

W波段回旋行波管放大器速度零散的分析

来国军^{1,2,3}, 刘濮鲲¹

(1. 中国人民解放军陆军航空兵学院, 北京 101123; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
3. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要:通过包含速度零散影响的回旋行波管放大器的非线性理论模型,以W波段两段结构回旋行波管放大器为例,详细分析了速度零散对放大器电子注一波相互作用的影响.模拟结果表明,通过合理地调整相互作用长度,减小电子纵横速度比、调节工作磁场等方法可以有效地减小速度零散的影响,对回旋行波管放大器的优化设计提供了理论依据.

关键词:W波段;回旋行波管放大器;速度零散;非线性理论
中图分类号:TN12 **文献标识码:**A

ANALYSIS ON VELOCITY SPREAD OF A W-BAND GYROTRON TRAVELING WAVE AMPLIFIER

LAI Guo-Jun^{1,2,3}, LIU Pu-Kun¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Army Aviation Institute of PLA, Beijing 101123, China)

Abstract: By the nonlinear theory model of gyrotron traveling wave amplifier in which the influence of velocity spread is contained, the effect of velocity spread on the interaction between electron beam and wave for a W-band gyrotron traveling wave amplifier was studied. The results indicate that the influence of velocity spread in amplifier can be weakened by regulating the interaction length, decreasing the velocity ratio, adjusting the operating magnetic field. It provides the theoretic basis for the optimized design of gyrotron traveling wave amplifier.

Key words: W band; gyrotron traveling tube; velocity spread; nonlinear theory

引言

回旋行波管放大器注波相互作用的稳定性、效率、功率最终都依赖于回旋电子注的质量^[1].近年来,回旋行波管的设计经验表明,注波相互作用理论日趋成熟,而由于回旋行波管的相互作用机制决定了放大器性能对回旋电子注质量的依赖远高于回旋速调管和回旋振荡器,回旋电子注的质量已成为进一步提高回旋行波管性能的严重制约因素^[2-5].

虽然,为了减小注波相互作用对回旋电子注质量的依赖,人们不断尝试各种新的相互作用电路结构以降低输出性能对速度零散的敏感性.俄罗斯应用物理研究所采用内表面具有螺旋槽结构的波导作为互

作用电路,在X波段可以在轴向速度零散为30%的情况下正常工作,获得了2MW的峰值功率^[6].但是,在W频段,类似于开槽波导、螺旋波导等结构的相互作用电路,由于波导半径较小,增加了激励起其它寄生模式的可能,性能远达不到理论的预期值.因此,较准确地预计和分析速度零散的影响,并针对实际速度零散的不同而采用不同的优化设计,是W波段回旋行波管放大器设计中尤为重要工作.

几十年来,各国科学家在理论和实践上都做了大量工作,在实践中,通过不断的优化和改进磁控注入式电子枪的结构,极大地减小了速度零散^[7,8].在理论上,逐步完善了速度零散的物理模型和对各种注波相互作用电路的影响理论模型.文献[9]从线性

理论出发,分析了速度零散对回旋电子脉塞的影响,指出速度零散对不稳定性具有一定的稳定作用.文献[3]结合试验结果,通过解析表达式分析了速度零散对两段渐变回旋行波管放大器性能的影响.

本文从非线性理论出发,建立了考虑速度零散的回旋行波管注波互作用的理论模型.并深入分析了回旋行波管放大器设计中速度零散的影响和对其他参数的敏感性,为放大器性能的优化和稳定性设计提供了参考依据.

