

具有高稳定性的超高增益回旋行波管放大器

杜朝海^{①②} 刘濮鲲^① 薛谦忠^① 徐寿喜^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: 该文结合线性理论和自洽非线性理论对 Ka 波段 TE₁₁ 模超高增益回旋行波管放大器的稳定性进行了研究。研究揭示了回旋行波管中前向波绝对不稳定性与返向波振荡之间的区别,以及分布损耗技术对这两种自激振荡的抑制作用,并首次提出通过渐变磁场技术来提高系统的稳定性。基于该分析方法设计的 Ka 波段超高增益回旋行波管,采用电压 100 kV, 电流 7 A, 速度零散 5% 的电子注,获得了 -1 dB 的饱和功率带宽约 5 GHz, 最高增益约 80 dB。

关键词: 回旋行波管; 毫米波; 稳定性

中图分类号: TN129

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)07-1717-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00880

An Ultra-high Gain Gyrotron Traveling-Wave Amplifier with High Stability

Du Chao-hai^{①②} Liu Pu-kun^① Xue Qian-zhong^① Xu Shou-xi^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 the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The linear theory together with the self-consistent nonlinear theory are applied to systematically study the stability of a Ka-band TE₁₁ mode ultra-high gain gyrotron Traveling-Wave Amplifier (gyro-TWA). The analysis reveals the differences between the forward-wave absolute instability and the backward-wave oscillation, as well as the suppressing effect to these self-excited oscillations by using distributed loss technique. Using properly down-tapering the magnetic in the nonlinear stage to improve the stability of the system is proposed for the first time. Based on the analysis, a Ka-band TE₁₁ mode gyro-TWA with ultra-high gain ability is designed, which adopts an electron beam with voltage of 100 kV, current of 7 A, velocity spread of 5%, and is capable of obtaining the -1 dB saturated bandwidth about 5 GHz and the highest gain about 80dB.

Key words: Gyro-TWT; Millimeter wave; Stability

1 引言

回旋行波管放大器以其高功率、宽频带等显著特点成为最具有发展潜力的高功率毫米波相干辐射源,在雷达、电子对抗、定向能武器、高数据率通信、精确制导、材料处理和高能粒子加速器等领域有着广泛的应用前景^[1-3]。回旋行波管放大器采用相对论效应的电子回旋脉塞原理工作,在毫米波段能够产生百千瓦量级的峰值输出功率,这使其成为下一代高分辨率成像雷达首选的高功率末级放大器^[4]。但是由于受到稳定性问题的限制,该器件的性能与理论预测值之间还有较大的差距,至今没有实

用化^[1-4]。自激振荡是回旋行波管稳定性问题的核心,它限制了器件的工作电流,影响其功率和效率的提升^[5,6]。近年来,国际上开展了一系列实验,研究高效稳定的回旋行波管放大器互作用系统。曾先后采用过截断互作用电路^[7]、开槽互作用电路^[8]、分布损耗加载互作用电路^[1-3]、周期损耗陶瓷加载互作用电路^[4,9]、螺旋波纹波导互作用电路^[10]等一系列新颖的互作用电路结构,并取得了丰硕的研究成果。其中,中国台湾清华大学报道的 Ka 波段分布损耗加载的 TE₁₁ 模回旋行波管放大器采用 100 kV 电压, 3.5 A 电流工作,获得了 93 kW 的峰值输出功率和 70 dB 的超高增益^[1-3]。该实验在回旋行波管的发展史上具有里程碑意义,对器件的实用化具有重要的推动作用,引发了国际上最近一轮回旋行波管的研究热潮^[4-6,9,11-15]。

2009-06-16 收到, 2010-02-04 改回

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

通信作者: 杜朝海 duchaohai@gmail.com

超高增益回旋行波管放大器可以采用固态放大器作为前级驱动，不仅可以降低系统的复杂程度，而且可以提高系统的可靠性，这对雷达系的应用具有重要意义^[1,3,9-15]。本文基于线性理论和自洽非线性理论详细地分析了分布损耗相互作用电路对自激振荡的抑制过程。研究揭示了基波 TE₁₁ 模回旋行波管中前向波绝对不稳定性 and 反向波振荡间的差异。仿真分析发现缩短非线性段和采用磁场渐变技术都可以进一步提高器件的稳定性。基于稳定性分析所设计的超高增益回旋行波管放大器具有高稳定性。这对我国发展回旋行波管放大器具有参考作用。

