

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0016 - 05

Ka 波段三段损耗波导结构二次谐波回旋行波放大器的模拟与设计

殷瑞剑^{1, 2}, 刘濮鲲¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 研究了一种具有多段损耗波导结构的 8mm 二次谐波回旋行波放大器. 通过稳定性分析, 确定了放大器的工作参数, 并对其注-波相互作用过程进行了详细的分析和讨论, 完成了工作在 35GHz TE₀₂ 模二次谐波三段损耗波导结构回旋行波放大器的优化设计. 非线性模拟结果表明, 该相互作用结构能有效地抑制寄生模式, 在速度零散为 3% 的情况下, 其峰值功率为 125kW、增益为 39dB、3dB 带宽为 4.3%.

关键词: Ka 波段; 多段损耗波导; 谐波; 回旋行波放大器

中图分类号: TN129 **文献标识码:** A

PRIMARY DESIGN OF A Ka-BAND THREE STAGE DISTRIBUTED LOSS SECOND-HARMONIC GYROTRON TRAVELING WAVE AMPLIFIER

YIN Rui-Jian^{1,2}, LIU Pu-Kun¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A Ka-band second-harmonic gyrotron traveling wave amplifier with multi-stage loss waveguide was studied. By stability analysis, the parameters were determined. A 35GHz TE₀₂ mode second harmonic three-stage distributed-loss gyro-TWT was presented and the optimized design was carried out. Then the nonlinear analysis was presented to study the interaction between electron beam and wave. The results indicate that the interaction structure can suppress the parasitic modes effectively, meanwhile, 125kW output power and 39dB gain are obtained when the beam velocity spread is 3%. The 3dB bandwidth is 4.3%.

Key words: Ka-band; multi-stage loss waveguide; harmonic wave; gyrotron traveling wave amplifier

引言

高功率毫米波因具有波束窄、能量密度高、抗干扰能力强和分辨率高等优点, 在毫米波雷达、电子对抗、精确制导、通讯和受控热核聚变等领域有着广泛的应用前景. 回旋行波放大器因具有比其它回旋器件更高的带宽和效率而倍受瞩目. 经过几十年的发展, 回旋行波放大器在理论和实践上均取得了很大的进步, 但其实际性能却远低于理论预期值, 主要原因是寄生模式的自激振荡、不稳定性和磁场等问题. 近年来, 随着对回旋行波放大器相互作用理论认识的

加深, 涌现出了螺旋波导、开槽波导、折叠波导等多种能抑制模式竞争的相互作用电路, 并在实践中取得了较好的效果^[1-3]. 到目前为止, 美国加州大学戴维斯分校 (UCD) 和台湾国立清华大学所采用的多段损耗波导结构被证明是解决模式竞争问题的最有效办法^[3-5].

同时, 为了解决基波回旋行波放大器需要较高磁场的问题, 谐波工作引起了人们的注意, 因为谐波工作可以将工作磁场降低 S (谐波数) 倍, 极大地降低了设计难度. 但是高次谐波的注-波相互作用较弱, 而且寄生振荡问题更加复杂, 因此谐波回旋行波放

收稿日期: 2007 - 05 - 21, 修回日期: 2007 - 12 - 18

Received date: 2007 - 05 - 21, revised date: 2007 - 12 - 18

基金项目: 国家自然科学基金 (60571039), 国家杰出青年科学基金 (60125104)

作者简介: 殷瑞剑 (1981-), 女, 宁夏中宁人, 中科院电子所博士研究生, 主要从事毫米波回旋放大器的研究.

大器一般工作在二次谐波或三次谐波比较合适.文献^[6]给出了单段损耗波导 TE₀₂模二次谐波回旋行波放大器的设计,文献^[7]介绍了 W 波段二次谐波分布式损耗和截止段相结合的多段回旋行波放大器的设计,这种结构有效的抑制了绝对不稳定性 and 回旋返波振荡.

