

文章编号: 1001-4322(2007)06-0927-04

# 介质加载回旋行波管小信号分析\*

鄢 然, 罗 勇

(电子科技大学 高能电子学研究所, 成都 610054)

**摘 要:** 应用分析回旋行波管绝对不稳定性的 Briggs-Bers 相碰判据与小信号色散方程, 结合介质加载波导的冷场分析, 数值计算并比较了不同介质加载条件下回旋行波管工作模式的起振电流与寄生模式的起振长度。改变加载介质的特性参数可以增加行波损耗从而显著提高工作模式起振电流, 并抑制掉寄生模式的返波振荡。结合介质加载波导冷场分析与回旋行波管小信号色散方程, 分析了介质加载条件下回旋行波管小信号增益, 计算得出了不同介质加载条件下的回旋行波管的小信号增益带宽曲线。

**关键词:** 高功率微波; 回旋行波管; 绝对不稳定性; 自激振荡; 介质加载; 小信号增益

**中图分类号:** TN129

**文献标识码:** A

高功率毫米波器件有着重要的应用前景, 在国际上得到高度重视。国内对高功率毫米波器件——回旋振荡管与回旋速调管已有了较深入的研究<sup>[1-5]</sup>, 但对具有更大带宽的回旋行波管研究还处于起步阶段, 其主要原因在于不能很好地解决其自激振荡问题。回旋行波管的自激振荡问题是由三种因素造成<sup>[6]</sup>: 耦合器或输出段与高频结构不匹配造成行波反射; 电子回旋共振曲线与波导色散曲线交于传播常数的负值区时形成的寄生模式的返波振荡; 当工作电流增大到一定值时, 注波互作用的不稳定性区域会扩展到传播常数的负值区, 导致工作模式由传播不稳定性转变为绝对不稳定性而产生自激振荡。通过对回旋行波管的注波互作用段进行介质分布加载不仅可以有效地抑制回旋行波管工作模式的自激振荡<sup>[7]</sup>, 提高回旋行波管的起振电流, 增大其输出功率, 并能有效地抑制寄生模式的返波振荡, 从而延长注波互作用段的长度, 提高回旋行波管的增益<sup>[8]</sup>。本文从回旋行波管小信号理论出发, 用 Briggs-Bers 相碰判据与介质微扰法对介质加载回旋行波管工作模式自激振荡现象进行了理论分析与数值计算, 并用场匹配法修正回旋行波管的小信号色散方程, 对不同加载条件下回旋行波管的小信号增益进行了分析。

## 1 理论分析

电子回旋绝对不稳定性是造成回旋行波管自激振荡的根本原因<sup>[4]</sup>。通过 Laplace-Fourier 变换法对色散方程进行分析, 可以得出回旋行波管发生绝对不稳定性的 Briggs-Bers 相碰判据<sup>[6]</sup>。应用 Vlasov 与 Maxwell 方程推导以无耗波导作为高频结构的回旋行波管小信号色散方程, 利用此方程可得判别绝对不稳定性发生的鞍点方程, 通过微扰法近似求解鞍点方程, 利用 Briggs-Bers 相碰判据, 可以得出使用无耗均匀波导作为行波段时回旋行波管工作模式的近似起振电流与振荡频率的解析公式<sup>[6]</sup>

$$\omega = \omega_c \left\{ \frac{B_0}{B_g} + \left[ 8\beta_{z0}^2 \left( 1 - \frac{B_0^2}{B_g^2} \right) + 64\beta_{z0}^4 \right]^{1/2} \right\} / (1 + \beta_{z0}^2) \quad (1)$$

$$k_z = k_{zm} \left( \frac{\omega}{\omega_c} - \frac{B_0}{B_g} \right) / 4\beta_{z0} \quad (2)$$

$$I_c = 1.152 \times 10^5 \frac{\gamma_0 \beta_{z0}^3 x_{nm}^2 k_{zm}}{\beta_{\perp 0}^2 H_m(k_{zm} r_{c0}, k_{zm} r_{L0})} \left( \frac{k_z}{k_{zm}} \right)^4 \quad (3)$$

式中:  $\omega_c$  为波导截止频率;  $B_0/B_g$  为引导磁场与切点磁场的比值;  $\beta_{z0}, \beta_{\perp 0}$  为电子归一化纵向速度与横向速度;  $H_m = J_{-m}^2(k_{zm} r_{c0}) J_m'(k_{zm} r_{L0})$  为注波耦合系数;  $r_{c0}$  为引导中心半径;  $r_{L0}$  为电子回旋半径;  $x_{nm}$  为  $m$  阶 Bessel 函数的第  $n$  个导数根;  $\gamma_0$  为相对论因子。

通过式(3)得出以无耗波导作为行波段时回旋行波管的起振电流与加速电压、纵横速度比  $\alpha$ 、引导磁场的关系, 为回旋行波管工作参数初步选取提供了一定的理论依据。但通过式(3)计算所得的起振电流远低于大功

\* 收稿日期: 2006-12-20; 修订日期: 2007-05-17

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 鄢 然(1981—), 男, 博士研究生, 从事高功率毫米波源研究; yanran200@163.com.



