

具有高稳定性的模式选择电路回旋行波管放大器

杜朝海^{①②} 刘濮鲲^① 薛谦忠^① 张世昌^①

^①(中国科学院高功率微波源与技术重点实验室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: 该文基于线性理论和自洽非线性理论,对具有模式选择特性的损耗陶瓷和金属环交替加载的 Ka 波段 TE₀₁ 模回旋行波管放大器进行理论建模和稳定性分析。分析表明损耗陶瓷加载波导具有模式选择特性,其传输特性类似于光滑圆波导;稳定性分析揭示了互作用系统自激振荡的内反馈机制。将理论分析与美国海军实验室的实验工作进行了比较,证明了该文理论模型的可靠性。该文的理论模型对回旋行波管放大器的设计具有一定的指导意义。

关键词: 回旋行波管; 损耗陶瓷; 模式选择; 稳定性

中图分类号: TN129

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1986-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00953

A Mode-selective-circuit Gyrotron-traveling-wave Amplifier with High Stability

Du Chao-hai^{①②} Liu Pu-kun^① Xue Qian-zhong^① Zhang Shi-chang^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: This paper devotes to modeling and the stability study of a Ka-band TE₀₁ mode gyrotron Traveling-Wave Tube (gyro-TWT) based on a modal selective circuit alternately loaded with lossy ceramic shells and metal rings. The linear theory and the self-consistent nonlinear theory are applied to analyze the stability of the equivalent interaction circuit. The study reveals that the lossy dielectric-loaded waveguide is with modal selective ability, and its propagation characteristics are similar to that of the circular empty waveguide. The internal feedback physics of the self-excited oscillations are revealed in the stability analysis. The consistency between the theoretical analysis and the experimental tests of American Naval Research Laboratory indicates the reliability of this study. The theoretical model in this paper brings guidance for future designing a gyro-TWT.

Key words: Gyro-TWT; Lossy ceramic; Modal selective; Stability

1 引言

具有高功率和宽频带特性的毫米波回旋行波管放大器在高分辨率成像雷达、电子对抗系统和通信等领域都有广阔的应用前景^[1]。基于相对论效应的电子回旋脉塞机制,回旋行波管采用螺旋前进的电子注与波导中的快波相互作用,通过横向换能,将电子注动能转化为高能微波,能够在很宽的频带内产生相干辐射。由于采用快波相互作用,在相同的工作频率下,回旋行波管与常规的电真空器件相比,能够产生更高的输出功率^[1-6]。上世纪末,中国台湾清华大学开展的 Ka 波段回旋行波管放大器实验采用

石墨涂层加载的互作用波导,获得 93 kW 的输出功率,70 dB 的超高增益和 8.6% 的 -3 dB 带宽^[2]。此后,美国海军实验室开展了 Ka 波段损耗陶瓷加载的回旋行波管实验,获得 137 kW 的峰值功率^[3,4]。在 W 波段,美国加州大学也开展了石墨涂层加载的回旋行波管实验,获得峰值功率高于 80 kW,带宽达到 2 GHz^[5]。美国麻省理工学院采用具有开放边界的共焦波导作为回旋行波管放大器的互作用电路,在 140 GHz 获得了 30 kW 的峰值功率^[6]。

近几十年来,回旋行波管在理论和实验上都取得了重要突破^[1]。但是互作用系统中复杂的寄生振荡限制了这类器件的性能,严重影响其实用化进程^[7-9]。寄生振荡作为回旋行波管放大器稳定性分析的核心问题主要由两种因素造成^[1]:

(1) 外反馈机制造成的振荡。互作用系统与输

2009-07-02 收到, 2010-04-06 改回

国家自然科学基金(60871051, 60871047, 60971072)资助课题

通信作者: 杜朝海 duchohai@gmail.com

入、输出耦合器的不匹配造成终端反射, 反射功率在互作用系统中被再生放大 (regenerative amplification)。当回路增益大于终端反射与系统衰减之和时, 互作用系统中激励起反射振荡^[2]。

