

文章编号: 1001-9014(2005)05-0386-04

# Ka 波段基波回旋行波管放大器的模拟与设计

贾云峰, 来国军, 刘濮鲲

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 完成了 Ka 波段基次谐波  $TE_{01}$  模回旋行波管的初步设计, 通过 PIC 模拟计算获得了回旋行波管稳定工作的详细物理图像和参数依赖关系. 模拟计算表明, 在电子注电压为 100kV, 电子注电流为 20A, 工作磁场为 1.27T 时, 放大器可以获得大于 450kW 的输出功率、50dB 增益、大于 22.5% 的效率和约为 5% 的带宽.

**关键词:** 毫米波; 回旋行波管; 基次谐波; PIC 模拟

**中图分类号:** TN12 **文献标识码:** A

## SIMULATION AND DESIGN OF A Ka BAND FUNDAMENTAL WAVE GYRO TRAVELLING WAVE TUBE AMPLIFIER

JIA Yun-Feng, LAI Guo-Jun, LIU Pu-Kun

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The Primary design of a Ka-band fundamental wave  $TE_{01}$  gyro-traveling wave tube (gyroTWT) amplifier was presented. Employing a PIC code, gyroTWT was simulated numerically, and the details and the relations of parameters were presented. The results indicate that an over 450 kW output power and 50dB gain can be obtained from the amplifier by simulating under the condition of 100 kV voltage, 20 A current, 1.27 T magnetic field. The efficiency exceeds 22.5 percent and the bandwidth is about 5 percent.

**Key words:** millimeter wave; gyro traveling wave tube (gyro TWT); fundamental wave; PIC simulation

### 引言

众所周知, 在毫米波段由于工作波长减小, 传统的真空电子器件, 由于受结构、工艺材料及机理等各种因素的限制, 工作遇到了极大的困难. 而基于电子回旋共振原理的回旋器件<sup>[1]</sup> 由于采用了光滑波导而大大降低了结构的复杂性, 因而成为这一波段产生高功率微波辐射的主要选择. 目前国际上关注的热点主要在回旋速调管放大器<sup>[2]</sup> (GyroKlystron) 和回旋行波管放大器<sup>[3-5]</sup> (Gyro-traveling wave tube, Gyro-TWT) 两方面. 相比回旋速调管, 回旋行波管结构更简单, 带宽也大大增加, 因而更具有发展潜力. 国际上从八十年代开始研究回旋行波管, 并已经取得了非常显著的成果<sup>[6]</sup>, 而国内的研究工作才刚刚起步. 本文以  $TE_{01}$  为工作模式, 对 35GHz 基次谐波回旋行波管进行了 PIC 模拟和设计.

### 1 回旋行波管原理

回旋行波管利用波导的快 TE 模 ( $v_{ph} > c$ ) 与电子注回旋模之间的相互作用来产生高功率相干辐射, 其典型的结构示意图如图 1 所示. 在光滑波导中, 快 TE 模和电子注回旋模的色散关系可以分别表示为:

$$\omega^2 = k_z^2 c^2 + \omega_{co}^2, \quad (1)$$

$$\omega = k_z v_z + s\Omega, \quad (2)$$

其中,  $c$  为光速,  $v_z$  为电子轴向速度,  $\omega$  和  $k_z$  分别为角频率和轴向波数,  $\omega_{co}$  为波导截止角频率,  $s$  为谐波数,  $\Omega = eB/(\gamma_0 m)$  为相对论电子回旋频率,  $\gamma_0 = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  为电子的相对论因子,  $\beta = v/c$ ,  $v$  为电子速度.

当螺旋电子轴向运动通过相互作用区时, 由于受到 TE 模  $E_\phi$  场的作用, 电子速度会发生变化, 从

收稿日期: 2004-12-20, 修回日期: 2005-06-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (60125104)

作者简介: 贾云峰 (1975-), 男, 湖北荆门人, 博士, 中科院电子所讲师, 主要从事高功率微波及毫米波技术研究.

Received date: 2004-12-20, revised date: 2005-06-10

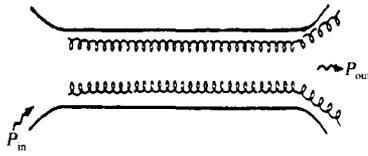


图1 回旋行波管结构示意图  
Fig.1 Schematic of GyroTWT

而导致电子回旋频率的变化. 这种回旋频率的调制导致了回旋轨道中相位群聚. 当波的多普勒漂移频率略微超过电子回旋频率  $\Omega$  或其谐波  $s\Omega$  (即  $\omega - k_z v_z > s\Omega$ ) 时, 这种波能使相位群聚电子连续地减速, 并从它们横向速度的减少中获得能量. 耦合色散曲线示于图 2. 在图中所示的 Gyro-TWT 工作点处, 互作用效率最高<sup>[5]</sup>.

