

分布损耗对回旋行波放大器稳定性的影响

孙海燕^{1,2)†} 焦重庆^{1,2)} 罗积润¹⁾

1) 中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 2 月 28 日收到, 2008 年 5 月 23 日收到修改稿)

基于电磁模式的色散方程和回旋管非线性理论, 研究了损耗层厚度对回旋行波放大器注-波相互作用的影响. 结果表明, 合理选择损耗层电导率和厚度能够让期待的工作模式 TE_{01} 衰减较小, 而对应的竞争模式 TE_{21} 因损耗很大而更难以起振. 随厚度的增加, 放大带宽从两边向中间收缩变窄, 频带中间部分的输出功率会上升, 曲线更加平坦, 从而达到改善相互作用稳定性的目的.

关键词: 回旋行波放大器, 起振长度, 起振频率, 饱和功率

PACC: 4170, 5275

1. 引 言

回旋行波放大器 (gyro-TWA) 能在毫米和亚毫米波段产生高功率宽频带电磁辐射, 对高精度雷达等先进电子系统的发展有重大意义, 其研究在国际上很受重视^[1-3]. 波导型相互作用结构的采用, 是 gyro-TWA 具有宽频带优点的原因, 但也带来了更为复杂的稳定性问题, 如绝对不稳定性和回旋返波振荡 (gyro-BWO) 等. 人们提出了多种技术措施来抑制或避开这些振荡, 其中分布损耗电路是较常用的一种^[4-11]. 它通过加载在相互作用结构 (通常为圆波导) 内壁上的损耗层, 对高频场进行衰减, 提高它的起振电流, 从而达到改善放大器稳定性的目的. 目前, 回旋管相互作用计算中通常没有考虑损耗层厚度的影响, 然而实际上损耗层的厚度大都比较薄, 损耗层厚度的影响不可忽略, 因此研究损耗及损耗层厚度对回旋管注-波相互作用的影响具有重要意义.

本文基于电磁模式的色散方程和回旋管非线性理论, 分析 $K\alpha$ 波段 TE_{01} 回旋行波放大器相互作用电路加载不同厚度的损耗层对其起振长度、起振频率以及饱和输出功率与增益的影响, 损耗层加载对不同模式有不同影响, 进而影响到回旋管器件的稳定性、模式竞争和输出特性, 为放大器性能的优化和稳定性设计提供了参考依据.

2. 理论模型

对于均匀有损金属圆波导, 通常电磁波因波导壁 (或有损涂层) 的损耗而渗透其中的深度是有限的. 图 1 为均匀有损圆波导的横截面图. 图中区域 I 是半径为 a 的真空区 (ϵ_0, μ_0), 区域 II 是厚度为 t 的有限电导率损耗层 ($\epsilon_0, \mu_0, \sigma$), 层外为理想导体所包围. 波导有损耗时, 高频场沿波导轴向的传播可表示为 $\exp(i\omega t - \gamma z)$ 的形式, 其中

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

为传输常数, α 是衰减常数, β 是相位常数.

对图 1 所示模型, 文献 [12] 给出了其中电磁波模式的精确色散方程

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\epsilon_c}{k_{c\parallel}} \frac{Q'(k_{c\parallel} a)}{Q(k_{c\parallel} a)} - \frac{1}{k_{c\perp}} \frac{J'_m(k_{c\perp} a)}{J_m(k_{c\perp} a)} \right) \\ & \times \left(\frac{1}{k_{c\parallel}} \frac{P'(k_{c\parallel} a)}{P(k_{c\parallel} a)} - \frac{1}{k_{c\perp}} \frac{J'_m(k_{c\perp} a)}{J_m(k_{c\perp} a)} \right) \\ & + \left(\frac{1}{k_{c\perp}^2} - \frac{1}{k_{c\parallel}^2} \right)^2 \frac{\gamma^2 m^2}{k^2 a^2} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 m 为模式的角向波型指数, $J_m(x)$ 和 $N_m(x)$ 分别为第一和第二类 m 阶柱贝塞尔函数,