(2)内反馈机制造成的振荡。互作用系统中, 当电流足够大, 注波耦合足够强时, 绝对不稳定性使噪声量级的扰动在局部增强, 沿前后两个方向扩散开来, 形成起自激振荡^[1,2,7,8]。

通过改善互作用系统与输入输出耦合器的匹配, 减小终端反射, 可以有效抑制反射振荡^[1]。但是内反馈机制引起的自激振荡是回旋行波管的固有特性。有效抑制自激振荡, 提高稳定性, 是回旋行波管的核心问题, 具有重要的理论意义和实际工程价值^[1,9-13]。理论和实验表明, 在互作用系统中引入恰当的损耗, 使得竞争模式受到强衰减, 而工作模式的注波相互作用能有效进行。通过该方式可以增强器件的稳定性^[1-5,7-12]。美国海军实验室开展的 Ka 波段 TE₀₁ 模回旋行波管放大器实验采用如图 1 所示的相互作用电路。其中损耗陶瓷能够有效吸收系统自激振荡功率, 提高器件的稳定性^[3,4]。但是损耗陶瓷的引入增加了系统的复杂度, 使理论分析变得困难^[4], 因此如何准确地构建该相互作用系统的物理模型成为问题的关键。本文根据损耗陶瓷加载互作用电路的高频特性, 采用边界阻抗法将损耗建模成为对工作模式的微扰^[2,7,8], 并利用线性理论和自洽非线性理论分析这种强损耗系统中的电子回旋脉塞注-波相互作用。通过对互作用系统中潜在的绝对不稳定性的分析, 揭示了各种自激振荡的内反馈机制。理论分析与美国海军实验室测试结果一致, 说明了理论和分析的可靠性。

2 理论模型

图 1 所示的损耗陶瓷和金属环交替加载的互作用电路能够提供多维的自由度, 以灵活地调整对各个模式的衰减。该特性对提高回旋行波管的稳定性和输出功率具有重要作用。文献[4]详细地阐述了该

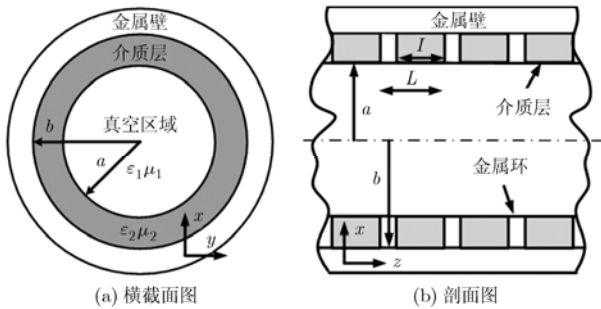


图 1 损耗陶瓷与金属环交替加载的相互作用电路

相互作用电路的设计方法。文献[11,12,14]所述的理论和方法可以分析图 1 所示的高频系统。研究表明在图 1 所示的高频系统中, 材料的损耗特性和特殊的波导结构使得存储于介质区域的高频能量相对较小, 且中空区域的场型分布与光滑圆波导中的模式相似。因此本文将采用边界阻抗法将损耗陶瓷加载波导等效成为统一的损耗波导^[2,7]。模式的横向波数通过式(1)确定。

$$k_{mn} = \frac{x_{mn}}{a} \left[1 - (1-i) \frac{\Delta}{a} \left(1 + \frac{m^2}{x_{mn}^2 - m^2} \right) \frac{\omega^2}{\omega_c^2} \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中 x_{mn} 为贝塞尔函数导函数 $J'_m(x_{mn}) = 0$ 的第 n 个根, Δ 为等效损耗波导壁的趋肤深度, ω_c 为工作模式的截止频率。

本文采用频域稳态理论分析系统中的注波互作用, 即求解系统能够稳定存在的状态, 而非时域的动态增长过程。对于该强损耗加载系统中的回旋电子脉塞互作用, 本文分析基于以下 4 点假设: (1)忽略电子注的空间电荷场; (2)忽略电子注对高频场的扰动; (3)忽略损耗层中的微波能量; (4)互作用系统中的高频场是一个前向波和一个反向波的线性叠加, $f(z) = f_+ e^{-jk_z z} + f_- e^{+jk_z z}$ 。基于假设(1), TE 模式电场的有源波动方程为

$$\frac{1}{j\omega\tilde{\mu}} \left(\nabla_{\perp}^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \mathbf{E}_{\perp} = \mathbf{J}_{\perp} \quad (2)$$