率输出所需的实际工作电流的要求,这说明使用无耗波导作为行波段是无法抑制自激振荡现象发生的。为了使工作电流达到大功率输出的要求,同时又抑制自激振荡现象的发生,必须改进高频系统的结构。通过使用介质微扰法修正光滑波导回旋行波管小信号色散方程,得出了考虑壁损耗的回旋行波管小信号色散方程<sup>[8]</sup>

$$D(\omega, k_z) = \frac{\omega^2}{c^2} - k_z^2 - k_{zm}^2 \left[ 1 - (1+i) \left( 1 + \frac{m^2}{x_{zm}^2 - m^2} \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right) \frac{\delta}{r_w} \right] - \frac{4N_b e^2}{m_e c^2 r_w^2 K_{zm} \gamma_0} \times \left[ \frac{-\beta_{0\perp}^2 (\omega^2 - k_z^2 c^2) H_{zm}(k_{zm} r_{c0}, k_{zm} r_{L0})}{(\omega - k_z v_{z0} - s\Omega_c / \gamma_0)^2} + \frac{(\omega - k_z v_{z0}) T_{zm}(k_{zm} r_{c0}, k_{zm} r_{L0}) - k_{zm} v_{\perp 0} U_{zm}(k_{zm} r_{c0}, k_{zm} r_{L0})}{\omega - k_z v_{z0} - s\Omega_c / \gamma_0} \right] \quad (4)$$

式中:  $\delta$  为波导的趋肤深度;  $N_b$  单位长度的电子数;  $e$  为电子电量;  $r_w$  为波导半径;  $H_{zm}$  为注波耦合系数。

$$K_{zm} = J_m^2(x_{zm})(1 - m^2/x_{zm}^2), \quad H_{zm} = J_{z-m}^2(x) J_z'(y) \quad (5)$$

$$U_{zm} = -\frac{1}{2} y J_z'(y) \{ J_{z-1}(y) [J_{z-m-1}^2(x) - J_{z-m}^2(x)] + J_{z+1}(y) [J_{z-m+1}^2(x) - J_{z-m}^2(x)] \} \quad (6)$$

$$T_{zm}(x, y) = 2H_{zm}(x, y) + y J_z'(y) \{ 2J_{z-m}^2(x) J_z'(y) - J_z(y) \left[ \frac{1}{x} J_{z-m}(x) J_{z-m}'(x) + J_{z-m}^2(x) + J_{z-m}(x) J_{z-m}'(x) \right] \} \quad (7)$$

在不同工作电流的情况下通过使用 Briggs-Bers 相碰准则通过数值计算求解式(4),求出了不同壁损耗条件下(即不同行波传播损耗条件下)的工作模式的起振电流。在理论上得出了通过增加行波损耗可提高回旋行波管起振电流的结论。在实际器件研制中,为了实现对行波损耗的有效控制,需要通过在无耗波导段涂敷介质来实现。通过使用场匹配法对介质加载波导进行冷场分析得到色散方程<sup>[9]</sup>

$$\left[ y J_m'(x) G_m(y) - x J_m(x) G_m'(y) \right] \left[ \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} y J_m'(x) F_m(y) - x J_m(x) F_m'(y) \right] + \frac{(\gamma m)^2 (y^2 - x^2)^2 J_m^2(x) F_m(y) G_m(y)}{\epsilon_{r2} x^2 y^2 k^2} = 0 \quad (8)$$

式中:  $x^2 = (k^2 \epsilon_{r1} + \gamma^2) r_{b1}^2$ ;  $y^2 = (k^2 \epsilon_{r2} + \gamma^2) r_{b2}^2$ ;  $F_m(k_{c2} r) = J_m(k_{c2} r) - J_m(k_{c2} r_{b2}) Y_m(k_{c2} r) / Y_m(k_{c2} r_{b2})$ ;  $G_m(k_{c2} r) = J_m(k_{c2} r) - J_m'(k_{c2} r_{b2}) Y_m(k_{c2} r) / Y_m'(k_{c2} r_{b2})$ ;  $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$  分别为真空与介质的相对介电常数;  $r_{b2}$  为波导半径;  $r_{b2} - r_{b1}$  为介质加载厚度。

通过数值计算求解式(8)所对应的复宗量 Bessel 超越方程,可以求出在不同加载条件下各模式波型所对应的传播常数与损耗常数。通过改变加载介质的特性参数能够有效控制工作模式的单位长度的行波损耗大小,使回旋行波管工作模式的起振电流显著提高。

介质加载可以提高回旋行波管工作模式的起振电流,但同时会影响到回旋行波管的增益。因此需要对介质加载条件下回旋行波管的增益进行分析。用冷场分析得出的波导介质加载条件下的传播常数来修正无耗条件下回旋行波管的色散方程,得出介质加载条件下回旋行波管的小信号色散方程<sup>[10]</sup>

$$(\beta_{zm,load}^2 - k_z^2)(\beta_{e,gyro} - k_z)^2 = -\frac{4N_b e^2 \beta_{0\perp}^2 H_{zm}(k_{zm} r_{c0}, k_{zm} r_{L0})}{m_e \omega_c^2 r_w^2 K_{zm} \gamma_0 v_z^2} \quad (9)$$