$$P(x) = J_m(x) N'_m(k_{c\parallel} r_w) - N_m(x) J'_m(k_{c\parallel} r_w),$$

$$Q(x) = J_m(x) N_m(k_{c\parallel} r_w) - N_m(x) J_m(k_{c\parallel} r_w),$$

$$a = r_w - t, k_{c\perp}^2 = k^2 + \gamma^2,$$

† E-mail: sunhaiyan80@gmail.com

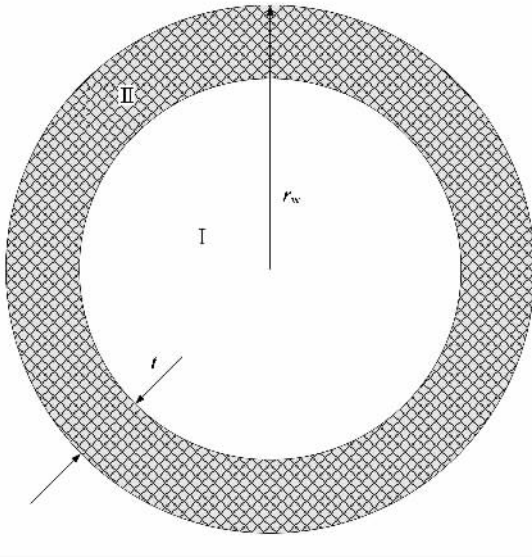


图1 分布损耗相互作用电路横截面图

$$k_{cII}^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_c + \gamma^2 = k_{cI}^2 - i\sigma\omega\mu_0, \\ k = \omega/c \quad \epsilon_c = 1 - i\sigma/(\omega\epsilon_0).$$

假定电子注和单模(TE_{mn})互作用,描述回旋波放大器的注-波相互作用场方程为

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + k_z^2\right)f(z) = i \frac{8|I_b|}{x_{mn}^2 K_{mn} \omega} \sum_{j=1}^n W_j \frac{\mathbf{v}_j(z) \cdot \mathbf{E}^*(r_j, \theta_j, t_j, z)}{\nu_{zj}(z) f^*(z)}, \quad (2)$$

其中 $f(z)$ 是轴向场分布函数, I_b 是电子注电流, x_{mn} 为 $J'_m(x) = 0$ 的第 n 个正根, \mathbf{E}^* 是 \mathbf{E} 的复共轭, W_j 是第 j 个电子的权重因子, \mathbf{v}_j 是第 j 个电子的速度, ν_{zj} 是第 j 个电子的轴向速度, 第 j 个电子横向坐标 r_j , θ_j 和时间坐标 t_j 都是 z 的方程. k_z 和 K_{mn} 表示为

$$k_z^2 = \left(\frac{x_{mn}}{r_w}\right)^2 \left(1 - (1+i)\frac{\delta}{r_w} \left(1 + \frac{m^2}{x_{mn}^2 - m^2} \frac{\omega^2}{\omega_c^2}\right)\right),$$

$$K_{mn} = J_{mn}^2(x_{mn}) \left(1 - \frac{m^2}{x_{mn}^2}\right).$$

考虑损耗层厚度时^[5],截止波数和传输常数可分别表示为

$$k_{cI} \rightarrow \left(\frac{x_{mn}}{r_w - t}\right) \left(1 - (1+i)\text{tar}((1-i)t/\delta)\right) \\ \times \frac{\delta}{r_w - t} \left(1 + \frac{m^2}{x_{mn}^2 - m^2} \frac{\omega^2}{\omega_c^2}\right), \quad (3)$$

$$\gamma^2 = k_{cI}^2 - k^2 = \gamma_0^2 - \frac{(1+i)k^2}{r_w - t} \delta \text{tar}((1-i)t/\delta). \quad (4)$$

此时,

$$k_z^2 = \left(\frac{x_{mn}}{r_w - t}\right)^2 \left(1 - (1+i)\text{tar}((1-i)t/\delta)\right) \\ \times \frac{\delta}{r_w - t} \left(1 + \frac{m^2}{x_{mn}^2 - m^2} \frac{\omega^2}{\omega_c^2}\right). \quad (5)$$