由假设(2)得到 $\nabla_{\perp}^2 \mathbf{E}_{\perp} + k_{mn}^2 \mathbf{E}_{\perp} = 0$ ^[2]。由此, 式(2)可以简化成为

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_z^2 \right) \text{Im}(\mathbf{E}_{\perp}) = \omega\tilde{\mu} \mathbf{J}_{\perp} \quad (3)$$

根据假设(3)对式(3)两边同时作用 $(\omega/2\pi) \int_0^{2\pi/\omega} dt$

$\int_0^a \int_0^{2\pi} \mathbf{E}_{\perp}^* / f^*(z) r dr d\phi$ 得到互作用方程为

$$\left(k_z^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) f(z) = j \frac{2}{\omega\tilde{\mu} f^*(z)} \frac{|k_{mn}|^2}{G_{mn}} \left(\frac{\omega}{2\pi} \right) \cdot \int_0^{2\pi/\omega} \int_0^a \int_0^{2\pi} (\mathbf{J}_{\perp} \cdot \mathbf{E}_{\perp}^*) r dr dt d\phi \quad (4)$$

其中结构因子 $G_{mn} = 2\pi \int_0^a [|m/k_{mn} r J_m(k_{mn} r)|^2 + |J'_m(k_{mn} r)|^2] r dr$ 。当 k_{mn} 为实数时, 结构因子为 $G_{mn} = \pi a^2 (1 - m^2/k_{mn}^2 a^2) J_m^2(k_{\perp 1} a)$, 此时式(4)退化为文献[2]所述的形式。

对于线性理论, 将求解线性化 Vlasov 方程得到电子注的一阶扰动分布函数代入式(4)可以得到互作用系统的注波耦合色散方程。结合电子注的扰

动分布函数, 对式(4)进行拉普拉斯变换可以得到均匀相互作用系统中高频场的轴向场型^[1]。对于非线性理论, 通过构建恰当的电子注分布函数, 将高频场在回旋电子的引导中心展开并代入式(4), 就可以得到注波互作用方程为

$$\left(k_z^2 + \frac{d^2}{dz^2}\right)f(z) = -2 \frac{|I_b| k_{mn}}{G_{mn}} \sum_{i=1}^N W_i \frac{v_i}{v_{zi}} \cdot \text{conj} \left[\sum_{s=-\infty}^{\infty} J'_s(k_{mn} r_{Li}) J_{m-s}(k_{mn} r_{ci}) e^{j\Lambda_i} \right] \quad (5)$$

其中相位因子 $\Lambda_i = \omega t_i - s\theta_i - (m-s)\phi_{ci}$, 电子注分布权因子 $\sum W_i = 1$ 。基于假设(4), 利用线性理论

和非线性理论分析系统的稳定性都遵循统一的边界条件^[1,2,8]: (1)放大特性分析中, 输入端口的前向波采用驱动功率初始化, 通过迭代求解输入端口的返向波, 使得相互作用系统的输出端口满足外向行波边界条件