2 稳定性分析

Ka 波段基波 TE₁₁ 模回旋行波管放大器的注波冷色散关系如图 1 所示。该相互作用系统主要存在两种自激振荡：在过大的工作电流下，回旋基波与工作模式 TE₁₁ 模耦合过强，在截止频率附近容易产生绝对不稳定性振荡；二次谐波与 TE₂₁ 模在反向波区域相交，在交点附件容易激励起反向波振荡^[1,9]。自激振荡会抑制工作主模的正常工作，影响驱动功率正常放大，限制器件的输出功率和增益特性。台湾清华大学朱国瑞教授等人的研究表明，相互作用系统中加载适当的分布损耗能够有效抑制自激振荡，提高系统的稳定性阈值电流^[1-3]。图 2 给出线性理论计算得到的 10 A 工作条件下，分布损耗加载相互作用系统中，损耗对起振长度和起振频率 f_{osc} (采用模式的截止频率 f_{cut} 归一化) 的影响。当损耗特性达到某种程度时，自激振荡的起振长度会呈指数增加，这表明该损耗强度能够有效抑制相应的自激振荡。图 2 表明当所加载的损耗达到 $\rho = 2 \times 10^4 \rho_{cu}$ (ρ_{cu} 为铜的电阻率) 时，所有的自激振荡都能被有效抑制。为了使器件具有高稳定性，线性段的分布损耗加载强度设计为 $\rho = 3 \times 10^4 \rho_{cu}$ 。

对于实际的相互作用系统，为了同时考虑线性段和非线性段对系统稳定性的影响必须采用非线性理

论进行分析。非线性理论计算得到的两种自激振荡的场型分布和起振电流 I_{st} 如图 3 所示。两种自激振荡在线性段的场幅度很低，说明分布损耗能够有效抑制自激振荡，使其主要功率集中在非线性段。在非线性段，两种自激振荡的轴向场型有明显的区别。每个自激振荡可以分解成为一个前向波和一个反向波分量。TE₁₁ 模绝对不稳定性以前向波为主导，总场沿电子注前进的方向增强；而 TE₂₁ 模反向波振荡以反向波主导，总场增强的方向与电子注前进的方向相反。图 3 表明过长的非线性段使得两种自激振荡的阈值电流都很低，这限制了器件的输出功率量级。因此必须引入附加的稳定性机制，进一步提高器件的高稳定性。

由于自激振荡的主要功率集中在非线性段，因此提高非线性段的稳定性是提高系统稳定性的关键。图 4 给出了非线性段长度对系统稳定性的影响。缩短非线性段长度使得自激振荡的有效振荡区域变短，振荡频率和阈值电流都相应地提高。但是过短的非线性段会增加分布损耗段的耗散功率，限制器件的平均功率水平。综合考虑，非线性段取为 3.6 cm。此时，TE₁₁ 模绝对不稳定性和 TE₂₁ 模反向波振荡的阈值电流分别为 6.3 A 和 14.8 A。

非线性段局部下渐变工作磁场对相互作用系统稳定性的影响如图 5 所示。由图可见，非线性段局部下渐变工作磁场可以明显地影响相互作用系统的稳定性。对于 TE₁₁ 模绝对不稳定性，下渐变磁场使注波同步变得困难，注波耦合强度变弱，自激振荡阈值电流相应地提高。而对于 TE₂₁ 模反向波振荡，下渐变磁场使得二次谐波与 TE₂₁ 模的交点更加靠近截止频率，注波耦合强度略有提高，器件的阈值电流有所降低。另一方面，对于工作模式 TE₁₁ 模的放大特性来讲，电子注在线性段获得充分的预群聚，适当地下渐变非线性段的磁场可以使得预群聚后的电子注在交换能量的同时持续地与工作模式同步，提

