

# 回旋管输出窗频率特性的研究\*

罗积润 徐承和\*\* 张世昌 洪文浩

(中国科学院电子学研究所)

## 提 要

本文对回旋管输出窗系统的传输特性进行了理论研究,给出了圆波导径向突变的模式散射的近似公式,研究了输出窗对工作模式的反射和寄生模式的散射的频率响应。实验证实分析是合理的。

我们研究的回旋管输出窗系统是由两段圆波导突变和兰宝石介质窗构成。回旋管的振荡模式波会在波导突变处激起寄生模式。如果窗的设计不合理,寄生模式会干涉回旋管的正常工作。下面首先研究波导突变的散射。

图1给出了圆波导径向突变段的示意图。共轴连接的两段波导的半径  $a$  和  $b$  相差不大,即  $b = (1 + x)a$ ,  $x$  为小量。  $z = 0$  为突变面。设波导是无耗的,  $TE_{mn}$  模式波自左入射到此突变段。如满足  $z = 0$  突变面的边界条件,利用模式匹配技术可导出界面的多模散射特性。经过繁复的积分运算,可推出  $TE_{mn}$  模入射下圆波导径向突变散射的近似公式为

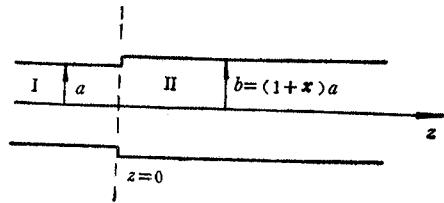


图1 圆波导突变连接

$$\Gamma = (\beta_{mn}^I - \beta_{mn}^{II}) / (\beta_{mn}^I + \beta_{mn}^{II}), \quad (1)$$

$$T = 2(1 + 2X) / \left( \sqrt{\frac{\beta_{mn}^I}{\beta_{mn}^{II}}} + \sqrt{\frac{\beta_{mn}^{II}}{\beta_{mn}^I}} \right) [1 + 2X - m^2 X / (x_{mn}^2 - m^2)], \quad (2)$$

$$\Gamma_{mqn}^- = A_{mqn} \frac{\beta_{mn}^{II} - \beta_{mq}^{II}}{\beta_{mq}^I + \beta_{mq}^{II}} \sqrt{\frac{\beta_{mq}^I}{\beta_{mn}^{II}}}, \quad (3)$$

$$\Gamma_{mqn}^+ = A_{mqn} \frac{\beta_{mn}^{II} + \beta_{mq}^{II}}{\beta_{mq}^I + \beta_{mq}^{II}} \sqrt{\frac{\beta_{mq}^{II}}{\beta_{mn}^{II}}}, \quad (4)$$

$$A_{mqn} = \frac{2XT[X_{mq}^2 X_{mn}^2 + m^2(X_{mq}^2 + 2X_{mn}^2)]}{X_{mn} X_{mq} (X_{mq}^2 - X_{mn}^2) [(1 - m^2/X_{mq}^2)(1 - m^2/X_{mn}^2)]^{1/2}},$$

式中  $\Gamma$ 、 $T$ 、 $\Gamma_{mqn}^-$ 、 $\Gamma_{mqn}^+$  分别为反射系数、透射系数、反向 ( $-z$  方向) 和正向 ( $+z$  方向) 耦合参数;  $\beta_{mn}^I$ 、 $\beta_{mq}^I$  和  $\beta_{mn}^{II}$ 、 $\beta_{mq}^{II}$  分别为  $z \leq 0$  和  $z > 0$  区域的人射波模  $TE_{mn}$  和

\* 1986年5月8日收到,1986年9月29日修改定稿。

\*\* 北京大学无线电电子学系。

它的耦合波的轴向传播常数； $X_{ml}$  是  $m$  阶贝塞尔函数导数的第  $l$  个非零根； $m$  是入射波模和耦合波模共同的角向模数； $n$ 、 $q$  是对应的径向模数。

从(1)式可以看到,当  $x \ll 1$  时,反射系数  $\Gamma$  与单模传输线理论中反射系数表达式一致,由两个波导波阻抗之差决定。(3)、(4)式指出,与入射波模具有不同角向模数的模式不会由圆波导径向突变所激起,这是圆波导径向突变散射的一个特点。在  $x \ll 1$  的情况下,(1)一(4)式能够较好地反映实际情况,如果采用文献[1]中同样的近似方法,将  $\beta_{mn}^{II}$  用  $\beta_{mn}^I$  作关于  $x$  的一级近似展开,将得到与该文献中完全相同的结果。

如果波导径向突变激起的耦合波模是传输型的,(3)、(4)式的计算表明,一般  $\Gamma_{mqn}^-$  比  $x$  小一个量级,  $\Gamma_{mqn}^+$  与  $x$  同量级。随着  $x$  的增加,耦合逐步增强。图 2 和图 3 给出的  $TE_{02}$  和  $TE_{22}$  模入射分别激起  $TE_{01}$  和  $TE_{21}$  模时耦合参数随  $\lambda/a$  的变化曲线清楚地表明了这一点。当耦合波模作为消失波出现在波导中时,耦合参量是一复量,其模与  $x$  同量级。倘若耦合波模在某一波导处于临界截止状态,则因  $x \ll 1$ ,另一波导中的传播常数