在小信号前提下,利用微扰法令介质加载回旋行波管的传播常数  $k_z = \beta_{zm,load} + \beta_{zm,load} C_{gyro} \delta$ , 式中  $C_{gyro} \delta \ll 1$ ,  $\beta_{zm,load}$  为通过场匹配法得出的介质加载波导的冷场传播常数,把微扰近似代入色散方程(9),并忽略高次项,得近似色散方程

$$j\beta_{zm,load}^4 C_{gyro}^3 \delta (b_{gyro} - j\delta)^2 = \frac{(\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} I_0 \beta_{0\perp}^2 k_{c,0n,load}^2 (1 + \alpha^2) H_{zm}}{4\pi r_w^2 K_{zm} V_0 \beta_{z0}} \quad (10)$$

式中:  $\beta_{e,gyro} = (\omega - s\Omega_c/\gamma_0)/v_{z0}$ ;  $I_0$  为工作电流;  $V_0$  为加速电压。

在给定频率下,求解式(10)可得三个复数解  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 。其中一个复数解含有正实部,对应为前向增幅波,令其为  $\delta_1 = x_1 + jy_1$ ,把增幅波所对应的解代入传播常数的微扰式中并对实部取对数可得回旋行波管中小信号增益

$$G = B_{guide} C_{gyro} N_{gyro,guide} \quad (11)$$

式中:  $B_{guide} = 40\pi(\lg e) x_1 \cong 54.6 x_1$ , 为单位长度的增益;  $C_{gyro} = \left[ \frac{(\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} I_0 \eta_c^2 k_{c,0n,load}^2 (1 + \alpha^2) H_{zm}}{4\pi r_w^2 \epsilon_{zm} \eta_z \beta_{zm,load}^4 V_0} \right]^{1/3}$ , 为回旋行波管的增益参数;  $N_{gyro,guide} = \beta_{zm,load} l / 2\pi$ ;  $\beta_{zm,load}$  为冷场分析所得的传播常数;  $l$  为腔体的长度。



## 2 数值计算与讨论

由图 1 可知当回旋行波管工作在切点状态时,很小的工作电流就会导致回旋行波管的自激振荡,尽管回旋行波管工作在切点状态下其增益最高。但是为了兼顾增益与输出功率,回旋行波管的引导磁场需要在一定程度偏离切点工作状态下的磁场值(一般选择在切点磁场的 0.98 附近)。如图可知当  $\alpha$  值减小时,起振电流会相应提高;但当  $\alpha$  值减小时电子注的横向能量会相应降低,由于回旋行波管是横向换能,所以随  $\alpha$  值减小回旋行波管的效率也相应降低。为了兼顾输出功率与效率,一般折中选择  $\alpha$  值在 1 附近。