$$f'_{\text{out}}(z) = -jk_z f_+ e^{-jk_z z} \quad (6)$$

(2)自激振荡分析中通过迭代求解输入端口的返向波边界条件

$$f'_{\text{in}}(z) = jk_z f_- e^{jk_z z} \quad (7)$$

使得相互作用系统在输出端口满足外向行波边界条件。

3 数值分析

本文的分析主要以美国海军实验的损耗陶瓷加载 Ka 波段 TE₀₁ 模回旋波管放大器为例^[3,4]。该放大器以损耗陶瓷和金属环交替加载的损耗波导作为线性段, 长度为 230 mm, 以光滑圆波导作为非线性段, 长度为 40 mm; 相互作用电路的尺寸为内半径 $a = 5.495 \text{ mm}$, 外半径 $b = 6.905 \text{ mm}$, 周期 $L = 11.5 \text{ mm}$, 介质段长度 $I = 10 \text{ mm}$, 损耗陶瓷采用 80%AlN - 20%SiC, 在 Ka 波段其相对介电常数为 $\epsilon_r = 11 - j2.2$; 工作电压 70 kV, 电流 10 A, 电子注横纵速度比 1, 磁场 1.26 T。文献[4]已经详细地阐述这种模式选择回路的设计方法。为了便于对比, 相互作用电路中的注波冷色散关系以图 2 所示的方式给出。图 2 仅给出光滑圆波导(非线性段)的返向波区域与损耗陶瓷加载段(线性段)的前向波区域的色散曲线, 相应地还给出了损耗介质加载波导的衰减特性。在光滑圆波导中工作模式是 TE₀₁ 模, 3 个潜在的竞争模式是 TE₁₁, TE₂₁, TE₀₂ 模。计算表明在损耗陶瓷加载波导的中空区域中, 模式的场型分布与光滑圆波导中的模式分布相似, 所以用 $\sim \text{TE}_{01}$, $\sim \text{TE}_{11}$, $\sim \text{TE}_{21}$, $\sim \text{TE}_{02}$ 标识损耗波导中的模式。从图 2 的色散曲线可以看到这两种波导的模式之间

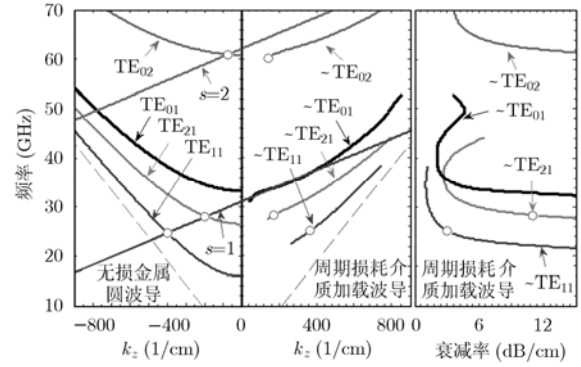


图 2 周期损耗介质加载波导与光滑波导之间的模式映射关系

具有一一映射关系。

表 1 给出了损耗陶瓷加载波导在某些关键频率上的特性。其中计算相对功率时, 忽略了金属环的影响, 即假定波导为无限均匀的损耗介质波导。该表说明在介质层中存在的微波能量相对少, 因此注波相互作用中忽略损耗材料中的微波能量是合理的, 而如何准确地考虑陶瓷引入的损耗成为分析相互作用系统的关键。金属环的引入对波导中空区域的场扰动小, 相互作用分析可以仅考虑中空区域的高频场, 通过边界阻抗法构造等效的均匀损耗相互作用电路。将图 2 中损耗加载波导的传输特性代入式(1)就可以得到等效传输系统中各个模式的等效趋肤深度。

表 1 损耗陶瓷加载波导的特性

模式	$\sim \text{TE}_{11}$	$\sim \text{TE}_{21}$	$\sim \text{TE}_{01}$	$\sim \text{TE}_{02}$
频率(GHz)	25.2	28.6	35	61.4
相对功率 (中空区域)	0.968	0.962	0.982	0.978
衰减(dB/cm)	2.93	9.8	3.44	15.3
等效趋肤深度(mm)	0.721	0.829	0.245	0.560

为了说明上述等效方法的可靠性, 图 3 给出了等效的均匀损耗相互作用系统的放大特性与美国海军实验室的测试数据的比较^[4]。计算和测试数据之间的差异主要由以下 3 方面引起^[3,4]: 实验报道的电子注轴向速度零散为 8%~10%, 计算采用 8.5%的速度零散; 计算忽略电子注引导中心离散; 计算假定系统的输入和输出回路完全匹配。综合考虑上述三方面原因和实验测试的不确定性, 可以认为图 3 的仿真结果是可靠的, 这也说明本文采用的等效方法的可靠性。

基于上述可靠性检验, 下文首先采用线性理论分析光滑波导中的前向波绝对不稳定性和返向波振荡^[2,8]。对于分布损耗加载回旋波管放大器, 各种自激振荡在线性段受到损耗的有效抑制, 而主要的

