

损耗介质加载结构 Ka 波段 TE₀₁ 模回旋行波管放大器稳定性的分析

纵啸宇^{①②} 薛谦忠^① 杜朝海^{①②}

^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 100039)

摘要: 该文从分析损耗介质加载金属圆波导中电磁波传输特性出发,应用回旋行波管放大器小信号色散方程,研究损耗介质加载结构 TE₀₁ 模回旋行波管放大器绝对不稳定性振荡和回旋返波振荡对器件稳定性的影响。结果表明:损耗介质的加载,可以提高绝对不稳定性起振电流,提高的幅度依赖于工作磁场偏离饱和磁场的程度、电子束横纵速度比等;增加波导损耗介质加载的厚度,可以提高竞争模式的后波起振长度。合理选择波导的损耗层厚度、介电常数以及回旋行波管的工作电压、工作磁场和电子束横纵速度比,可以有效兼顾带宽和抑制不稳定性,保证回旋行波管放大器稳定工作。

关键词: 回旋行波管放大器; 损耗介质加载; 稳定性

中图分类号: TN128

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)06-1483-04

Stability Analysis of Ka-band TE₀₁-mode Gyrotron Traveling Wave Amplifier with Lossy Dielectric-Load Waveguide

Zong Xiao-yu^{①②} Xue Qian-zhong^① Du Chao-hai^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper, with the analysis of the propagation characteristics in a lossy cylindrical waveguide and using small-signal theoretical dispersion relation, presents study on the device stability with influence of the absolute instability and the backward wave oscillation in TE₀₁-mode lossy dielectric-load gyrotron traveling wave amplifier. The numerical results show that lossy dielectric-load can heighten the start oscillation current of absolute instability, and increase depends on the magnetic field strength and the perpendicular-to-parallel velocity ratio of the electrons; The thickness of the lossy waveguide increases the start oscillation length of backward wave oscillation. The combined appropriate selection of the lossy waveguide thickness, permittivity, voltage, the applied magnetic field and the velocity ratio can effectively give attention to bandwidth and instability to ensure the stable operation of the gyrotron traveling wave amplifier.

Key words: Gyrotron traveling wave amplifier; Lossy dielectric-load; Stability

1 引言

高功率相干毫米波源在高分辨率雷达、保密卫星通讯、电子对抗中等都有重大应用需求,并迅速发展成为微波真空电子学的前沿研究课题。回旋行波管(Gyro-TWT)是基于电子回旋脉塞(ECM)的毫米波源放大器,利用快波相互作用电路,具有其它真空器件不可比拟的高功率和宽频带工作能力。

然而,回旋行波管放大器的发展一直受到不稳定性困扰。在工作模式截止频率附近,由于模式色散引起的内部反馈,使得电磁波局域性的增长,在过强的注波耦合条件下,能够产生局部振荡,称为绝对不稳定性振荡。振荡对应的最

小束电流就是绝对不稳定性振荡的起振电流。当前向行进的电子束与模式的返波相位同步,构成能量反馈回路,在过强的注波耦合条件下,产生电磁振荡,称为回旋返波振荡。振荡对应的最小束电流就是回旋返波振荡的起振电流。采用分布式或集中式损耗结构可以抑制自激振荡以提高回旋行波管的稳定性^[1]。

本文首先分析损耗介质加载金属圆波导中电磁波的传输特性,然后研究损耗介质加载结构 Ka 波段 TE₀₁ 模回旋行波管放大器的稳定性,采用数值解法,求解绝对不稳定性振荡的起振电流和低阶竞争模式 TE₂₁, TE₁₁ 模的起振长度,并详细讨论材料损耗特性对回旋行波管放大器稳定性的影响,研究的结果具有广泛适用意义。