由图 2 可知随着波导趋肤深度的增加,波导中的行波损耗将随之增大,而由图 3 可知随着波导行波损耗的增大,回旋行波管的起振电流将显著提高,从而使其输出增大。

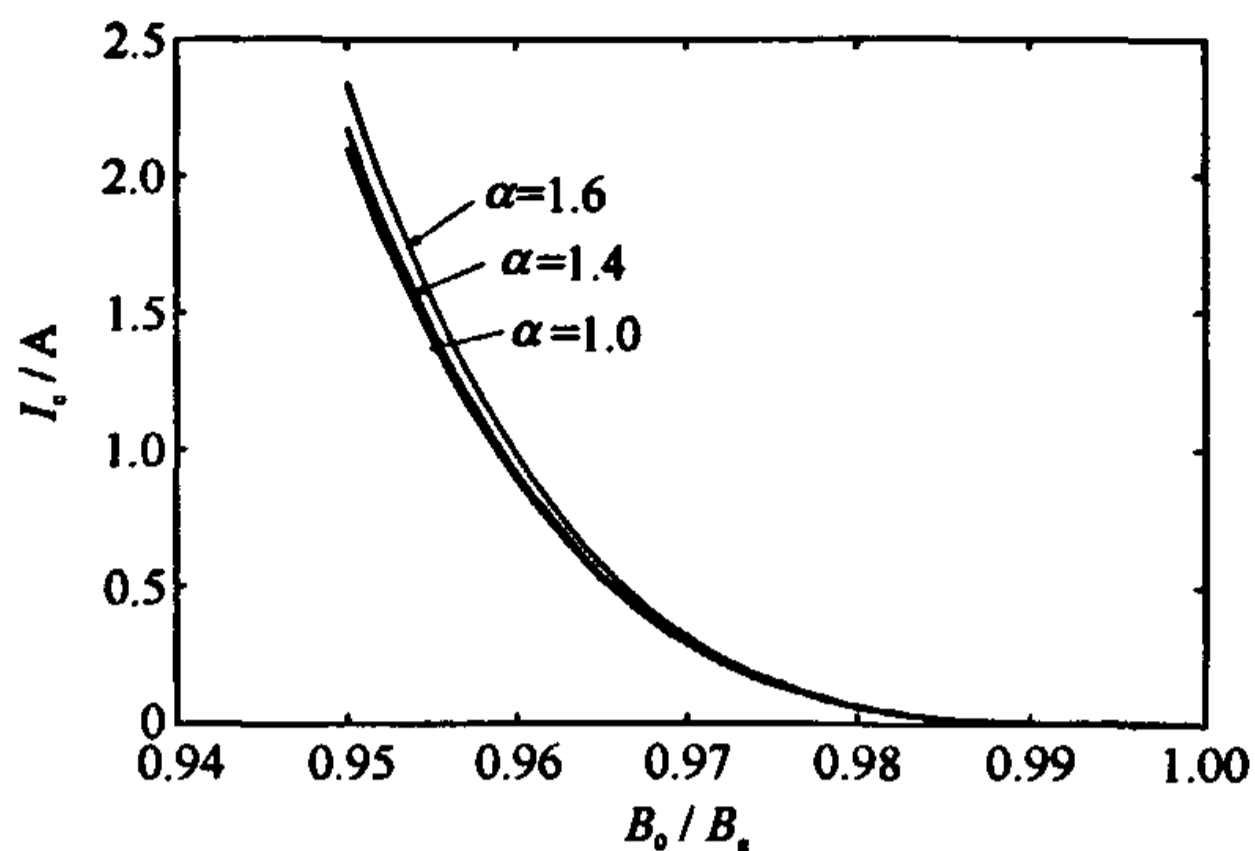


Fig. 1 Smooth wave guide as high frequency structures, the start current vs the guide magnet and  $\alpha$