1 非线性理论模型

回旋行波管的大信号特征可通过描述沿轴向的电子能量,相位和幅度改变的一组方程来描述^[10-12],文献[11]给出了不考虑速度零散的理想电子注的单粒子理论方程,为了考虑速度零散的影响,我们引入所有的平均的速度分量 $\bar{\beta}_\perp$ 和 $\bar{\beta}_z$ 和系数 $k_F, k_b, k_\mu, k_\Delta$.

$$F' = F_0 k_F, \mu = \mu_0 k_\mu, b = b_0 k_b \quad (1)$$

可以得到:

$$\bar{\Delta} = k_\Delta \Delta_0 + k_\Delta h (\bar{\beta}_z - \beta_{z0}) \frac{1}{\beta_z} \quad (2)$$

$$k_b \equiv k_\mu = \frac{\bar{\beta}_z}{\beta_{z0}} \frac{1 - h\bar{\beta}_z}{1 - h\beta_{z0}} \left(\frac{\beta_{\perp 0}}{\beta_\perp} \right)^2 \quad (3)$$

$$k_F = \frac{\bar{\beta}_z}{\beta_{z0}} \left(\frac{1 - h\bar{\beta}_z}{1 - h\beta_{z0}} \right)^{s-2} \left(\frac{\beta_{\perp 0}}{\beta_\perp} \right)^{s-2} \quad (4)$$

$$k_\Delta = \frac{\bar{\beta}_z}{\beta_{z0}} \quad (5)$$

在速度零散为零的情况下, $k_b = k_\Delta = k_F = 1$.

如果考虑波导的损耗,轴向波数变化为复数表示为 $k_z = k'z - ik''z$,对应的电场可表示为

$$\vec{E} = \text{Re} \{ A(z) e^{-k''z} \} \vec{E}(\vec{r}_\perp) e^{i(\omega t - k'z)} \quad (6)$$

缓变的回旋相位可定义为

$$\bar{\theta} = S \left(\int_0^r \Omega d\tau' + \varphi \right) - (\omega t - k'z) \quad (7)$$

$$\Delta'_0 = (1/\bar{\beta}_{z0}) (1 - h'\bar{\beta}_{z0} - S\Omega_0/\omega) \quad (8)$$

$$h' = k'_z c / \omega \quad (9)$$

可以定义损耗常数为

$$\tilde{d} = k''_z c / \omega \quad (10)$$

下面引入

$$\zeta = \mu_0 z', F = \tilde{F}/\mu_0, I''_0 = I'_0/\mu_0^2 \quad (11)$$

我们可以重写自洽的非线性方程^[12]

$$\frac{dw}{d\zeta} = -2 \frac{(1-w)^{s/2}}{1-b_0 k_b w} \text{Re}(k_F F e^{-i\theta}) \quad (12)$$

$$\frac{d\theta}{d\zeta} = \frac{1}{1-b_0 k_b w} \{ k_\mu w + \Delta(1-k_\Delta - b_0 k_b w) - \frac{h}{\mu_0} (k_\Delta - 1) + S(1-w)^{s/2-1} \times \text{Im}(k_F F e^{-i\theta}) \} \quad (13)$$

$$\frac{dF}{d\zeta} + Fd - i\Delta F = I'' \int W(\beta_{\perp 0}) \frac{k_F k_b}{k_\Delta} \times \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(1-w)^{s/2}}{1-b_0 k_b w} e^{i\theta} d\theta_0 \right\} d\beta_{\perp 0} \quad (14)$$

在式(10)中, $W(\beta_{\perp 0})$ 服从归一化条件

$$\int W(\beta_{\perp 0}) d\beta_{\perp 0} = 1. \text{边界条件可写为}$$

$$w(0) = 0, \theta(0) = \theta_0, F(0) = F_0 \quad (15)$$

影响磁控注入式电子枪速度零散的基本因素包括静态的因素(初始速度,阴极材料的不均匀性,空间电荷力)和动态因素(负质量,正交电磁场不稳定性,由电子的回旋绝热陷阱引起的全局不稳定性)^[13].静态因素和动态因素还可能互相影响,从而使速度零散问题变得非常杂.而速度零散的分布函数通常应该由引起速度零散的最主要原因来决定,例如如果阴极的宽度较小是造成电子注速度零散的主要原因,那么,采用阶跃函数描述是最真实的情况.而我们知道,磁控注入式电子枪的速度零散主要是电子的初始速度零散、阴极表面的不均匀和电场磁场分布的不均匀引起的.在这种情况下,高斯分布是最真实的描述函数.