## 2 参数选择和稳定性考虑

考虑弱相对论(电子注电压一般低于 100kV)、小轨道回旋电子注与基次谐波  $TE_{01}$  模相互作用. 选择基次谐波工作是由于基波的束波耦合强度相比谐波工作要强得多. 采用小轨道回旋电子束是因为目前的磁控发射电子枪(MIG)技术更为成熟.

从色散曲线上看, 提高电子注电压将使工作点沿色散曲线上移从而远离截止点, 由于此时斜率(群速度)变化不大, 在一个相对较宽的频带内电子与波能保持同步, 所以有助于增加放大器的带宽. 但

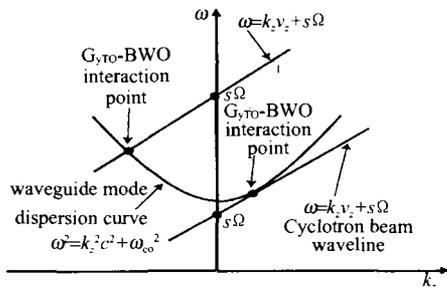


图2 耦合色散曲线  
Fig.2 Coupling dispersion curve

是, 电压过高时电子速度离散比较明显, 对增益有一定影响<sup>[4]</sup>, 在此选择工作电压为 100kV.

假定频带的中心频率为 35GHz, 由小信号理论可以得出相应的波导半径  $r_w = 0.548\text{cm}$ , 耦合最强时的磁场  $B_g = 1.286\text{T}$ . 对于特定参数的电子束, 束波耦合强度由式(3)表示<sup>[4]</sup>:

$$H_s = J_s^2(k_c r_c) J_s^2(k_c r_L) \quad (3)$$

这里  $J_s$  是贝塞尔函数,  $r_c, r_L$  分别是电子注引导中心半径和拉莫尔半径,  $k_c = q_{mn}/r_w$  表示截止波数,  $q_{mn}$  是第一类零阶贝塞尔函数  $J'_s$  的第  $n$  个根, 工作模为  $TE_{01}$  时,  $r_c \approx 0.48r_w$ . 通过合理选择引导半径, 可以抑制竞争模式的增长.

器件的稳定工作较难实现是制约回旋行波管发展水平的主要原因, 对回旋行波管稳定工作最严重的威胁是振荡<sup>[7,8]</sup>. 两类振荡会大大降低放大器的性能. 一种是由于绝对不稳定性导致的接近(略低于)截止频率的振荡, 另一种是竞争模式的返波振荡, 其本质也是绝对不稳定性. 产生振荡的本质原因是束波耦合太强而导致能量的产生大于损耗. 由于束波耦合强度正比于工作电流, 所以无论哪种振荡, 都可以通过减小工作电流来压制和消除. 对于无限长圆波导中的  $TE_{mn}$  模, 传导不稳定性转化为绝对不稳定性的临界起振电流  $I_c$  为<sup>[9]</sup>:

$$I_c = \frac{\gamma_0 \beta_z (q_{mn}^2 - m^2 J_m^2(q_{mn}) I_A \epsilon_c)}{4\beta_z^2 [J_{s-m}(k_c r_c) J'_s(k_c r_L)]^2} \quad (4)$$

其中,  $I_A = mc^3/e = 17\text{kA}$ ,  $\epsilon_c$  由式(5)和式(6)给出:

$$\epsilon_c = 27\beta_z^2 k_s^4 \quad (5)$$

$$k_s = \frac{1}{2} (1 + 8\beta_z^2)^{-1/2} \left\{ -4\beta_z s\Omega/\omega_c + [16\beta_z^2 s^2 \Omega^2/\omega_c^2 + 2(1 + 8\beta_z^2)(1 - s^2 \Omega^2/\omega_c^2)]^{-1/2} \right\} \quad (6)$$

分析式(4)不难得出, 起振电流强烈依赖于电子横向与纵向速度比  $\alpha$ 、电子束电压  $V$  和工作磁场  $B$ , 其变化规律分别示于图 3、图 4 和图 5. 为了抑制竞争模、保证行波管稳定工作, 必须仔细选择这些参