图 1 光滑波导作为高频结构时起振电流随引导磁场与纵横速度比  $\alpha$  的变化

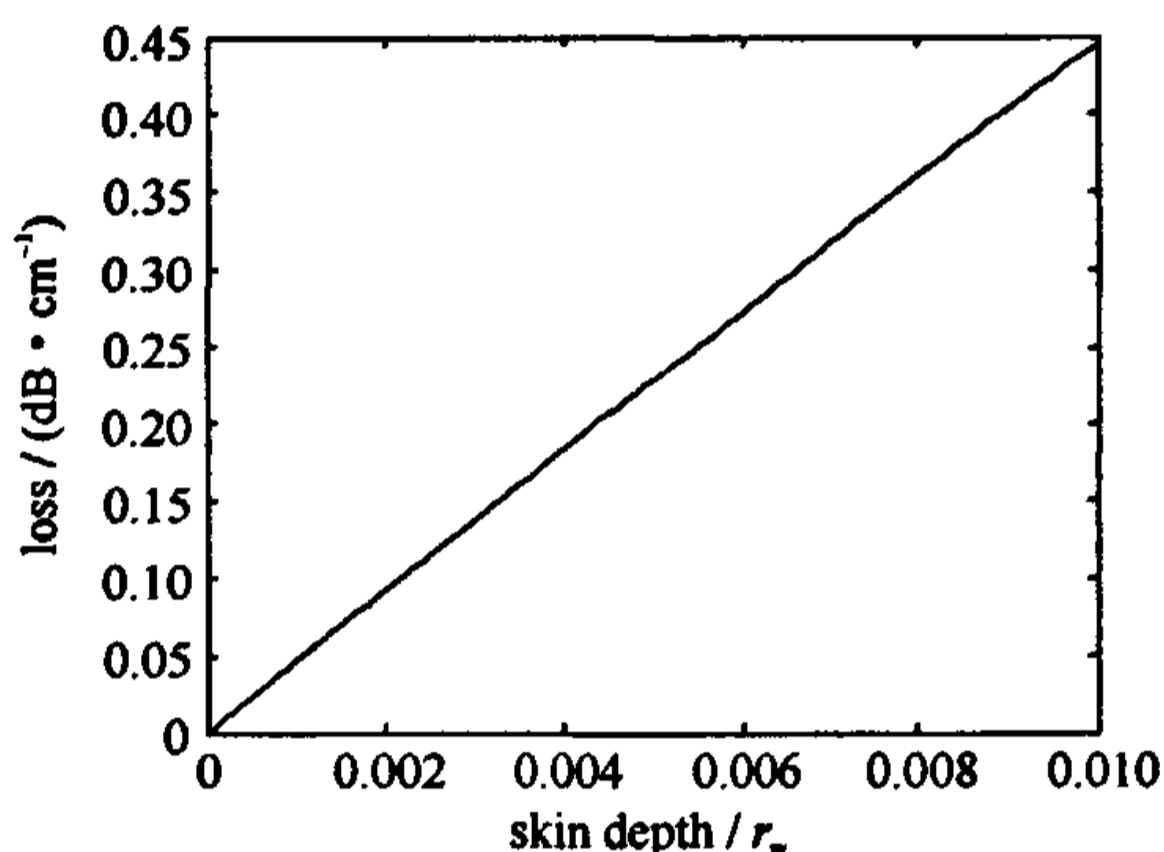


Fig. 2 Travel loss vs the skin depth

图 2 行波传播损耗与波导趋肤深度的关系

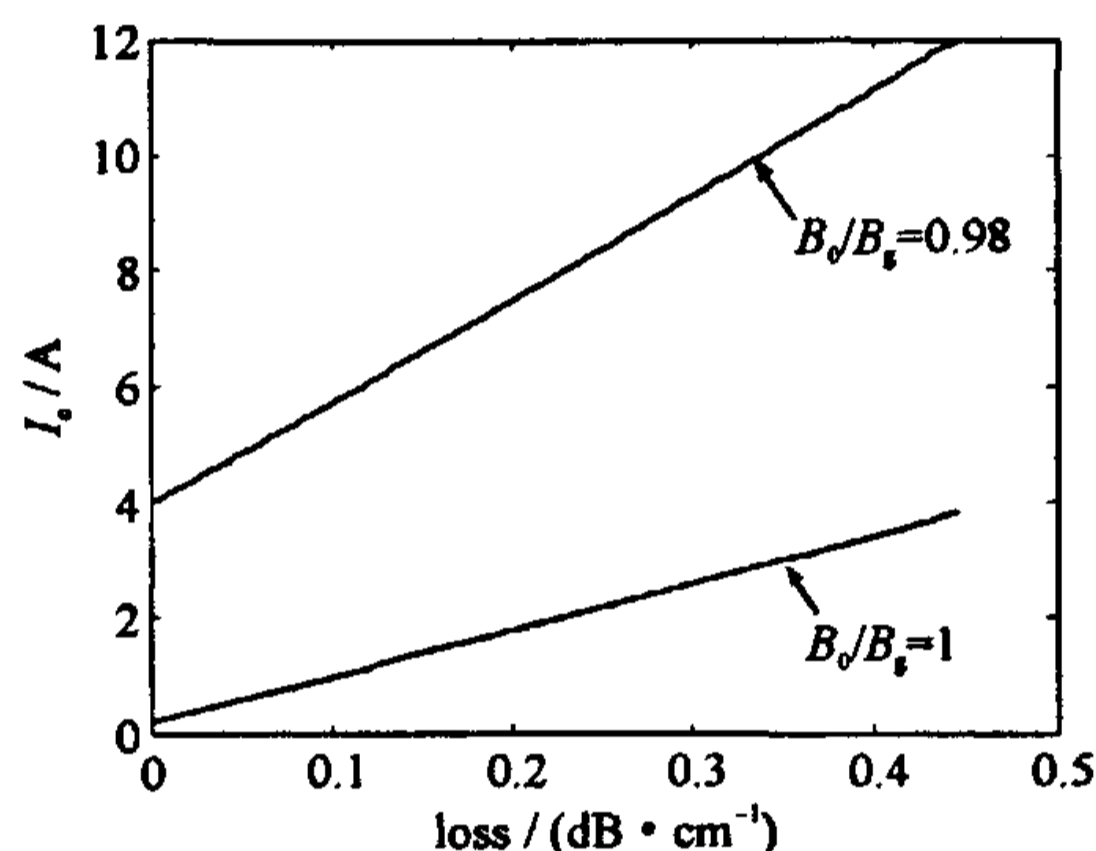


Fig. 3 Start current vs the travel loss

图 3 起振电流与行波传播损耗的关系

由图 4 与图 5 可知通过改变加载介质的厚度与损耗正切值可以使行波传播损耗增大,说明了加载介质可以有效地控制行波的传播损耗,使工作模式的起振电流提高。

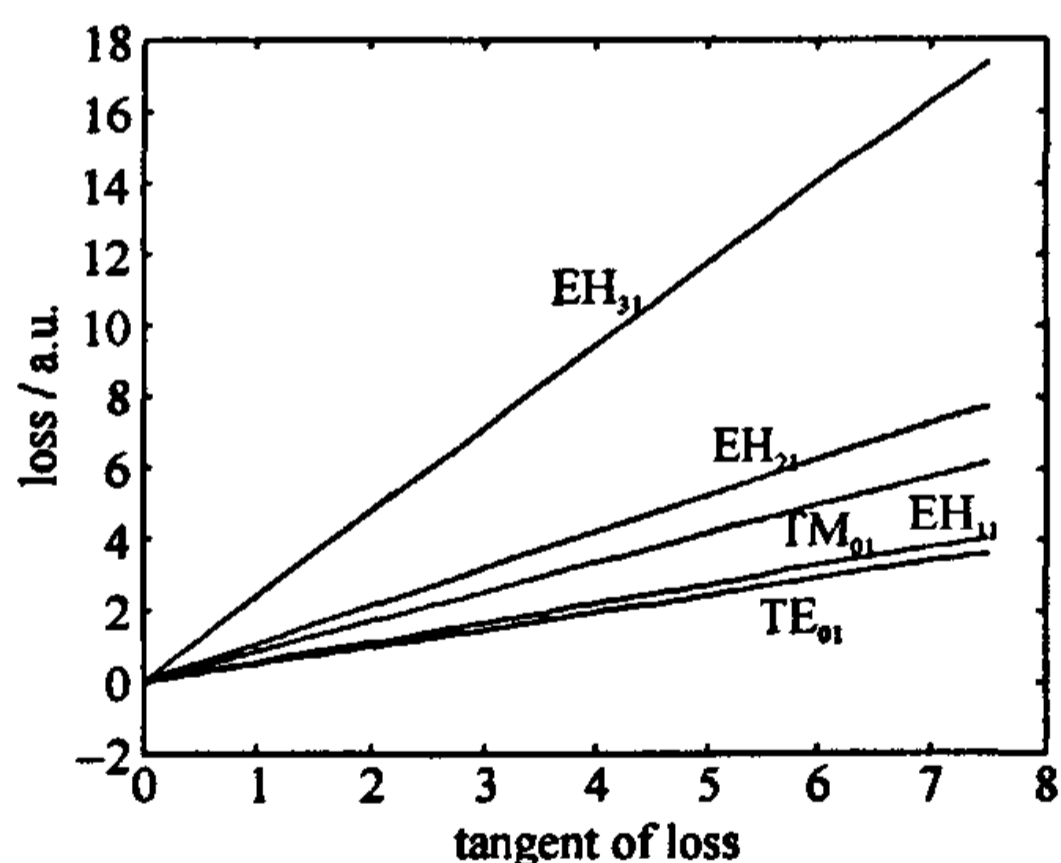


Fig. 4 Travel loss vs the tangent of loss