振荡功率集中在非线性段。因此,非线性段的稳定性决定了系统所能达到的功率量级。根据文献[8]提供的分析方法可以得当前工作参数下 TE_{01} 模的绝对不稳定性起振荡情况如图 4 所示, B_0 和 B_g 分别为工作磁场和相切磁场。由图可见,随磁场增加, TE_{01} 模的绝对不稳定性起振频率逐渐靠近截止频率,起振电流减小。图 5 给出了 TE_{01} 模的绝对不稳定性自激振荡的轴向功率分布。图 5 表明, TE_{01} 模的绝对不稳定性自激振荡可以分解成为一个前向波和一个反向波。由于绝对不稳定性自激振荡靠近波导模式的截止频率,前向波和反向波都与电子注同步,能够有效地进行互作用。电子注在相互作用系统的上游受到反向波的调制,受调制的电子注在前进的过程中同时与前向波、反向波交换能量,导致前向波和反向波往相反的方向增长,以此构成绝对不稳定性自激振荡的内反馈。合成场表现出一个功率零点,零点的上游端有净的反向波功率流,下游端有净的前向波功率流。合成场零点两端的功率场型表明了前向波与反向波的主次关系。图 5 表明前向波主导 TE_{01} 模绝对不稳定性自激振荡。

图 6 和图 7 给出了光滑波导中 TE_{01} 模绝对不稳定性振荡特性随相互作用参数的变化情况,其中 I_b 是注电流。当工作电流比起振电流大很多时,振荡频

率随电流的增加成近似线性的增加。在低电流条件下,振荡频率靠近波导模式的截止频率,反向波与回旋谐波能够更好地同步,这会导致反向波在绝对不稳定性自激振荡中的内反馈强度增强。经过复杂的前向波和反向波平衡过程,在某些磁场下系统的自激振荡长度随电流的减小而变短,如图 6 所示。该现象被称为自感应压缩现象,类似的行为在基波 TE_{11} 模回旋行波管放大器中也会发生[8]。图 8 给出反向波振荡的功率场型。从功率场型的零点可以看出反向波振荡中反向波占绝对优势。图 9 表明,注波色散曲线的交点离截止频率越远,则工作磁场对自激振荡起振长度的影响就越小。综合比较 4 个模式自激振荡的起振长度发现光滑波导中工作模式 TE_{01} 模起振长度最短,最容易起振。

自洽非线性理论可以综合考虑线性段和非线性段对系统稳定性的影响[1]。图 10 给出等效的损耗波导系统中 4 个自激振荡模式的轴向场幅度分布;为了便于对比,还给了石墨涂覆($\rho = 8e4\rho_{Cu}$)加载的相互作用系统的振荡情况。由图 10 可见,线性段 L_1 的损耗作用使得自激振荡的主要功率被限制在非线性段,文献[15]称这种振荡为局部振荡模式。对比分析图 5 和图 8 的功率场型和图 10 轴向幅度分布,可以发现局部振荡轴向基模(fundamental local axial