2 理论分析

损耗介质加载金属圆波导结构的横截面如图 1 所示, I

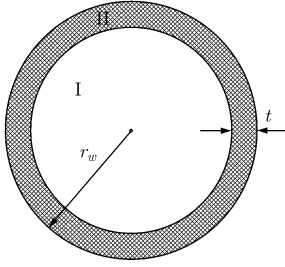


图1 涂敷损耗介质层圆波导的横截面图

区为真空区 (ϵ_0, μ_0), II区为损耗介质加载区 ($\epsilon_r \epsilon_0, \mu_0$, $\epsilon_r = \epsilon' - j(\epsilon'' + \sigma/w)$ 是介质的相对介电常数, σ 是介质材料电导率), 层外为理想导体, r_w 为波导半径, t 为损耗介质层的厚度, $a = r_w - t$ 为波导真空区域半径。对此模型, 可知角向均匀的 TE 和 TM 模都能单独存在, 利用博格尼斯函数法, 经过数学推导, 可以得出波导中 TE_{0n} 模式的本征方程^[2, 3]:

$$\frac{k_{\rho 1} f_4}{k_{\rho 2} f_3} = \frac{J'_0(k_{\rho 1} a)}{J_0(k_{\rho 1} a)} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} f_3 &= J_0(k_{\rho 2} a) Y'_0(k_{\rho 2} r_w) - Y_0(k_{\rho 2} a) J'_0(k_{\rho 2} r_w) \\ f_4 &= J'_0(k_{\rho 2} a) Y_0(k_{\rho 2} r_w) - Y'_0(k_{\rho 2} a) J_0(k_{\rho 2} r_w) \\ k_{\rho 1}^2 &= w^2 \mu_0 \epsilon_0 - k_z^2, \quad k_{\rho 2}^2 = w^2 \mu_0 \epsilon_r - k_z^2 \end{aligned}$$

$k_{\rho 1}$, $k_{\rho 2}$ 分别为真空区域和损耗介质层中的横向波数, $J_0(x)$, $Y_0(x)$ 分别为第一类和第二类零阶贝塞尔函数。

在同时考虑加载介质极化损耗和传导损耗的条件下, 本文中把损耗介质的相对介电常数表示为: $\epsilon_r = \epsilon_1 - j\epsilon_2$, 在损耗层厚度 t 和加载介质损耗变化的情况下, 利用数值解法求解式(1)的复变量超越方程, 能得到 TE_{0n} 模的复传播常数 $k_z = \beta - j\alpha$, β , α 分别为相位常数和衰减常数。

当给定回旋行波管工作参数的条件下, 利用式(1)冷场分析得出的复传播常数 k_z 来修正文献[4]中回旋行波管线性理论的色散方程, 得到损耗介质加载结构条件下的回旋行波管小信号色散方程 $D(w, k_z) = 0$ 的表达式^[4, 5]:

$$\begin{aligned} & (\beta_{mload}^2 - k_z^2)(\beta_{gyro} - k_z)^2 v_{z0}^2 + \frac{4N_b e^2}{m_e c^2 r_w^2 K_{mn} \gamma_0} \\ & \cdot \left[\beta_{\perp 0}^2 c^2 (k^2 - k_z^2) H_{sm} - v_{z0}^2 (\beta_{gyro} - k_z) (\omega / v_{z0} - k_z) T_{sm} \right. \\ & \left. + k_{mn} v_{\perp 0} v_{z0} (\beta_{gyro} - k_z) U_{sm} \right] = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} K_{mn} &= (1 - m^2 / x^2) J_m^2(x_{mn}), \quad H_{sm}(x, y) = J_{s-m}^2(x) J_s^2(y) \\ T_{sm}(x, y) &= 2H_{sm}(x, y) + y J_s'(y) \\ & \cdot \left\{ 2J_{s-m}^2(x) J_s''(y) - J_s(y) \left[\frac{1}{x} J_{s-m}(x) J_{s-m}'(x) \right. \right. \\ & \left. \left. + J_{s-m}'^2(x) + J_{s-m}(x) J_{s-m}''(x) \right] \right\} \\ U_{sm}(x, y) &= -(1/2) y J_s'(y) \{ J_{s-1}(y) [J_{s-m-1}^2(x) - J_{s-m}^2(x)] \\ & \left. + J_{s+1}(y) [J_{s-m+1}^2(x) - J_{s-m}^2(x)] \right\} \end{aligned}$$

β_{mload} 为冷波导色散方程的复传播常数, $\beta_{gyro} = (\omega - s\Omega_0) / v_{z0}$, N_b 为单位长度的电子数, c 是光速, $J_n(x)$ 是第一类 n 阶贝塞尔函数。