图 4 行波传播损耗与损耗正切的关系

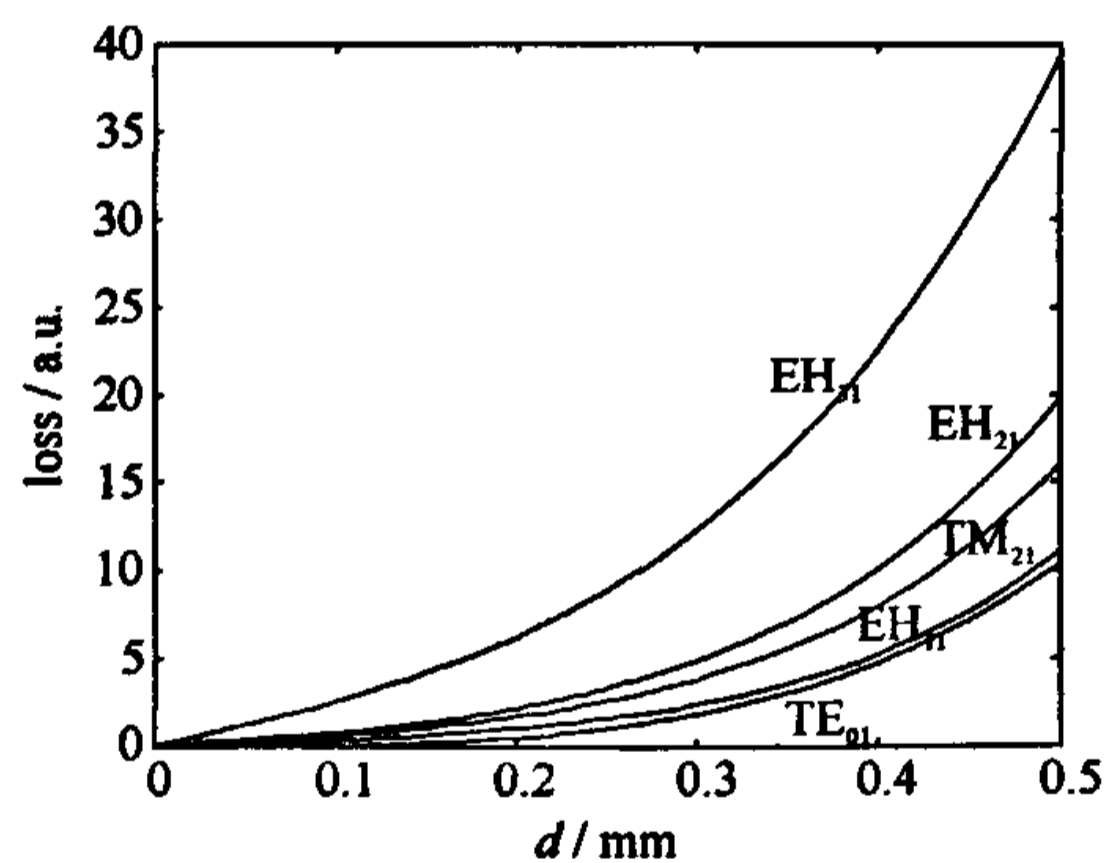


Fig. 5 Travel loss vs the load depth

图 5 行波传播损耗与介质加载厚度的关系

由图 6 可知随着介质加载厚度的增加回旋行波管的增益会降低;但由图 3、图 5 知,随着介质厚度的增加回旋行波管的行波损耗会逐渐增大,回旋行波管的起振电流会相应提高。因此对于加载介质的厚度选取需要兼顾增益与起振电流,在起振电流高于设计所需的工作电流的前提下,使介质加载对回旋行波管增益的影响最小。由图 7 可见随工作电流的提高,回旋行波管的增益会相应提高。这是由于随工作电流的增加,会有更多的电子与行波发生相互作用,当它们满足相位同步条件后,更多的电子会把自身能量交给行波场,从而使回旋行波管的放大增益提高。因此对于工作电流的选取,在低于起振电流的前提下,应该选取较大的工作电流使回旋行波管的增益提高。