本文介绍了 35GHzTE₀₂模二次谐波回旋行波放大器,通过线性理论分析,我们选定放大器的工作参数,确定了三段损耗波导相互作用段的设计,其中截止段可对通过的电磁波强烈衰减,特别是对返波强烈衰减可以在一定程度上切断其能量反馈通路,从而提高其起振临界.本文忽略了损耗对色散关系的影响,特别是对模式截止频率,相速度等因素的影响,而只是把损耗作为一种衰减的因素考虑进来.这种理论处理方法在目前已发表的文章中广泛运用,这一假设可能带来的误差我们将在今后的工作中进一步研究.

1 谐波回旋行波放大器

在回旋行波放大器中,注-波相互作用可以简单地理解为波导模式和电子注回旋模式之间的耦合.工作在 s 次回旋谐波圆柱波导 TE_{m_n}模式的色散方程如下:

$$\left[\frac{v^2}{c^2} - k^2 - k_z^2 \right] \left(1 - \frac{v}{c} s \right)^2 = \frac{-4v^2 k^2 H_{m_n}(r_g, r_l) I_0}{\epsilon_0 N_{m_n} I_A} \quad (1)$$

其中, $k = x_{m_n} / r_w$ 是横向波数, v 是电子的横向速度, $I_A = 4 \pi \epsilon_0 (m_0 c^3 / e)$ kA 是阿尔芬 (Alfven) 电流, γ 是相对论因子, m_0 是电子质量, e 是电子电量, ϵ_0 是真空中介电常数, c 是真空中光速, $v = v_z / c$, v_z 是电子的轴向速度, I_0 是电子注电流, $N_{m_n} = J_s^2(x_{m_n}) \left(1 - \frac{m^2}{x_{m_n}^2} \right)$ 是模式的归一化常数.

$$H_{m_n}(r_g, r_l) = J_{s-m}^2(x_{m_n} r_g / r_w) J_s^2(x_{m_n} r_l / r_w) \quad (2)$$

式 (2) 是表征相互作用强度的谐波耦合系数,其中 x_{m_n} 是第一类零阶贝塞尔函数 J_s 导函数的第 n 个根, r_l , r_g 分别是电子的拉莫尔半径和引导中心半径, r_w 是波导半径.部分模式的注-波耦合强度与归一化电子注引导中心半径的关系如图 1 所示,当工作模式为 TE₀₂模二次谐波时, $r_g = 0.42 r_w$ 的耦合最强.

当式 (1) 的等号右侧超过一定值后,色散关系会有不稳定的解,而且起振电流的增加会引起耦合效率的降低.对于特定参数的电子注,注-波耦合强

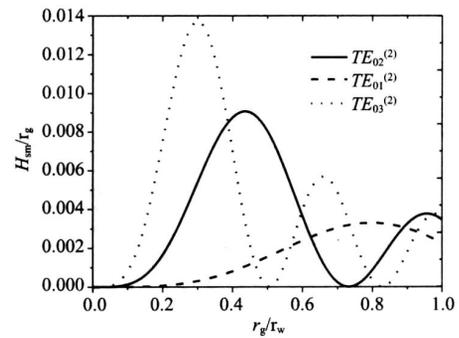


图 1 模式的耦合强度
Fig 1 Coupled strength of some modes

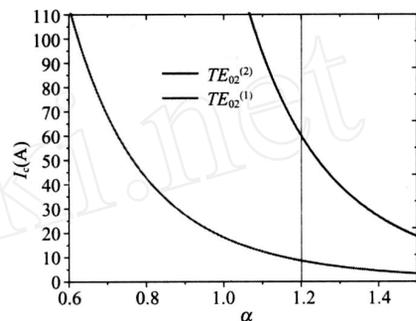


图 2 TE₀₂模基波和二次谐波起振电流与 α 的关系图
Fig 2 Dependence on electron velocity ratio of the startoscillation current for TE₀₂ fundamental and second harmonic