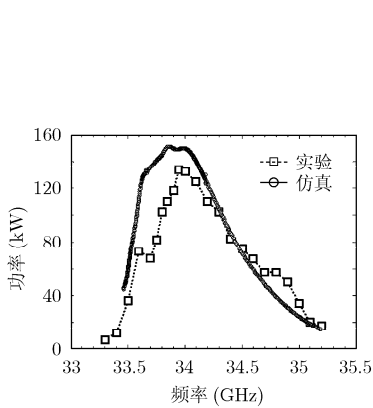


图 3 计算结果和美国海军实验室的测试结果的对比

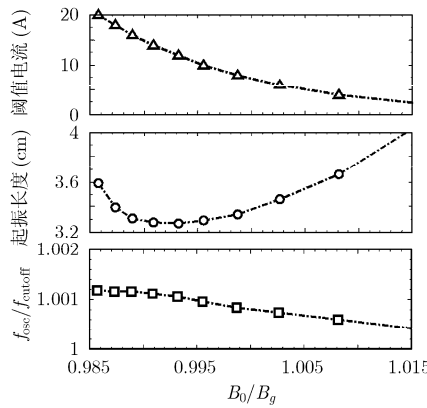


图 4 光滑圆波导 TE_{01} 模绝对不稳定性分析

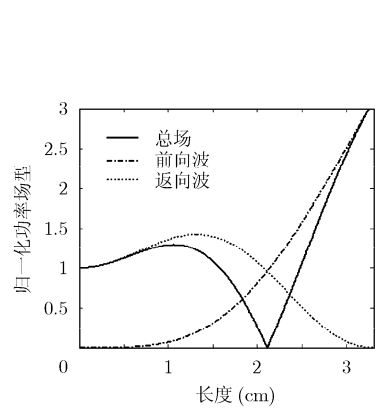


图 5 TE_{01} 模绝对不稳定性起振场型

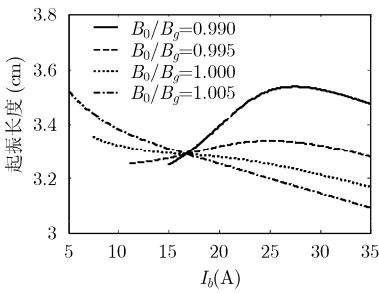


图 6 电流对 TE_{01} 模绝对不稳定性振荡长度的影响

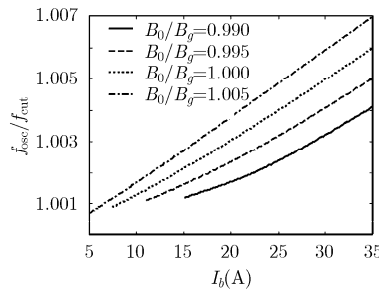


图 7 电流对 TE_{01} 模绝对不稳定性振荡频率的影响

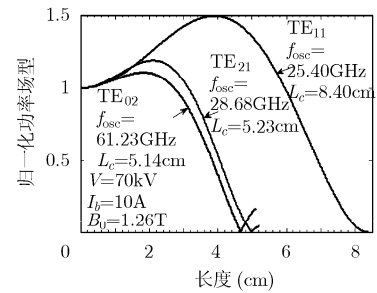


图 8 归一化反向波振荡的功率场型

mode)的行为与光滑波导系统的振荡特性一致。 TE_{01} 模绝对不稳定性自激振荡以前向波主导; TE_{02} 模、 TE_{02} 模和 TE_{11} 模反向波振荡以反向波主导,且反向波在线性段和非线性段的界面上产生反射使得非线性段的振荡场型出现明显的波动。损耗陶瓷加载相互作用系统的起振电流高于工作电流,所以器件具有高稳定性,这与美国海军实验室的测试结果一致。值得强调的是石墨加载的相互作用系统对 TE_{11} 模的衰减不够强,所以 TE_{11} 模自激振荡的起振电流只有8.02 A,限制放大器的输出功率水平。

分析工作参数和结构参数对系统稳定性的影响对回旋行波管放大器实验具有重要的指导作用。磁场和非线性段长度对相互作用系统起振电流的影响分别如图11和图12所示。增加磁场, TE_{01} 模的绝对不稳定性自激振荡频率靠近截止频率,反向波对自激振荡的反馈增强,所以起振电流减小,这与光滑波导系统的分析一致。 TE_{02} 模自激振荡随磁场增加,起振频率远离截止频率,起振电流增加; TE_{11} 模和 TE_{21} 模反向波振荡远离波导模式的截止频率,所以磁场对其起振电流的影响不明显。非线性段 L_2 的长度是系统优化设计的主要参数。结合图9与图12分析可以发现,由于光滑波导系统中 TE_{11} 模的起振长度最长,所以 L_2 对 TE_{11} 模的影响相对较弱;而

当 $L_2 > 5.2$ cm, TE_{21} 和 TE_{02} 模的起振电流都小于10 A,相应地 TE_{01} 模的起振电流也会十分靠近10 A。在实际器件中,系统的稳定性阈值电流和工作电流之间应该有充足的余量,以保证器件的高稳定性。