## 3 结 论

本文利用判别流场发生绝对不稳定性的 Briggs-Bers 相碰判据,结合回旋行波管小信号色散方程与介质微



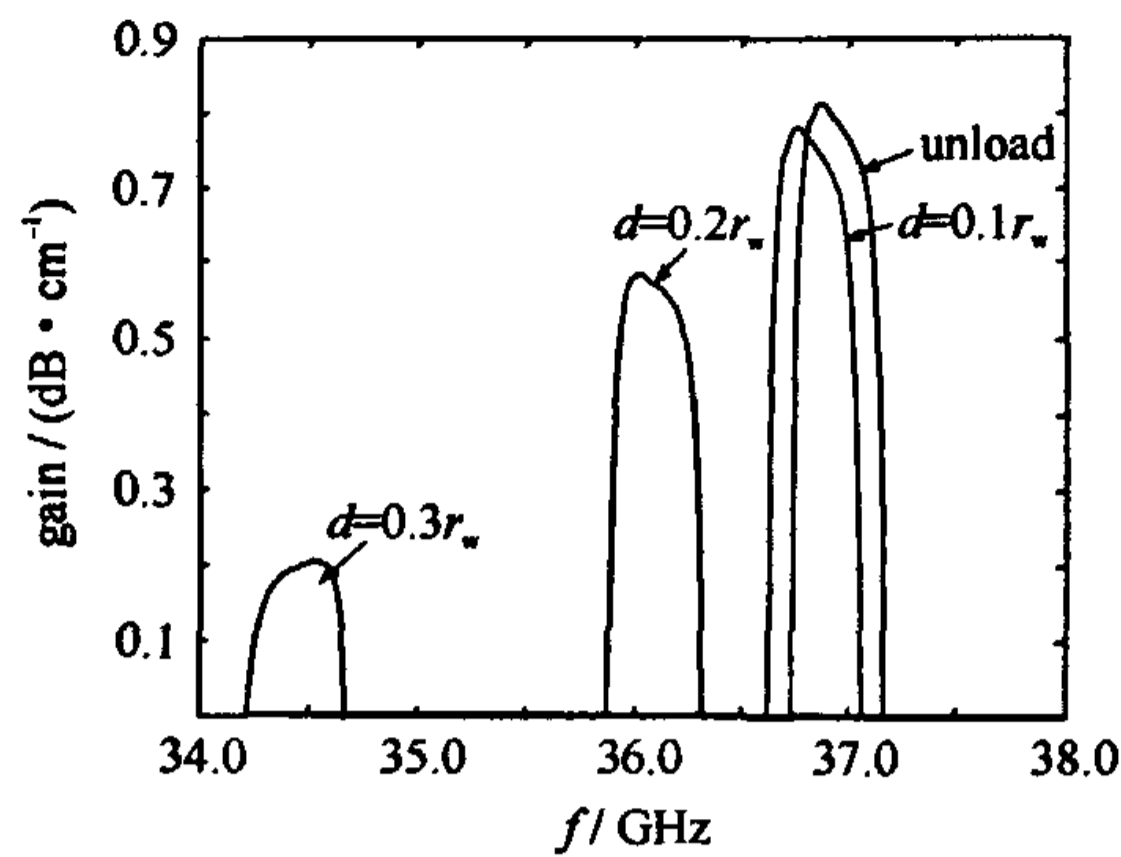


Fig. 6 Gain vs the load depth

图6 加载厚度与增益的关系

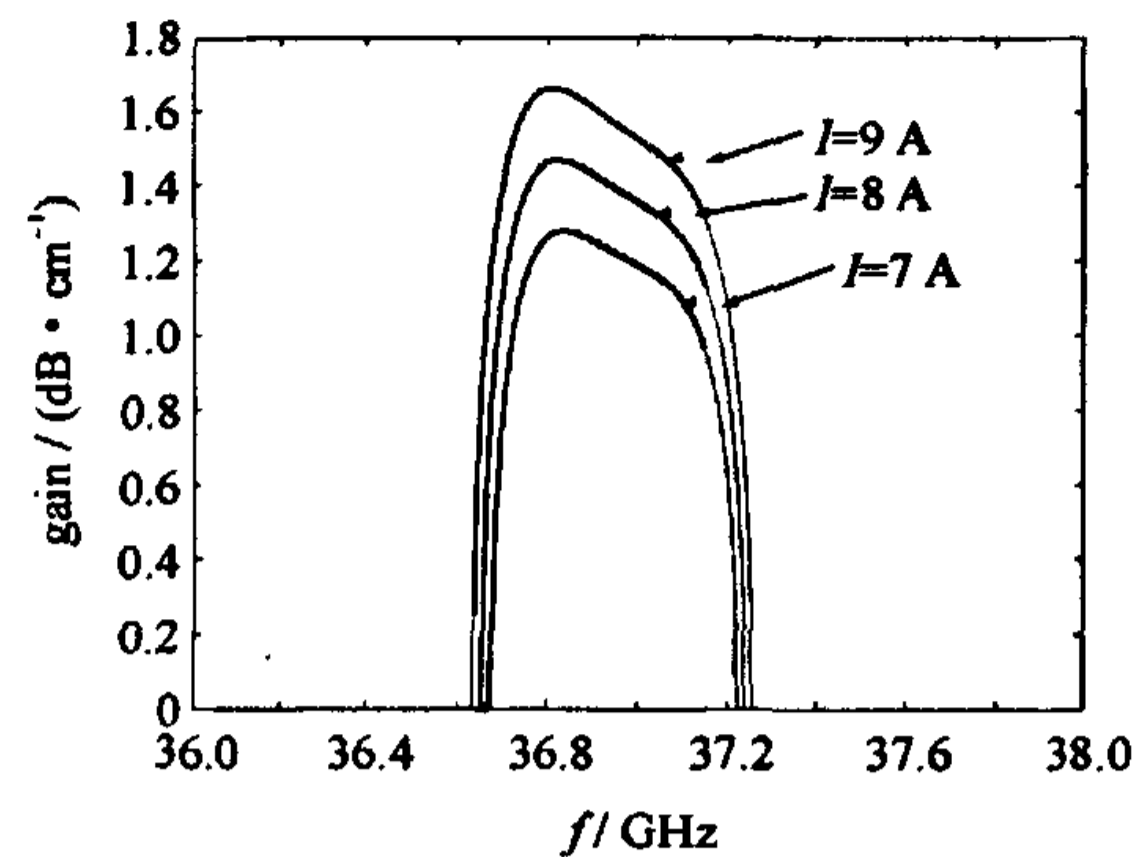


Fig. 7 Gain vs the start current

图7 增益随工作电流的变化

扰法对回旋行波管工作模式的自激振荡现象进行了分析。通过改变加载介质的特性来有效控制行波的传播损耗,提高工作模式的起振电流,达到高功率输出的要求。通过用介质加载段冷场分析方法修正无耗均匀波导的小信号色散方程,得出了介质加载波导的小信号增益方程。给出了不同工作条件与介质加载条件下回旋行波管的增益带宽图形,为在兼顾回旋行波管输出功率、效率、增益条件下,介质加载回旋行波管电子注、磁场与介质参数的选取提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] Garven M, Calame J P, Danly B G, et al. Experimental studies of a four-cavity, 35 GHz gyrokystron amplifier[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, 28(3), 672-680.
- [2] 刘濮鲲, 徐寿喜. 回旋速调管放大器及其发展评述[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(5), 683-694. (Liu P K, Xu S X. Review of gyrokystron amplifiers and its development. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(5), 683-694)
- [3] Neilson J M, Latham P E, Caplan M, et al. Determination of the resonant frequencies in a complex cavity using the scattering matrix formulation[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1989, 37(8), 1165-1169.
- [4] McCurdy A H, Choi J J. Design and analysis of coaxial couplers for 35 GHz gyrokystron amplifiers[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1999, 27(2), 164-175.
- [5] Lawson W, Ives R L, Mizuhara M, et al. Design of a 10 MW, 91.4 GHz frequency-doubling gyrokystron for advanced accelerator applications[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2001, 29, 545-558.
- [6] 尹协远, 孙德军. 旋涡流动的稳定性[M]. 北京:国防工业出版社, 2003; 27-40. (Yi X Y, Shun D J. The stability of transaction volition. Beijing, National Defense Industry Press, 2003; 27-40)