$$W(\beta_z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta\beta_z}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_z - \beta_{z0}}{\Delta\beta} \right)^2 \right] \quad (16)$$

2 模拟结果和讨论

如图1和图2所示,在不同速度零散下,当相互作用长度小于饱和长度时,速度零散的影响随着相互作用长度的增大而增大,在无速度零散条件下的饱和长度

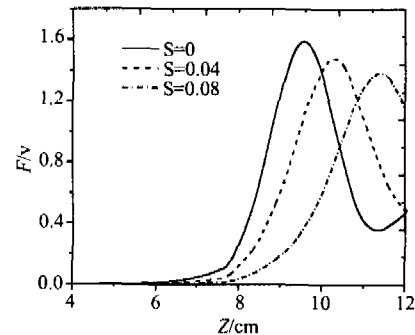


图1 不同速度零散下前向波幅度随相互作用长度的变化
Fig.1 Amplitude of forward wave versus interaction length for some velocity spread

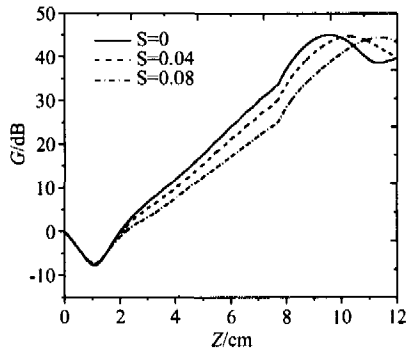


图2 不同速度零散下增益随随相互作用长度的变化
Fig.2 Gain versus interaction length for some velocity spread

处达到最大,峰值功率和增益也随着速度零散的增大而显著减小.因此减小相互作用段长度也是减小速度零散影响的方法之一,但是这样无疑牺牲了增益.

如图3所示,在截止频率附近,速度零散对放大器的影响非常小,但是随着频率的增加,速度零散对放大器的影响逐渐增大,输出功率迅速减小,也就是说,速度零散对放大器性能的影响随着频率的增高而加剧.这可以简单的从线性理论加以解释,在动力学理论中,电子注的回旋谐振方程取决于多普勒频率.

$$\omega - k_z(v_{z0} + \Delta v) - s\Omega = 0 \quad (17)$$

可见,速度零散对放大器性能的影响主要由 $k_z\Delta v$ 引起,当放大器工作于截止频率附近处, k_z 较小,因此对放大器性能影响不大,而随着频率的提高, k_z 逐渐增大,对放大器的影响逐渐显著,导致了输出功率的逐渐下降.因此,速度零散显著地影响了放大器的工作带宽,当不考虑速度零散时,3dB 带宽达到 5.5GHz,而当速度零散为 8% 时,3dB 带宽迅速下降为 3GHz,减小了 1/2 左右.

对比图3和图4,我们发现,在波导加载分布式损耗的情况下,速度零散对输出功率的影响更加显

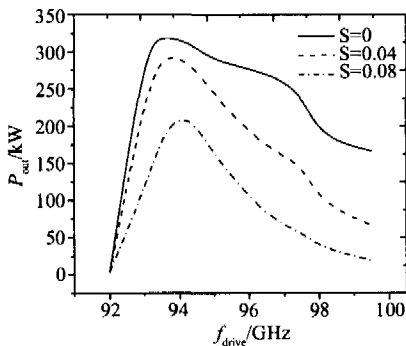


图3 输出功率随频率的变化(波导为理想导体)
Fig.3 Output power versus drive frequency(waveguide of perfect conductor)

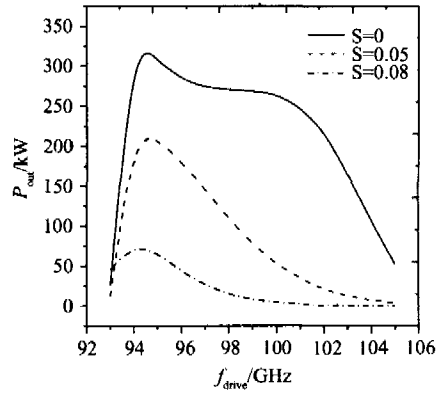


图4 输出功率随频率的变化($\rho = 50000\rho_{cu}$)
Fig.4 Output power versus drive frequency($\rho = 50000\rho_{cu}$)