图13和图14给出放大器在电子注速度零散3%的条件下的放大特性。图13给出33.59 GHz时系统在3 W的驱动功率条件下可以输出223 kW的峰值功率(效率约32%)。图中可以看到系统在稳定放大状态下,反向波在非线性段反向增长,在线性段的末端达到极大值,进入线性段被严重抑制,其幅度比前向波的幅度低约2个数量级;而前向波沿电子注前进的方向被稳定放大。功率损耗主要集中在损耗段(线性段)的末端,这决定了基于分布损耗技术的回旋行波管放大器的平均功率水平。从图14可见,在电子注速度零散3%条件下,器件高于150 kW的输出带宽将达到3 GHz,增益在40~50 dB之间。对比图14和美国海军实验室的测试结果可以发现提高电子注速度的均一性是提高器件性能的主要手段。

4 结论

本文对具有模式选择特性的损耗陶瓷加载基波

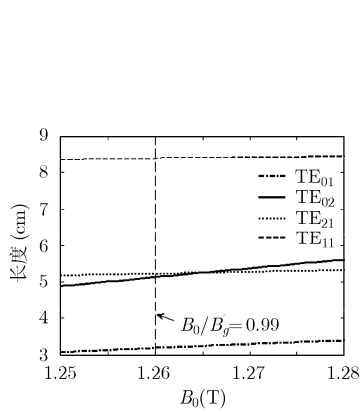


图9 磁场对自激振荡起振长度的影响

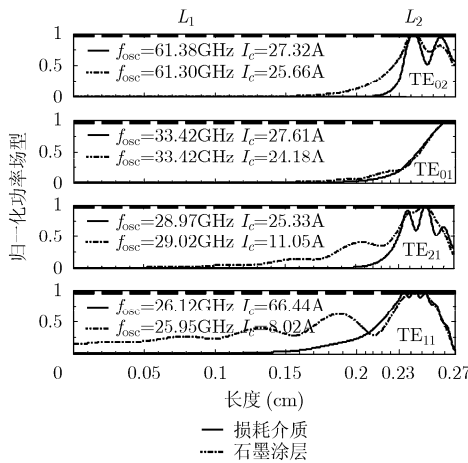


图10 相互作用系统自激振荡的归一化轴向场幅度分布

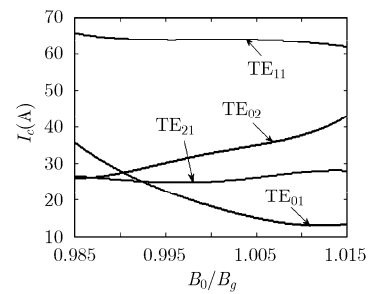


图11 磁场对起振电流的影响

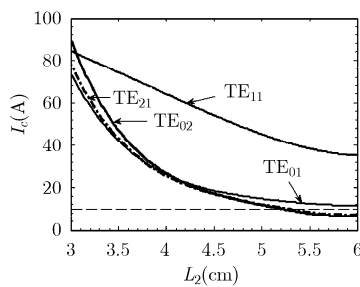


图12 非线性段对起振电流的影响

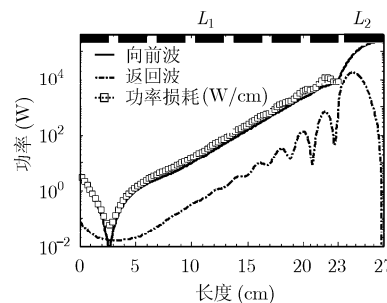


图13 相互作用系统稳定放大功率场型

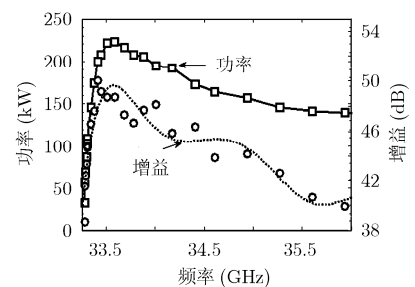


图14 相互作用系统的饱和带宽

TE₀₁模回旋行波管放大器进行了系统的稳定性分析。通过边界阻抗法, 将损耗陶瓷加载相互作用电路等效成为均匀的损耗波导, 这对器件的性能可以做出合理的估计。本文采用统一的频域稳态的观点分析前向波绝对不稳定性及返向波振荡。分析首先揭示了自激振荡的内反馈机制, 即自激振荡可以分解成为两个波, 即一个前向波和一个返向波。处于前向波区域的绝对不稳定性自激振荡中前向波占主导, 而处于返向波区域的自激振荡中返向波占绝对优势。在Ka波段基于损耗陶瓷相互作用电路的回旋行波管放大器能够有效抑制各种自激振荡, 器件具有高的稳定性阈值电流, 理论分析与美国海军实验室的测试结果一致, 说明本文分析的可靠性。分析发现调整磁场和非线性段的长度对器件的稳定性具有重要的影响, 减小电子注的速度零散可以显著提高器件性能。

参考文献

- [1] Chu K R. The electron cyclotron maser[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(2): 489-540.
- [2] Chu K R and Chen H Y, *et al.* Theory and experiment of ultrahigh-gain gyrotron traveling wave amplifier[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, 27(2): 391-404.
- [3] Garven M and Calame J P, *et al.* A gyrotron-traveling-wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(3): 885-893.
- [4] Calame J P and Garven M, *et al.* Gyrotron-traveling wave-tube circuit based on lossy ceramics[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, 49(8): 1469-1477.
- [5] Song H H and McDermott D B, *et al.* Theory and experiment of a 94GHz gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(5): 2935-2941.
- [6] Sirigiri J R, Shapiro M A, and Temkin R J. High-power 140-GHz quasioptical gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(25): 258-302.
- [7] 纵啸宇, 薛谦忠, 杜朝海. 损耗介质加载Ka波段TE₀₁模回旋行波管放大器稳定性的分析[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(6): 1483-1486.