度由式 (2) 决定.在谐波工作的情况下,有 $v_z = s c$ 成立,所以在截止频率附近,考虑到电子运动方程等因素的影响,式 (2) 中的因子 $x_{m_n} r_l / r_w$ 近似等于 s ,其中 $v = v_z / c$ 由于 $v^2 \ll 1$ 使得 $J_s^2(s)$ 可以只取展开式的第一项,即: $J_s^2(s) = 0.25 (s / 2)^{2(s-1)} / (s!)^2$. 当 α 很小时,对于高次谐波来说 $J_s^2(s)$ 也很小,所以注-波相互作用较弱,这样就使谐波回旋行波放大器由不稳定振荡引起的阈值电流大幅提高.如图 2 所示,在 $V = 90\text{kV}$, $B = 0.99\text{Bg}$,对于基波和二次谐波 r_g / r_w 分别取 0.26 和 0.42 时,TE₀₂模二次谐波绝对不稳定性的起振电流大约是基波的 6 倍,这正是谐波回旋行波放大器能稳定地产生高功率的原因.

2 回旋行波放大器的稳定性分析

回旋行波放大器的色散曲线如图 3 所示.此时二次谐波回旋谐振线和 TE₀₂模波导的色散曲线相交,这样放大器就可在兼顾带宽的同时提高效率.回旋行波放大器可能激励起两种振荡,即绝对不稳定性振荡(图 3 中 1、2 两点)和回旋返波振荡(图 3 中

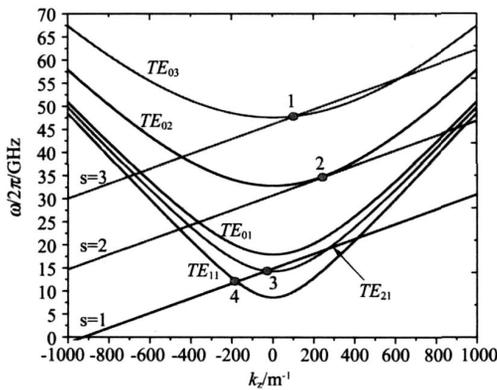


图 3 二次谐波回旋行波放大器的色散曲线 ($V = 90\text{kV}$, $\beta = 1.2, B = 0.99B_g$)
 Fig 3 Dispersion diagram of the operating mode and possible oscillating modes for TE_{02} second harmonic ($V = 90\text{kV}$, $\beta = 1.2, B = 0.99B_g$)

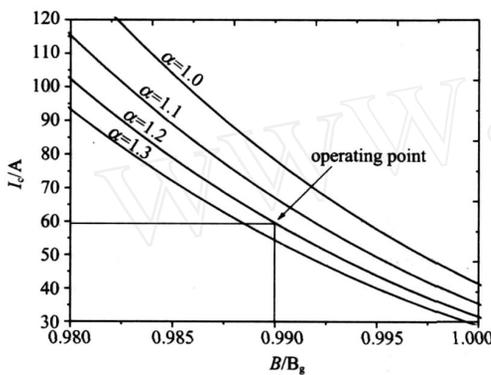


图 4 起振电流随 B/B_g 的变化
 Fig 4 The start-oscillation current as functions of B/B_g and B

3、4两点)。根据边界稳定性条件,为了保持放大器的稳定工作,工作电流 I_0 必须小于起振电流 I_c , 相互作用长度也要小于回旋返波振荡的起振长度。因此,确定绝对不稳定性的起振电流和回旋返波振荡的起振长度是回旋行波放大器设计的关键。

我们由线性理论确定绝对不稳定性的起振电流,但当放大器的工作带宽超过截止频率时就会产生绝对不稳定振荡。在 $r_w = 1.02\text{cm}$ 、 $V = 90\text{kV}$ 的条件下,起振电流随工作磁场 B 和电子横纵速度比的变化如图 4 所示。起振电流随 B 的增大而急剧减小,但较低的磁场会降低工作效率,限制输出功率的提高。同样电子横纵速度比较小时,起振电流很高,随着 β 的增大,起振电流逐渐减小,耦合作用增强。因此,调整磁场和电子横纵速度比一直是抑制绝对不稳定性的有效手段。在 $r_w = 1.02\text{cm}$ 、 $V = 90\text{kV}$ 、 $\beta = 1.2, B = 0.99B_g$ 时,器件的起振电流约为 60A 。虽