2.1 绝对不稳定性振荡的分析

文献中给出了绝对不稳定性振荡起振电流的定义和求解方法^[1, 6], 在损耗介质加载情况下, 考虑 T_{sm}, U_{sm} 的影响, 本文采用数值解法求解绝对不稳定性振荡的起振电流, 即保证回旋行波管其他工作参数不变, 逐渐增大束电流, 观察色散方程式(2)根的演变情况, 不考虑特殊情况, 重根出现就表明绝对不稳定性振荡发生。当加载介质的厚度 t 趋近于零时相应为无耗波导相互作用电路绝对不稳定性振荡的起振电流, 将计算的结果与文献中给出的计算绝对不稳定性振荡起振电流的解析结果进行了比较^[1, 6], 以验证数值方法的可靠性。

2.2 回旋返波振荡的分析

高阶 TE₀₁ 模回旋行波管放大器工作在基波谐振时, 可能存在低阶模式回旋返波振荡, 干扰放大器正常工作。由于损耗介质层的加载, 角向非均匀的 TE 和 TM 模不能单独存在, 混合模式的求解将会非常复杂。本文利用文献[7]的公式, 并且回旋返波振荡往往发生在模式的近截止频率区, 在损耗介质层合适的厚度范围内, 用 TE₂₁、TE₁₁ 模代替 HE₂₁、HE₁₁ 模进行回旋返波振荡的分析^[7, 8]。利用回旋行波管放大器中电磁波高频场轴向分布的表达式^[3, 4]:

$$f(z) = -i \sum_j \frac{f(0) N(k_{zj}) + f'(0) e^{-ik_{zj} z}}{D'(k_{zj})} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} N(k_z) &= i \frac{v_{z0}}{r_w^2 K_{mn}} \frac{4I_b T_{sm}(k_{mn} r_{c0}, k_{mn} r_{L0})}{I_A (\omega - s\Omega_0 - k_z v_{z0})} \\ & - i \frac{v_{\perp 0} k_z}{r_w^2 K_{mn}} \frac{4I_b H_{sm}(k_{mn} r_{c0}, k_{mn} r_{L0})}{I_A (\omega - s\Omega_0 - k_z v_{z0})^2} - ik_z \end{aligned}$$

I_b 是电子束电流, $I_A = 4\pi\epsilon_0 (m_0 c^3 / e) \gamma \beta_z$ 称为阿尔芬电流。

根据回旋返波振荡的边界条件^[3, 4]:

$$f'(0) = i\sqrt{(\omega/c)^2 - k_{mn}^2} f(0), \quad f(L) = 0 \quad (4)$$

其中 w 和 L 就是回旋返波振荡的起振频率和起振长度。文献[9]中给出了计算起振长度和频率的搜索方法。

3 数值计算和仿真模拟

首先分析图1冷波导模型的传输特性和衰减特性。图2(a), 2(b)给出了在损耗介质的相对介电常数为 $\epsilon_r = 5.5 - j3.5$, $r_w = 0.537$ cm, 损耗介质层厚度 t 与波导外半径 r_w 不同比值的条件下, TE₀₁ 模相位常数 β 和衰减常数 α 随频率的变化情况, 由图可知相位常数随频率的增加而增大, 衰减常数随频率的增加而减小; 随着厚度 t 的增大, 截止频率附近的衰减增强, 这有利于抑制发生于截止频率附近的绝对不稳定性振荡^[1, 6]。

图3(a), 3(b)给出了在频率 $f = 35$ GHz 时, TE₀₁ 模相位常数 β 和衰减常数 α 在不同的介电常数下随介质层厚度 t 与波导外半径 r_w 比值的变化的关系, 在损耗介质层厚度 t 不是很