3. 结果与分析

我们以一个 TE₀₁ 模回旋波放大器为例来研究损耗层厚度对相互作用结果的影响.此放大器的工作参数为 $V = 100 \text{ kV}$, $\alpha = 1.0$, $s = 1$, $r_w = 5.7 \text{ mm}$, $r_c = 0.48 r_w$, $B_0 = 0.99 B_g$.对于 TE₀₁ 基波回旋波放大器而言,TE₂₁ 基波回旋返波振荡是最危险的竞争振荡之一^[8].图2给出了 TE₂₁ 回旋返波振荡的起振长度和起振频率随注电流的变化.虚线由不考虑厚度的方法计算得到,实线由目前考虑了厚度的方法计算得到.可以看出,随着厚度的增加,起振长度增长,但在达到一定厚度时($t = 0.12 \text{ mm}$)起振长度的增长变缓.还可以看出,考虑厚度所得的起振频率比不考虑厚度情况下的高.这是因为考虑厚度后得到的模式截止频率更高,波导色散曲线将上移,与电子回旋波色散曲线的交点上移,即振荡频率升高.

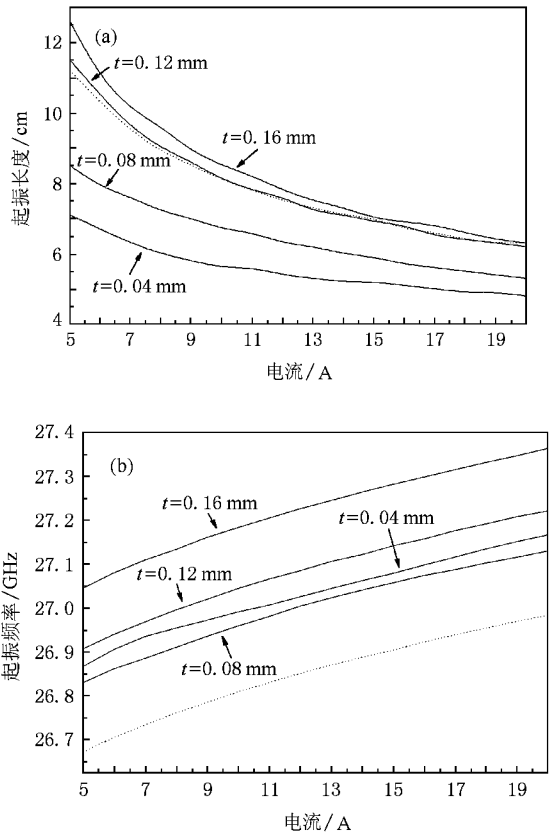


图2 TE₂₁模回旋返波振荡起振长度(a)与起振频率(b)

图 3 给出了衰减常数等值线图,可以看出,在给定电导率下,随着损耗层厚度的增加,衰减常数持续增加,随着损耗层厚度 t 的增加,波导有效半径 $(r_w - t)$ 减小,模式截止频率升高,衰减常数增大.还可以看出,在给定损耗层厚度下,随着电导率的增加,衰减常数可能增加、减小或基本不变.因此可以选择不同电导率和损耗层厚度来得到相同程度的衰减.

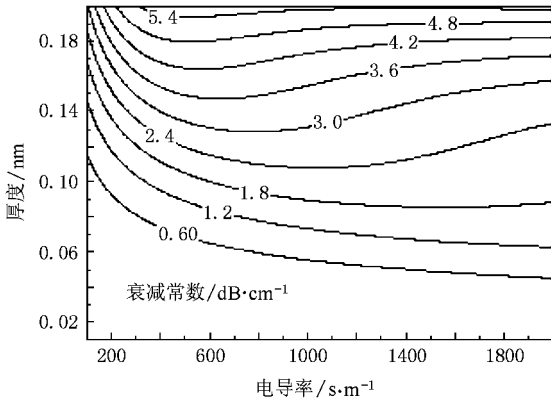


图 3 TE₀₁ 模衰减常数等值线图

200 S/m, 0.136 mm; b 500 S/m, 0.105 mm; c 1000 S/m, 0.09 mm; d 1500 S/m, 0.085 mm),使工作模式 TE₀₁ 模能够得到大致相同的衰减.图 4 给出了这四组不同的电导率和损耗层厚度下 TE₀₁ 模的冷衰减常数及放大器的线性增长率随频率的变化.可以看出,四种情况下的冷衰减常数比较接近,线性增长率也比较接近.也就是说,选取以上四组之一,对工作模式的影响差不多.然而,对于 TE₂₁ 返波振荡,四种损耗配置的影响就很不一样(如图 5 所示),可以看出,选择(a)组参数时,TE₂₁ 的起振长度最大,因而(a)组参数最有利于抑制 TE₂₁ 振荡.合理选择损耗层电导率和厚度能够让期待的工作模式衰减较小,而对应的竞争模式 TE₂₁ 因损耗很大而更难以起振.