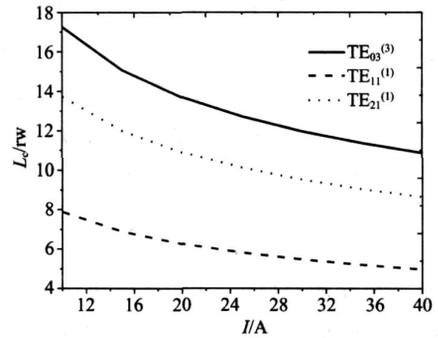


图 5 回旋返波振荡模式起振长度随工作电流的变化
 Fig 5 Dependence on the operating current of the critical length normalized to the circuit radius for gyrotron backward-wave oscillations

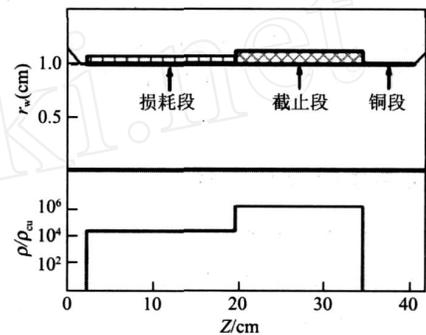


图 6 TE_{02} 模二次谐波回旋行波管相互作用段示意图
 Fig 6 The interaction circuit of the TE_{02} second harmonic gyrotron traveling wave tube

然速度零散和终端反射会降低起振电流,但由于加载损耗波导后起振电流会提高。因此,我们可以将工作电流定为 25A 。

谐波回旋行波放大器对自激的回旋返波振荡也非常敏感,返波的能速和电子注的传播方向是相反的,因此很容易振荡,图 3 中的 3、4 点分别是 TE_{21} 模基波和 TE_{11} 模基波的返波振荡点。回旋返波振荡的起振长度可以用拉普拉斯变换公式和返波条件解析获得^[8,9]。3 个主要的返波模式起振长度随工作电流的变化如图 5 所示,我们可以看出 TE_{11} 模式是最危险的模式,在电流为 25A 时, TE_{11} 模的起振长度为波导内半径的 6 倍。

3 非线性理论分析

根据以上分析,我们选择了图 6 所示的相互作用段结构,它由损耗波导段、截止段和铜段构成。这里忽略非线性理论的具体推导和结果,根据文献 [3] 的理论,对前面所述放大器进行非线性模拟。

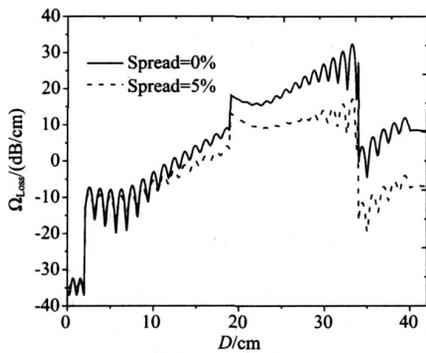


图 7 不同速度零散条件下,欧姆损耗随相互作用段轴向位置 D 的变化

Fig 7 Dependence of the ohmic loss Ω_{ohmic} on axial distance D for different electron axial-velocity spread

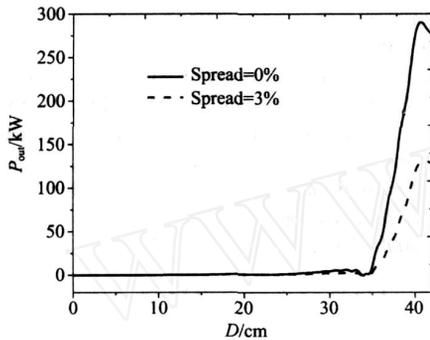


图 8 不同速度零散条件下,输出功率 P_{out} 随相互作用段轴向位置 D 的变化

Fig 8 Dependence of the output power P_{out} on axial distance D for different electron axial-velocity spread

表 1 35GHz 二次谐波 TE_{02} 模三段损耗波导结构回旋行波放大器设计参数

Table 1 Design parameters of the 35GHz second harmonic TE_{02} three-stage distributed-loss gyro-TWT