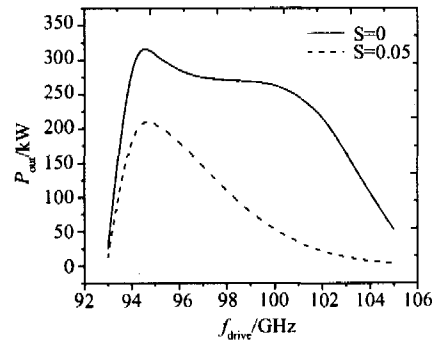


图5 输出功率随频率的变化($\alpha = 1.0$)
Fig.5 Output power versus drive frequency($\alpha = 1.0$)

著,峰值功率和带宽均有了很大程度的下降.也就是说,如果不考虑寄生模式的影响,在相同的速度零散下,对于我们通常采用的两段或三段式损耗结构波导的相互作用电路,获得的带宽和峰值功率均小于无损波导的单段回旋行波管放大器.

图5和图6所示为在不同电子横纵速度比 α 的情况下,速度零散对回旋行波管放大器的影响,可以发现 α 较大时,速度零散的作用比较明显.这是由于

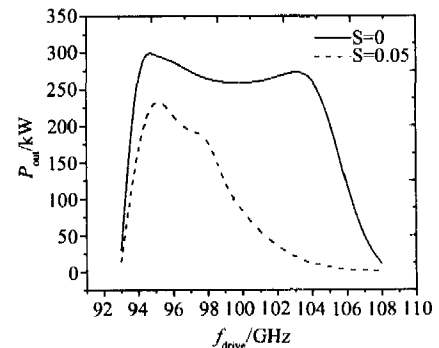


图6 输出功率随频率的变化($\alpha = 0.9$)
Fig.6 Output power versus drive frequency($\alpha = 0.9$)

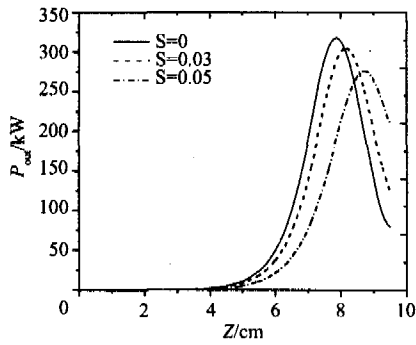


图7 输出功率随相互作用长度的变化($B_0 = 0.98 B_g$)

Fig. 7 Output power versus interaction length ($B_0 = 0.98 B_g$)

α 较小时,有较小的电子横向速度而有较大的轴向速度,而速度零散的作用主要体现为 $\Delta v_x/v_x$,那么减小 α 就增大了 v_x ,从而达到了和减小 Δv_x 相同的目的。

基于绝对不稳定性的原因,一般来说,为了提高起振电流,需要将工作磁场偏离饱和磁场一定的值(1~2%),具体的偏离值的选取由工作电流和对增长率的要求等情况综合考虑决定。下面,我们分析在不同偏离值情况下,速度零散对放大器性能的影响。

图7和图8分别表示当工作磁场为 $0.98 B_g$ 和 $0.995 B_g$ 时,输出功率随相互作用区长度的变化情况,可以看出,随着工作磁场偏离值的增大,速度零散的作用逐渐增大。当工作磁场接近饱和磁场时,速度零散对放大器性能的影响较小。其本质可解释为,当工作磁场偏离值增大时,注波相互作用减弱,增益减小。因此,不同速度零散下,电子注进入饱和的时间间隔变长。由式(17)可知,磁场的减小相当于 k_z 的增大,导致了电子注速度零散作用的增加。