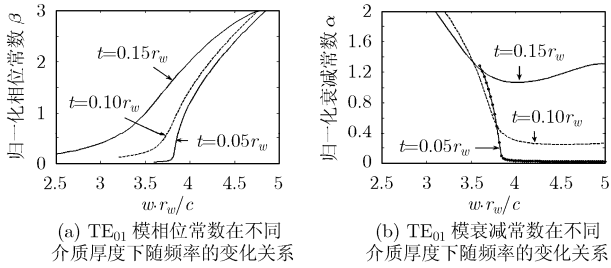


图2

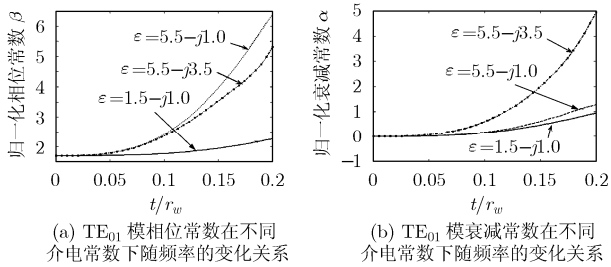


图3

大的情况下, 相位常数 β 和衰减常数 α 都随损耗介质层厚度 t 的增加而增大; 但相位常数随着介质损耗的增大而减小, 衰减常数因为损耗的增强而增大; 相同的介质损耗条件下, 介电常数的实部越大, 相位常数越大, 结合图2, 表明模式的相位常数随频率变化的曲线变得平直, 模式的色散程度变小, 这说明增大介质的介电常数有利于增加回旋行波管的注波相互作用带宽^[6]; 但损耗的增加会减小带宽, 却有利于增大截止频率附近的衰减, 抑制绝对不稳定性振荡^[4,6], 这说明需要选择合适介电常数和损耗的材料以兼顾回旋行波管放大器的稳定性和带宽。

下文回旋行波管放大器的参数采用 $V_0 = 65 \text{ kV}$, $I_0 = 35 \text{ A}$, $r_c = 0.48r_w$, 工作磁场和饱和磁场的比值 $B_0/B_g = 0.99$, 损耗介质的相对介电常数 $\epsilon_r = 5.5 - j3.5$ 。图4(a), 4(b)分别给出了当加载损耗介质层厚度 $t = 0.05r_w$ 时式(2)色散方程解的实部和虚部, 由图可以看出 $w \cdot r_w / c = 3.8$ 附近, k_{zr1} , k_{zr3} 和 k_{zi1} , k_{zi3} 分别处于临界相交状态, 即重根出现, 认为此时的束电流就是绝对不稳定性振荡的起振电流^[1,6]。

图5给出了数值方法求解的绝对不稳定性振荡的起振电流(曲线1, 曲线3)和无耗情况下解析表达式求解的结果(曲线2)。

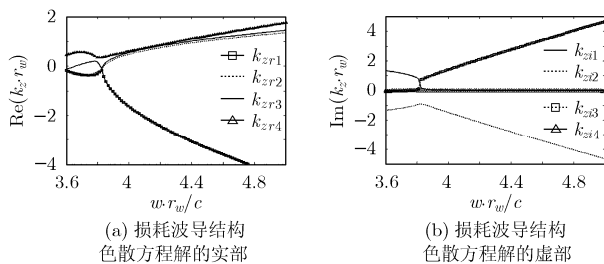


图4

曲线1是在损耗层厚度趋于零时数值计算的结果, 与曲线2的变化趋势吻合的很好, 验证了数值方法的可靠性。曲线3是在损耗层厚度 $t = 0.05r_w$ 时绝对不稳定性振荡的起振电流, 这说明损耗的加载可以提高器件绝对不稳定性振荡的起振电流。

回旋返波振荡是回旋行波管放大器稳定性的另一重要因素。图6给出了TE₂₁模回旋返波起振长度随回旋行波管放大器工作电压和电子束横纵速度比变化的关系。图7(a), 7(b)分别表示在不同的加载损耗介质厚度条件下TE₂₁, TE₁₁模的回旋返波起振长度。由图可以看出, TE₂₁模回旋返波起振长度小, 最容易起振; 增加损耗介质的加载厚度可以提高回旋返波起振长度, 增强器件的稳定性。结合图6, 图7可知, 相比回旋行波管放大器其他的工作参数, 损耗层厚度对回旋返波振荡起振长度的影响最大。