TE_{02} three-stage distributed-loss gyro-TWT	
电子注电压	90kV
电子注电流	25A
磁场强度	0.643T
波导半径	1.02cm
工作模式	TE_{02}
谐波次数	2
引导中心半径	$0.42r_w$
电子纵横速度比	1.2
损耗段长度	17cm
损耗段波导壁电阻率	$\rho_1 = 2 \times 10^4 \rho_w$
截止段长度	15cm
截止段波导壁电阻率	$\rho_2 = 2 \times 10^6 \rho_w$
铜段长度	6cm

图 7 描述了在速度零散分别为 0% 和 5% 的情况下,欧姆损耗随轴向距离的变化,在这里我们定义欧姆损耗为 $G = 10 \lg(P_{ohmic}/P_{in})$,其中 P_{ohmic} 是观测

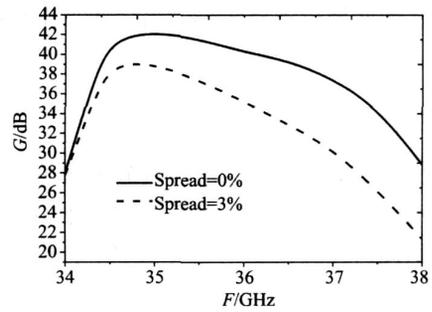


图 9 不同速度零散条件下,增益随频率的变化

Fig 9 Dependence of the gain G on frequency for different electron axial-velocity spread

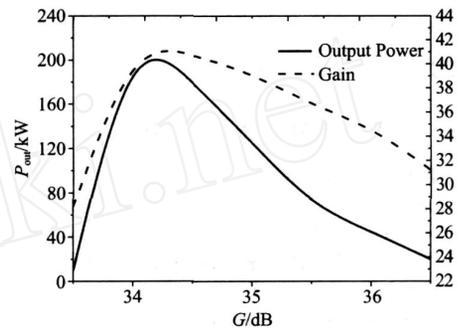


图 10 输出功率和增益随频率的变化

Fig 10 Dependences of the output power P_{out} and the gain G on frequency

点单位长度的损耗功率, P_{in} 是输入功率. 从图中我们可以看出,在损耗段,损耗功率随着轴向距离几乎线性增加,这主要是由于在损耗段冷衰减确定的情况下,因电子注的群聚随轴向距离的增大而加深,从而交出了更多的能量,导致损耗功率的增大. 在截止段,一方面损耗材料强烈衰减电磁场,另一方面,通过和电子注的相互作用,电磁场也从电子获得能量,因此出现了先减小后增大的情况. 在铜段,由于铜对场的衰减很小,所以在截止段和铜段相连处,损耗功率急剧减小,随后缓慢变化.

图 8 给出了输出功率随轴向位置的变化,不考虑速度零散时,输出功率最大为 289kW,而当速度零散为 3% 时,最大输出功率为 125kW,这是由于群聚过程不理想,导致峰值功率也相应下降. 图 9 给出了在不同速度零散下,增益随频率的变化情况. 可以看出考虑速度零散后增益和带宽都明显降低,3dB 带宽由 2.2GHz 降低为 1.5GHz. 图 10 为输出功率和增益随频率的变化曲线,在速度零散为 3% 时,非线性预测的输出功率达到 125kW,3dB 带宽为 4.3%. 最终设计的 35GHz 二次谐波 TE_{02} 模三段损

耗波导结构回旋波放大器的结构和工作参数如表1所示,其中 ρ_v 表示铜的电阻率。

4 结论

本文通过对毫米波回旋波放大器的绝对不稳定性、回旋返波振荡以及电子注波相互作用的研究,讨论了回旋波放大器的稳定性、寄生模式的抑制和工作参数的优化等问题,给出了Ka波段 TE_{02} 模二次谐波回旋波放大器的非线性模拟结果:在电子注电压 90kV、电流 25A、横纵速度比 1.2、工作磁场 0.643T时,分别选取损耗波导段长度 17cm、截止段长度 15cm、铜段长度 6cm。在速度零散为 3%时,中心频率 35GHz处可获得 125kW 的输出峰值功率、5.5%的效率和 4.3%的带宽。