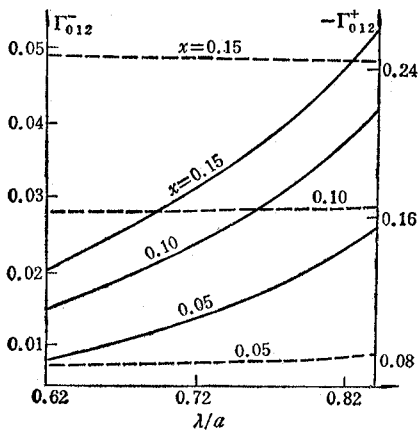


图 2  $TE_{02}$  激起  $TE_{01}$  时耦合参数随  $\lambda/a$  的变化曲线  
—— $\Gamma_{012}^-$     - - -  $\Gamma_{012}^+$

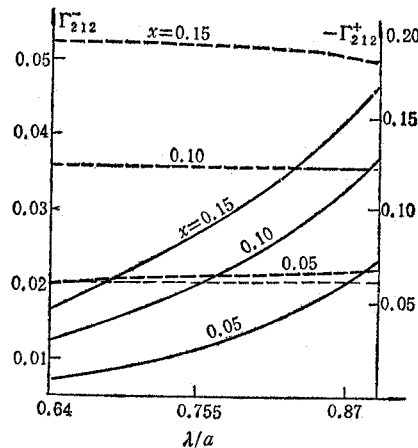


图 3  $TE_{22}$  激起  $TE_{21}$  时耦合参数随  $\lambda/a$  的变化曲线  
—— $\Gamma_{212}^-$     - - -  $\Gamma_{212}^+$

很小,可能导致强耦合。只要工作波长选在  $\lambda_{cb}^{(m,n+1)} < \lambda < \lambda_{ca}^{(m,n)}$  区域的中心点附近就可以不必担心临界截止产生。 $\lambda_{cb}^{(m,n+1)}$  为  $TE_{m,n+1}$  模在大半径波导中的截止波长,  $\lambda_{ca}^{(m,n)}$  为小半径波导中  $TE_{m,n}$  模的截止波长。

利用前面对波导突变散射分析的结果,我们对图 4 所示回旋管输出窗的传输特性进行了研究。由于系统的突变很小,在仅考虑入射主模的反射和透射情况下,我们采用多点反射方法,获得  $x = 0$  面的总反射系数为

$$f = \rho e^{-i(AR+\phi)}, \tag{5}$$

式中

$$\begin{aligned} \rho &= (AN^2 + BN^2)^{1/2}, \quad \phi = \text{tg}^{-1}(-BN/AN), \quad AR = \beta^{II}(L-d) + \beta^{III}d, \\ AN &= TT^* \Gamma_{11}^3 \cos(\beta^{III}d) - \Gamma_1 A^- \cos(AR), \\ BN &= TT^* \Gamma_{11}(2 - \Gamma_{11}^2) \sin(\beta^{III}d) - \Gamma_1(2 - A^+) \sin(AR), \\ A^\pm &= \Gamma_{11}^2(2 - \Gamma_{11}^2) \pm (TT^* - 1)(1 - \Gamma_{11}^2)^2, \end{aligned}$$

$$\Gamma_I = (\beta^I - \beta^{II}) / (\beta^I + \beta^{II}), \quad \Gamma_{II} = (\beta^{II} - \beta^{III}) / (\beta^{II} + \beta^{III}),$$

$$\Gamma_D = -e^{-i\phi}, \quad \phi = \frac{2X_{mn}}{\operatorname{tg} \theta} \left[ \frac{a}{X_{mn}} \beta^I - \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{a}{X_{mn}} \beta^I \right) \right] + \pi/2,$$

$$\Gamma = 2(1 + 2X) \left( \sqrt{\frac{\beta^I}{\beta^{II}}} + \sqrt{\frac{\beta^{II}}{\beta^I}} \right)^{-1} [1 + 2X - m^2 X / (X_{mn}^2 - m^2)]^{-1},$$

$$\Gamma^* = 2(1 - 2X) \left( \sqrt{\frac{\beta^I}{\beta^{II}}} + \sqrt{\frac{\beta^{II}}{\beta^I}} \right)^{-1} [1 - 2X + m^2 X / (X_{mn}^2 - m^2)]^{-1}.$$

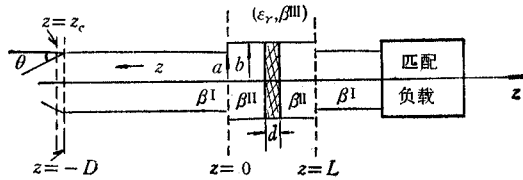


图 4 回旋管输出系统示意图

自激振荡条件为

$$2\beta^I D + AR + \phi + \phi = 2l\pi, \quad l = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