- [7] Lau Y Y, Chu K R, Barnett L R. Gyrotron traveling wave amplifier, I. Analysis of oscillations[J]. *Int J Inf Millim Waves*, 1981, 2(1), 373-413.
- [8] Chu K R, Lin A T. Gain and bandwidth of the gyro-TWT and CARM amplifiers[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1988, 16(1), 90-103.
- [9] 罗勇, 李宏福, 赵青. 低Q谐振腔混合模场匹配分析[J]. *电子学报*, 2004, 32(9), 1039-1042. (Luo Y, Li H F, Zhao Q, et al. Field matching analysis of hybrid modes for low Q cavities. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 16(3), 358-362)
- [10] Rao S J, Jain P K, Basu B N. Banding of a gyro-TWT by dielectric loading through dispersion shaping[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1996, 43(1), 2290-2299.

## Small-signal theory analysis of dielectric-loaded gyro-TWT

YAN Ran, LOU Yong

(Institute of High Energy Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The small-signal theory of the gyro-TWT, a pinch-point analysis based on the theory of Briggs and Bers combining the cold analysis of the dielectric-loaded waveguide are employed to analysis the threshold current of the operating mode and critical oscillation lengths of the spurious mode under different load condition. The analysis concludes that the improvement of the dielectric loss, through altering the load condition, can enhance the threshold current and critical oscillation lengths. The cold analysis of the dielectric-loaded waveguide and a smooth waveguide dispersion relation is used to analyse the small signal gain of the dielectric-loaded gyro-TWT. Through numerical calculation, the analysis gives the gain-frequency response of a dielectric-loaded gyro-TWT.

**Key words:** HPM; Gyro-TWT; Absolute instability; Self-oscillation; Dielectric-loaded; Small-signal gain