \qquad (5)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{E}_{R\Sigma} &= E_0 \dot{t}_1^2 \dot{r}_2 S_{м}^2 S_{д}^2 \exp(-jk2z_0) \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \left(\dot{r}_1 \dot{r}_2 S_{м}^2 S_{д}^2 \exp(-j2kz_0)\right)^{n-1}. \end{aligned} \qquad (6)$$

Так как $|r_1|$, $|r_2|$, $S_{\text{м}}$ и $S_{\text{д}}$ в общем случае меньше единицы, то ряд (6) – сходящаяся геометрическая прогрессия, суммируя которую, получим выражение

$$\dot{E}_{R\Sigma}=E_0\, t_1^2\, r_2\, S_м^2\, S_д^2 \frac{\exp\left(-j\left(2kz_0-2\varphi_{t1}-\varphi_{r2}\right)\right)}{1-r_1 r_2 S_м^2 S_д^2 \exp\left(-j\left(2kz_0-\varphi_{r1}-\varphi_{r2}\right)\right)}. \qquad (7)$$

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

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

или

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

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

$$\begin{cases}\alpha=2kz_0-2\varphi_{t1}-\varphi_{r2},\\ \beta=2kz_0-\varphi_{r1}-\varphi_{r2},\end{cases} \qquad (10)$$

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

$$R_\Sigma=\frac{t_1^2\, r_2\, S_м^2\, S_д^2}{\left(1-2r_1 r_2 S_м^2 S_д^2 \cos\beta+\left(r_1 r_2 S_м^2 S_д^2\right)^2\right)^{1/2}}, \qquad (11)$$

$$\varphi_{R\Sigma}=-\arcsin\frac{\sin\alpha+r_1 r_2 S_м^2 S_д^2 \sin(\beta-\alpha)}{\left(1-2r_1 r_2 S_м^2 S_д^2 \cos\beta+\left(r_1 r_2 S_м^2 S_д^2\right)^2\right)^{1/2}}. \qquad (12)$$

Теперь запишем коэффициент отражения по полю от рассматриваемого резонатора

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

или с учетом выражения (9)

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

или

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_\Sigma = \frac{t_1^2 r_2 S_м^2 S_д^2}{\left(1 - r_1 r_2 S_м^2 S_д^2\right)}\ . \tag{21}$$

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

$$R = r_1 - R_\Sigma\,. \tag{22}$$

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

$$R = r_1 - \frac{t_1^2 r_2 S_м^2 S_д^2}{\left(1 - r_1 r_2 S_м^2 S_д^2\right)}\ . \tag{23}$$

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 $S_м$ (омические потери) и потери в диэлектрике $S_д$, заполняющем резонансный объем.

Список литературы: **1.** *Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р.* Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников 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. Лупиков В.С.