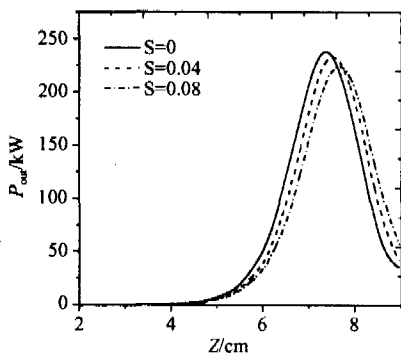


图8 输出功率随相互作用长度的变化($B_0 = 0.995 B_g$)

Fig. 8 Output power versus interaction length ($B_0 = 0.995 B_g$)

3 结语

本文采用高斯分布模型,从非线性理论出发详细分析了不同速度零散条件下放大器输出参数的变化规律和敏感性问题。模拟结果表明,速度零散对放大器性能的影响随磁场、互作用长度、频率的不同变化显著,通过缩短互作用长度,减小电子横纵速度比、调节工作磁场等方法可以有效地减小速度零散的影响。对放大器的优化设计和稳定性分析具有一定的参考价值。

REFERENCES

- [1] Lau Y Y, Chu K R, Barnett L, et al. Gyrotron travelling wave amplifier: II. Effects of velocity spread and wall resistivity[J]. *Int. J. of infrared and millimeter waves*, 1981, 2(3): 395—413.
- [2] Liu Ch, Tonsen T, Levush B. Simulation on the velocity spread in magnetron injection guns [J]. *IEEE trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3): 982—991.
- [3] Nguyen K T, Park G S, Choi J J, et al. Effects of beam velocity spread on two-stage tapered gyro-TWT amplifier[J]. *IEEE trans. On Electron devices*, 1996, 43(4): 655—660.
- [4] JIA Yun-Feng, LAI Guo-Jun, LIU Pu-Kun. Simulation and design of a ka band fundamental wave gyro traveling wave tube amplifier[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾云峰, 来国军, 刘濮鲲. Ka波段基波回旋行波管放大器的模拟与设计. *红外与毫米波学报*), 2005, 24(5): 386—389.
- [5] LAI Guo-Jun, Liu Pu-Kun. Simulation and design of a W-band gyrotron traveling wave amplifier [J]. *Acta Phys. Sin.*, (来国军, 刘濮鲲. W波段基波回旋行波管放大器的模拟与设计. *物理学报*), 2006, 55(1): 321—325.
- [6] Bratman V L, Cross A W, Denisov G G, et al. A gyro-TWT with a weak sensitivity to electron velocity spread[J]. *Proc. Int. conf. on High-power Particle Beams.*, 1998, 2(2): 857—860.
- [7] Nusinovich G S, Vlasov A N, Botton M, et al. Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation[J]. *Phys. Plasmas.*, 2001, 8(7): 3473—3479.
- [8] Glyavin M Yu, Goldenberg A L, Kuftin A N, et al. Experimental studies of gyrotron electron beam systems[J]. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(2): 474—483.
- [9] Ergakov V S, Koponen J P T, Erm. Influence of electron velocity spread on gyrotron performance [J]. *Elektronnaya Tekhnika, Elektronika SVCh*, 1980, 3: 20—25.
- [10] Nusinovich G S, Li H. Large-signal theory of gyro traveling wave tubes at cyclotron harmonics[J]. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1992, 20(3): 170—175.
- [11] Nusinovich G S, Li H. Theory of gyro-traveling-wave tubes at cyclotron harmonics[J]. *Int. J. Electron.*, 1992, 72: 895—907.
- [12] Sinitsyn O V, Nusinovich G S, Nguyen K T, et al. Non-linear theory of the Gyro-TWT: Comparison of analytical method and numerical code data for the NRL Gyro-TWT [J]. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2002, 30(3): 915—921.
- [13] Tsimring Sh E. Gyrotron electron beams: velocity and energy spread and beam instabilities[J]. *Int. J. of infrared and millimeter waves.*, 2001, 22(10): 1433—1468.