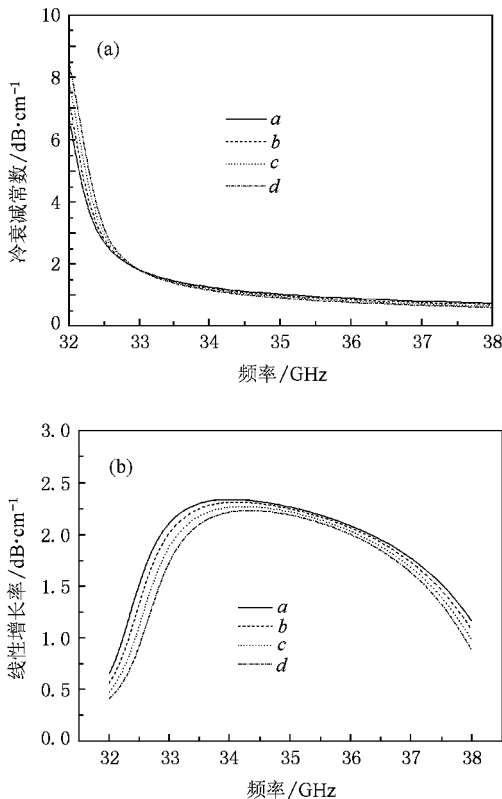


图 4 TE₀₁ 模的冷衰减常数(a)与线性增长率(b)

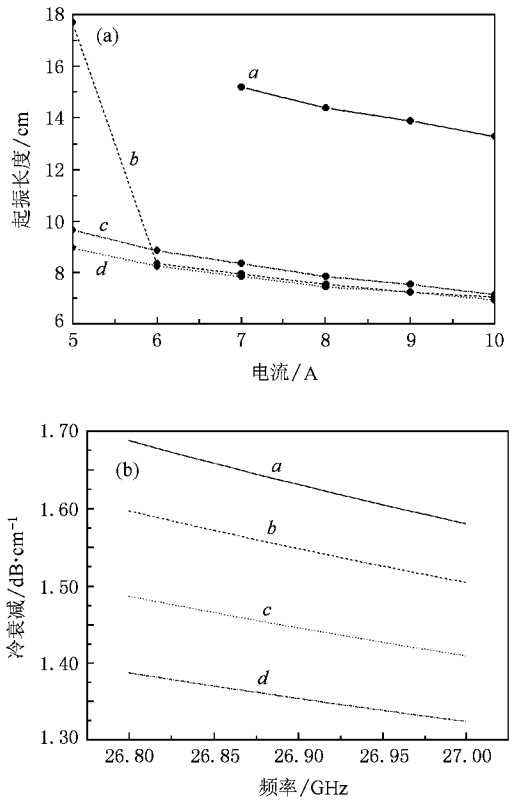


图 5 TE₂₁ 模回旋返波振荡起振长度(a)与冷衰减(b)

图 6 给出了不同厚度下 TE₀₁ 模回旋波放大器的饱和输出功率和增益随频率的变化曲线.图中虚线由不考虑厚度的方法得到,实线由目前考虑了厚度的方法得到.计算时取电路长 25 cm,其中前 20 cm 涂损耗,损耗层的电导率为 1000 S/m.可以看出,随厚度的增加,放大带宽从两边向中间收缩变窄.这是因为随厚度增加,模式的截止频率升高,从而模式色散曲线上移(或者说远离电子注色散曲线),导致它

我们选择四组不同的电导率和损耗层厚度(a

与电子色散曲线相接近的范围收缩变小.此外,还可看出,随厚度的增加,峰值功率、最大饱和增益也

都减小.但频带中间部分的输出功率会上升,曲线更加平坦.