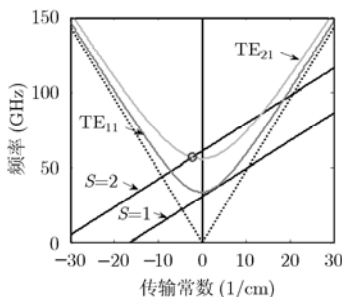


图 1 TE₁₁ 基波回旋行波管放大器的冷色散关系

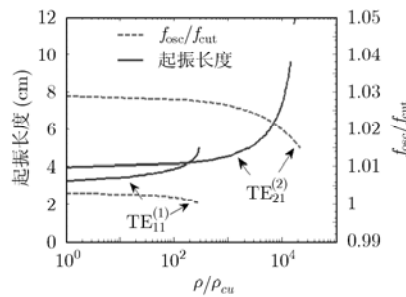


图 2 分布损耗对绝对自激振荡起振长度和频率的影响

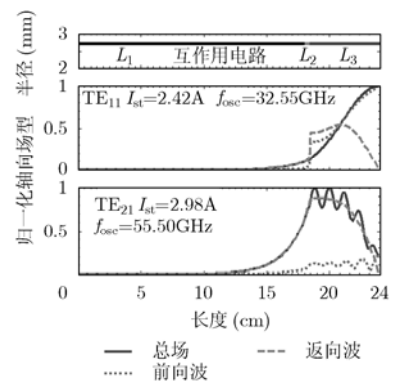


图 3 两种自激振荡的轴向场型分布

高相互作用系统的效率。综合考虑多方面的因素，确定非线性段的下渐变磁场为相切磁场的 97%。此时，系统自激振荡的最低阈值电流为 12.5 A。在该条件下，选择器件工作电流为 7 A。工作电流和自激振荡阈值电流之间有足够的余量，保证器件具有高稳定性。

3 放大特性

在实际的回旋行波管放大器中，通常会适当地增大输入端的波导半径，便于宽带输入耦合器的设计。图 6 给出相互作用电路的最终结构、功率场型和功率损耗率。相互作用系统最终的设计参数为：电压 100 kV，电流 7 A，磁场 1.27 T，波导半径 2.7 mm，注引导中心半径 0.95 mm，注横纵速度比 1.0，损耗材料等效电阻率 $\rho = 3 \times 10^4 \rho_{cu}$ ，损耗段长度 17.6 mm，损耗过渡段 4 mm，非线性段 3.6 mm。在 5% 速度零散条件下，采用 4.5 mW 驱动在频率 33.51 GHz 上获得了约 29.2% 的相互作用效率，峰值输出功率 204 kW。该频率上，整个分布损耗段的耗散功率积分等于电子注能量的 0.76%，这保证系统的高平均功率工作能力。在 5 mW 等激励条件下，电子注的速度零散对相互作用系统的输出功率的影响如图 7 所示。随速度零散增加，高频段的放大特性明显变差。采用速度零散 5% 的电子注和 5 mW 的驱动功率可以获得 -1 dB 的稳定工作带宽约 1.2 GHz。超高增益的回旋行波管放大器增益的线性特性如图 8 所

示。该图表明工作频带内器件的增益具有较好的线性特性。低频端增益较高，高频端增益较低。在电子注 5% 速度零散条件下，相互作用系统的饱和输出功率如图 9 所示。该放大器饱和输出功率的 -1 dB 带宽约 5 GHz。