Zong Xiao-yu, Xue Qian-zhong, and Du Chao-hai. Stability study of a Ka-band lossy dielectric-loaded TE₀₁ mode gyrotron traveling-wave-tube amplifier[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1483-1486.
- [8] Du Chao-hai, Liu Pu-kun, and Xue Qian-zhong, *et al.* Effect of a backward wave on the stability of an ultrahigh gain gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(123107): 1-8.
- [9] Pershing D E and Nguyen K T, *et al.* A TE₁₁ Ka-band gyro-TWT amplifier with high-average power compatible distributed loss[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, 32(3): 947-956.
- [10] Nguyen K T and Calame J P, *et al.* Design of a Ka-band gyro-TWT for radar applications[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(1): 108-115.
- [11] Du Chao-hai, Xue Qian-zhong, and Liu Pu-kun. Loss-induced modal transition in a dielectric-coated metal cylindrical waveguide for gyro-traveling-wave-tube applications[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, 29(11): 1256-1258.
- [12] Du Chao-hai, Xue Qian-zhong, and Liu Pu-kun, *et al.* Modal transition and reduction in a lossy dielectric-coated waveguide for gyrotron-traveling-wave tube amplifier applications[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(5): 839-845.
- [13] 殷瑞剑, 刘濮鲲. 3mm回旋行波放大器单阳极磁控注入式电子枪的设计[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(6): 1507-1510.
Yin Rui-jian and Liu Pu-kun. Design of a single-anode magnetron-injected-gun for the 3mm GYRO-TWT amplifiers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1507-1510.
- [14] Tigelis I G, Vomvoridis J L, and Tzima S. High-frequency electromagnetic modes in a dielectric-ring loaded beam tunnel[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998, 26(3): 922-930.
- [15] Tsai W C and Chang T H, *et al.* Absolute instability in a high-order-mode gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physical Review E*, 2004, 70, 056402.

杜朝海: 男, 1982年生, 博士生, 从事微波与毫米波技术的研究。

刘濮鲲: 男, 1965年生, 研究员, 从事高功率微波器件与技术的研究。

薛谦忠: 男, 1962年生, 研究员, 从事计算电磁学、天线、THz器件和高功率微波器件与技术等方面的研究。

张世昌: 男, 1939年生, 研究员, 从事高功率微波器件与技术的研究。