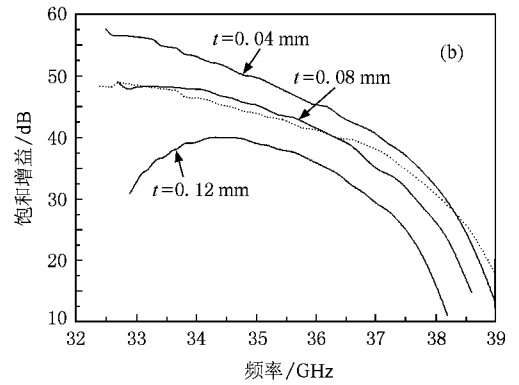
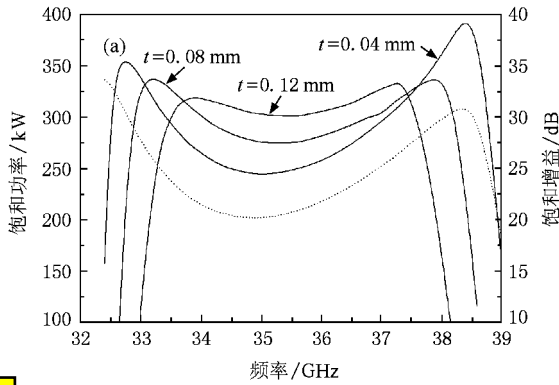


图6 不同损耗层厚度下 TE_{01} 模回旋波放大器的饱和输出功率(a)与增益(b)

4. 结 论

本文研究了损耗层厚度对回旋波放大器注-波相互作用的影响,模拟结果表明:合理选择损耗层电导率和厚度能够让期待的工作模式衰减较小,而对

应的竞争模式 TE_{21} 因损耗很大而更难以起振;随厚度的增加,放大带宽从两边向中间收缩变窄,峰值功率、最大饱和增益也都减小,频带中间部分的输出功率会上升,曲线更加平坦.损耗层加载对不同模式有不同影响,选择合适的参数可以抑制模式竞争,为放大器性能的优化和稳定性设计提供了参考依据.

- [1] Chu K R , Chen H Y , Hung C L 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 391
- [2] Yang Y Y , Ding W 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 227 (in Chinese) [杨蕴渊、丁 武 2000 物理学报 **49** 277]
- [3] Lai G J , Liu P K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 321 (in Chinese) [来国军、刘濮鲲 2006 物理学报 **55** 321]
- [4] Lai G J , Liu P K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4515 (in Chinese) [来国军、刘濮鲲 2007 物理学报 **56** 4515]
- [5] Jiao C Q , Luo J R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6360 (in Chinese) [焦重庆、罗积润 2006 物理学报 **55** 6360]
- [6] Song H H , McDermott D B , Hirata Y *et al* 2004 *Phys. Plasmas* **11**

2935

- [7] Nusinovich G S , Sinitzyn O V , Keser A 2001 *Phys. Plasma* **8** 3427
- [8] McDermott D B , Song H H , Hirata Y 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 894
- [9] Lin A T , Lin C C 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 931
- [10] Pershing D E , Nguyen K T , Calame J P 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 947
- [11] Li W , Gong M L , Wei Y Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 54
- [12] Harrington R F 1961 *Time Harmonic Electromagnetic Fields* (New York : McGraw-Hill Book Co.) pp219—221

Influence of distributed wall loss on stability of gyrotron traveling wave amplifier

Sun Hai-Yan^{1,2)†} Jiao Chong-Qing^{1,2)} Luo Ji-Run²⁾

¹ *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

² *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 28 February 2008 ; revised manuscript received 23 May 2008)

Abstract

Based on the dispersion equation of electromagnetic mode and the nonlinear theory of gyrotron traveling wave amplifier (gyro-TWA), the influence of the thickness of the lossy layer on beam-wave interaction in the gyro-TWA is studied. The simulation results show that large attenuation for competing mode TE_{21} can be realized while that of operating mode is small by appropriately choosing the thickness and conductivity of the lossy layer. The bandwidth decreases with the increase of the thickness, but the output power of the middle of the bandwidth increases and becomes more smooth. This is useful for improving the stability of gyro-TWA.

Keywords : gyrotron traveling wave amplifier, start-oscillation length, start-oscillation frequency, saturated power

PACC : 4170, 5275

† E-mail : sunhaiyan80@gmail.com