4 结论

研究表明基波 TE₁₁ 模回旋行波管放大器主要受到两种横向竞争模式的影响，即基波 TE₁₁ 模绝对不稳定性、二次谐波 TE₂₁ 模返向波振荡。可以通过以下 3 种方法提高系统的稳定性：在相互作用系统的线性段波导内壁恰当地加载分布损耗；缩短非线性段的长度；适当地下渐变输出段的磁场。基于这些方法设计的超高增益回旋行波管放大器自激振荡的最低起振电流为 12.5 A。因此当工作电流为 7 A 时，放大器具有高稳定性。在 100 kV 注电压和 5% 注速度零散条件下，器件获得 204 kW 的饱和输出功率，最高相互作用效率约 29.2%，1 dB 饱和输出功率带宽约 5 GHz。超高增益回旋行波管放大器，可以采用固态放大器作为前级驱动，这可以简化系统结构，增强系统可靠性，降低成本，促进该器件的实用化。但是回旋行波管制管过程会面临加工精度、装配误差、不良对中引起的电子注偏心等问题，这些问题都会降低系统性能。因此，获得高性能的超高增益回旋行波管需要整个工艺流程的精密配合。

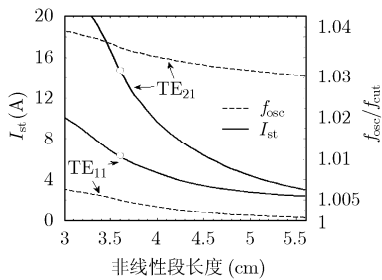


图 4 非线性段长度对自激振荡起振长度和频率的影响

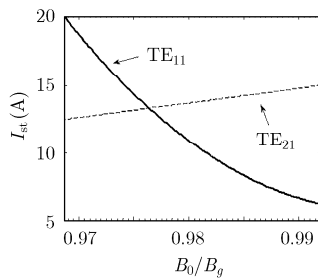


图 5 渐变非线性段磁场 B_0 / B_g 对自激振荡的影响

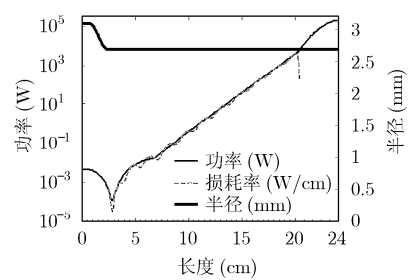


图 6 相互作用系统结构和功率场型

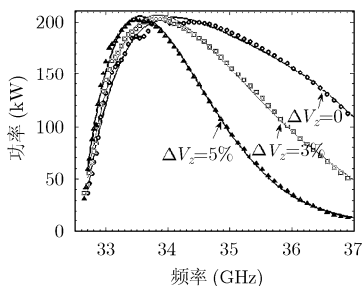


图 7 速度零散对输出功率的影响

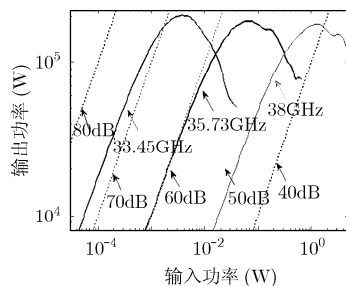


图 8 带内增益的线性特性

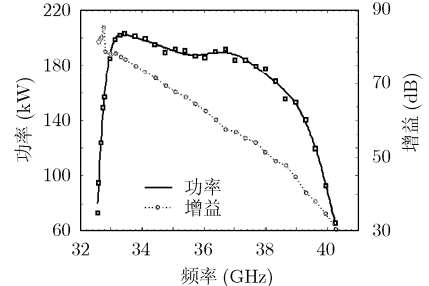


图 9 饱和输出功率以及增益

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] Chu K R and Chen H Y, *et al.* Ultrahigh gain gyrotron traveling wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(21): 4760-4763.
- [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] 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, 25(5): 1483-1486.
- [6] 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.
- [7] Park G S, Park S Y, and Kyser R H, *et al.* Broadband operation of a Ka-band tapered gyro-traveling wave amplifier[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1994, 22(5): 536-543.
- [8] Chong C K, McDermott D B, Luhmann, and N C Jr, *et al.* Large-signal operation of a third-harmonic slotted gyro-TWT amplifier[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1998, 26(3): 500-507.
- [9] 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.
- [10] Bratman V L, Cross A W, and Denisov G G, *et al.* High-gain wide-band gyrotron traveling wave amplifier with a helically corrugated waveguide[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(12): 2746-2749.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- 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, 从事高功率微波器件与技术的研究.