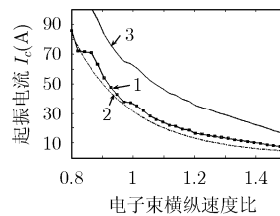


图5 绝对不稳定性振荡的起振电流随电子束横纵速度比的变化关系

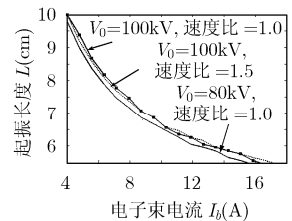
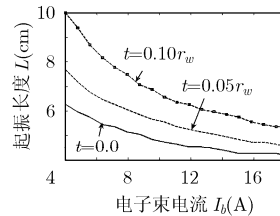
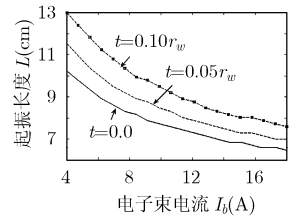


图6 TE₂₁模回旋返波起振长度在不同的参数下随电子束电流的变化关系



(a) TE₂₁模回旋返波起振长度在不同的介质厚度下随电子束电流的变化关系



(b) TE₁₁模回旋返波起振长度在不同的介质厚度下随电子束电流的变化关系

图7

4 结论

本文从损耗介质加载金属圆波导电磁波传输特性入手, 研究了损耗介质加载结构TE₀₁模回旋行波管放大器绝对不稳定性振荡和回旋返波振荡对器件稳定性的影响。分析表明: 增加损耗介质的加载厚度, 可以提高器件绝对不稳定性振荡的起振电流和回旋返波起振长度, 增强器件的稳定性; 增加加载介质的介电常数可以增加回旋行波管放大器的相互作用带宽。这说明合理地选择回旋行波管放大器相互作用回路的加载介质, 可以兼顾带宽以及增强相互作用回路的损耗特性提高器件的稳定性, 改善回旋行波管放大器的性能。

参考文献

[1] Chu K R and Lin A T. Gain and bandwidth of the gyro-TWT

- and CARM amplifiers. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1988, 16(2): 90-104.
- [2] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M](第二版), 北京: 电子工业出版社, 2001: 266-271.
- Zhang K Q and Li D J. *Electromagnetic Theory for Microwave and Optoelectronics*[M]. 2nd edition, Beijing: Electronics Industry Press, 2001: 266-271.
- [3] 焦重庆. 回旋行波管放大器的相关理论和数值模拟[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2006: 16-70.
- Jiao C Q. Theoretical study and numerical simulation of the gyrotron traveling wave amplifier [D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 16-70.
- [4] Kou C S, Wang Q S, McDermott D B, and Lin A T, *et al.* High-power harmonic Gyro-TWT's—part I: linear theory and oscillation study. *IEEE Trans. on Plasma*, 1992, 20(3): 155-162.
- [5] Rao S J, Jain P K, and Basu B N. Broadbanding of a Gyro-TWT by dielectric-loading through dispersion shaping. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1996, 43(12): 2290-2298.
- [6] 薛谦忠, 纵啸宇, 邹峰, 刘濮鲲. 具有分布损耗波导结构的回旋行波管放大器绝对不稳定性[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 263-267.
- Xue Q Z, Zong X Y, Zou F, and Liu P K. Absolute instability in gyrotron traveling wave amplifier with distributed loss waveguide[J]. *High Power and Particle Beams*, 2008, 20(2): 263-267.
- [7] 焦重庆, 罗积润. 有损金属圆波导中电磁波传输特性的研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(12): 6360-6367.
- Jiao C Q and Luo J R. Propagation of electromagnetic wave in a lossy cylindrical waveguide [J]. *Acta Phy. Sin.* 2006, 55(12): 6360-6367.
- [8] Du C H, Xue Q Z, and Liu P K. Loss-induced model transition in a dielectric-coated metal cylindrical waveguide for Gyro-Traveling-Wave-Tube applications. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, 29 (11): 346-349.
- [9] Kou C S. Starting oscillation conditions for gyrotron backward wave oscillators. *Phys. Plasmas*, 1994, 1(9): 3093-3099.
- 纵啸宇: 男, 1983年生, 硕士生, 研究方向为回旋行波管放大器的稳定性.
- 薛谦忠: 男, 1962年生, 博士生导师, 研究员, 长期从事微波毫米波器件、高功率微波技术等的研究.
- 杜朝海: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为高能微波与电子对抗技术.