REFERENCES

- [1] LU PuKun, XU ShouXi. Review of gyrokystron amplifiers and its development[J]. *J. Electronics and Information technology* (刘濮鲲,徐寿喜.回旋速调管放大器及其发展评述.电子信息学报), 2003, 25(5): 683—694.
- [2] LAI Guo-Jun, LU Pu-Kun. Analysis on velocity of a W-band gyrotron traveling wave amplifier[J]. *J. Infrared Millimeter Waves* (来国军,刘濮鲲. W波段回旋波管放大器速度零散的分析.红外与毫米波学报), 2006, 25(6): 447—450.
- [3] Chu K R. Overview of research on the gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *IEEE Trans Plasma Sci* 2002, 30(3): 903—908.
- [4] Chu K R, Bamett L R, Chen H Y, et al. Stabilization of absolute instabilities in the gyrotron traveling wave amplifier[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(7): 1103—1106.
- [5] NU Xin-Jian, GU Ling, YU Sheng, et al. Corrugated waveguide mode conversion for 94GHz second-harmonic gyrotron[J]. *J. Infrared Millimeter Waves* (牛新建,顾玲,喻胜,等.94GHz二次谐波回旋管波导模式转换.红外与毫米波学报), 2007, 26(2): 117—120.
- [6] Wang Q S, McDemott D B, Luhmann N C. Operation of a stable 200 kW second-harmonic gyro-TWT amplifier[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1996, 24(3): 700—706.
- [7] Yeh Y S, Hung C L, Su C W, et al. W-Band second harmonic gyrotron traveling wave amplifier with distributed-loss and severed structures[J]. *Int J. Infrared Millimeter Waves*, 2004, 25(1): 29—42.
- [8] Leon K C. Stable high power TE_{01} Gyro-TWT amplifiers[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1994, 22(5): 585—592.
- [9] LAI GuoJun, JIA YunFeng, LU PuKun. Absolute instability in gyro-traveling-wave tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams* (来国军,贾云峰,刘濮鲲. W波段回旋波管放大器绝对不稳定性的研究.强激光与粒子束), 2005, 17(12): 1865—1869.
- [24] Lin C H, Singer K E, Evans-Freeman J H, et al. Infrared photoreflectance of InAs[J]. *Semicond Sci Technol* 1997, 12, 1619.
- [25] Muñoz M, Pollak F H. Temperature dependence of the energy and broadening parameter of the fundamental band gap of $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}/GaSb$ ($0.07 < x < 0.22$, $0.05 < y < 0.19$) quaternary alloys using infrared photoreflectance[J]. *Phys Rev B*, 2000, 62, 16600.
- [26] Shao J, Lu W, Yue F, et al. Photoreflectance spectroscopy with a step-scan Fourier-transform infrared spectrometer. Technique and applications[J]. *Rev Sci Instrum*. 2007, 78, 013111.
- [27] Johnson T J, Zachmann G. *Introduction to Step-Scan FTIR* [M]. Ettlingen: B rüker Optik
- [28] Jiang E Y. *Advanced FT-IR Spectroscopy* [M], Madison: Thermo Electron Corporation, 2003.
- [29] Chu J H, Xu S Q, Tang D Y. Energy gap versus alloy composition and temperature in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *Appl Phys Lett* 1983, 43, 1064.
- [30] Shen H, Dutta M. Sweeping photoreflectance spectroscopy of semiconductors[J]. *Appl Phys Lett* 1990, 57, 587.
- [31] Yan D, Qiang H, Pollak F H. A new offset technique for suppression of spurious signals in photoreflectance spectra [J]. *Rev Sci Instrum*. 1994, 65, 1988.
- [32] Merrick M, Hosea T J C, Murdin B N, et al. Bandgap bowing in $InSb_{1-x}N_x$ investigated with a new Fourier transform modulated spectroscopy technique for the mid-infrared [J]. *AIP Conf Proc* 2005, 772: 295—296.
- [33] Berding M A, van Schilfgaarde M A. Sher. First-principles calculation of native defect densities in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *Phys Rev B*, 1994, 50, 1519.

(上接 6页)