$z = 0$  面的驻波比为

$$S = (1 + \rho) / (1 - \rho). \quad (7)$$

对应衍射  $Q$  值可采用文献[2]公式(46)计算, 忽略  $\phi$  变化对  $Q$  值的影响可得

$$Q = \frac{\rho^{1/2} \omega_0^2}{(1 - \rho) c^2} \left[ \frac{D}{\beta^I} + \frac{(L - d)}{2\beta^{II}} + \frac{\epsilon_r d}{2\beta^{III}} + \frac{\beta^I a c^2}{\omega_0^2 \operatorname{tg} \theta} \right], \quad (8)$$

式中  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常数,  $a$  为输出波导半径,  $\theta$  为输出渐变角。式中第一项是  $z = -D$  到  $z = 0$  的均匀波导段的贡献, 第二、三项是输出窗的贡献, 第四项是输出喇叭口的贡献。  $Q$  值的大小主要由第一、四项决定。

(6)–(8)式构成研究输出窗传输频率特性的基本方程。图 5 画出了  $TE_{02l}$  模二次谐波回旋管输出窗驻波比与谐振频率的关系曲线。计算参数为:  $x = 0.1364$ ,  $\epsilon_r = 9.0$ ,  $D = 285.0\text{mm}$ ,  $\theta = 6^\circ$ ,  $L = 9.9\text{mm}$ ,  $d = 1.5\text{mm}$ ,  $a = 11.0\text{mm}$ 。曲线表明, 在 31–37GHz 范围内,  $TE_{01}$ ,  $TE_{02}$ ,  $TE_{21}$ ,  $TE_{22}$  四个模式均有驻波比均不超过 2, 衍射  $Q$  值不超过 500。因此在这个频率范围内, 系统具有良好的传输频率特性, 基本上与模式无关。图 5 中“x”点是对  $TE_{02}$  模式波从该系统输出时的冷测数据点, 与计算值比较, 实验值略低于计算值。从物理上看这是合理的, 因为计算没有考虑系统本身的损耗。以

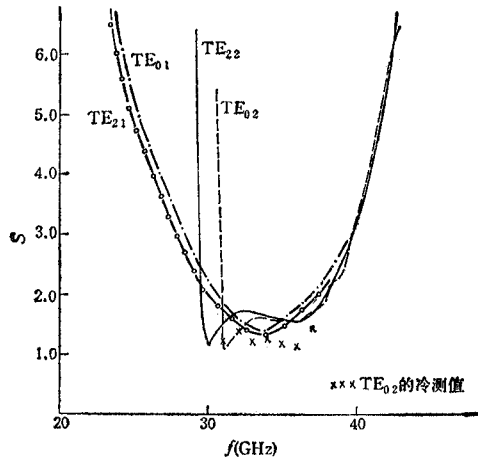


图 5 回旋管输出窗驻波比与谐振频率关系曲线

上分析计算表明,合理设计输出窗参量,可以使得反射系数  $\rho$  最小,从而可以减小系统的  $Q$  值,提高输出回路效率,改善微波功率输出。

本文给出了任意模式在圆波导径向突变中散射的近似公式,可以用以研究小突变散射,具有计算简单,物理意义清晰等优点。分析表明,当  $x \ll 1$  时,若工作波长处在  $\lambda_{c0}^{(m,n+1)} < \lambda < \lambda_{c0}^{(m,n)}$  的中心点附近,径向突变耦合的强度是微弱的。在多点反射法的基础上,我们获得了任意模式通过图 4 所示回旋管输出窗时,传输频率特性的基本方程,并用以计算了  $TE_{021}$  模二次谐波工作回旋管输出窗的输出频率特性。通过与实验比较,证明理论分析是合理的。分析对提高输出回路效率,改善微波功率输出提供了途径,有益于输出窗设计的改进。

### 参 考 文 献

- [1] R. A. Waldron 著,徐鲤庭译,被导电磁波原理,人民邮电出版社,1977,第9章,第3节。  
 [2] Q. F. Li and K. R. Chu, *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, **13**(1982), 712.

## STUDY OF THE FREQUENCY RESPONSE OF OUTPUT WINDOW IN GYROTRON

Luo Jirun, Xu Chenghe\* Zhang Shichang, Hong Wenjie

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

When the operating mode wave generated in a gyrotron is going through the output window section, in which the undesired scattering modes that may disturb the normal operating of gyrotron can be excited by the discontinuities. The transmitting properties of the window section in a gyrotron are analysed theoretically. The approximate formulas for mode scattering on the radial step of cylindrical waveguides are derived. The frequency dependence of wave transmissions of the operating mode and undesired modes through the window system are obtained and discussed. The cold measurements show that the theoretical results are reasonable.

\* Xu Chenghe is with the Department of Radio Electronics, Beijing University.