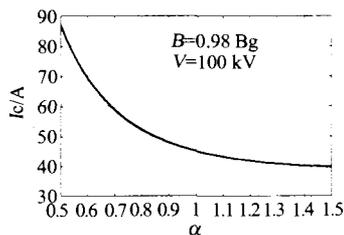


图3 起振电流随  $\alpha$  的变化  
Fig.3 Start current versus  $\alpha$

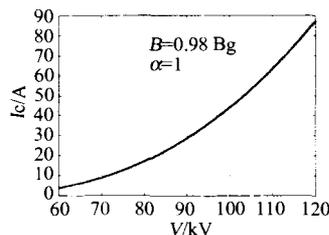


图4 起振电流随  $V$  的变化  
Fig.4 Start current versus  $V$

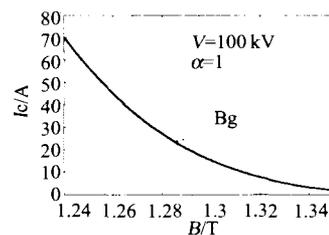


图5 起振电流随  $B$  的变化  
Fig.5 Start current versus  $B$

数.

为了有效利用电子束能量,同时又不出现磁镜反射现象,回旋器件所用的  $\alpha$  通常在  $0.5 \sim 2$  之间. 选取  $\alpha$  较大时,起振电流减小,同时由于轴向速度较小,器件出现其它不稳定性的可能性也大大增加,不利于稳定工作. 选取  $\alpha$  较小时,电子的横向能量太小,效率较低. 综合考虑后,我们选取  $\alpha = 1$ .

束电压减小时,起振电流下降明显,结合前面的考虑,我们认为束电压为  $100\text{kV}$  是合适的.

当工作磁场等于  $B_g$  时,行波管束波耦合最强,但起振电流太小,容易产生不稳定性. 因此在实际设计管子时,工作磁场取为  $0.98B_g$ ,此时的起振电流达到了  $45\text{A}$ .

为了保证稳定工作时获得较高的功率,我们选择工作电流为  $20\text{A}$ . 这些参数与我们即将进行的实验研究相符.

### 3 模拟计算

在给定的参数下,我们详细模拟了回旋行波管产生高功率微波的过程,得出了放大器性能随工作参数的变化规律.

回旋行波管稳定工作时,电子束与回旋模良好同步. 随着相互作用距离的增加,电子和波的能量都发生了较大的变化,导致了回旋谐振条件不再满足,波增长达到了饱和,此时对应的相互作用区长度就是饱和长度. 超过饱和长度后,电子不仅不再将能量交给波,反而从波吸收能量. 饱和长度的大小与相互作用强度有关,具体是与驱动功率和工作电流有关,其随驱动功率和工作电流的变化示于图 6 和图 7. 随着驱动功率增加,束调制和群聚加强,随着工作电流增加,束波耦合加强,也导致了束群聚加强,两者对应的最佳群聚距离和作用距离都相应减小.

在优化相互作用长度的情况下,输出功率及增益随驱动功率的变化如图 8. 可见,当驱动功率变化时,回旋管输出功率基本不变,而增益则逐步降低,差别可以达到  $30\text{dB}$ . 当输入驱动功率为零时,放大器输出基本为零 ( $-40\text{dB}$  以下),表明放大器工作是稳定的. 模拟还发现,在未达到饱和和过饱和情况下,输出功率都有大幅下降.

在驱动功率基本恒定的情况下,我们研究了放大器的带宽特性,未经优化的输出功率及增益随驱动频率的变化如图 9 所示. 正如我们所期望的,放大器的中心频率约为  $35\text{GHz}$ ,  $3\text{dB}$  带宽达到了约  $1.8\text{GHz}$ ,超过了  $5\%$ .

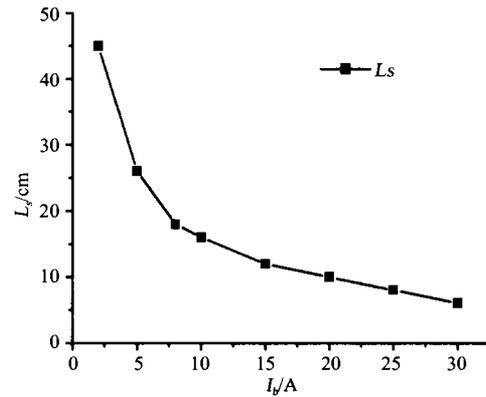


图 6 饱和长度随驱动功率的变化  
Fig. 6 Saturation length versus input power

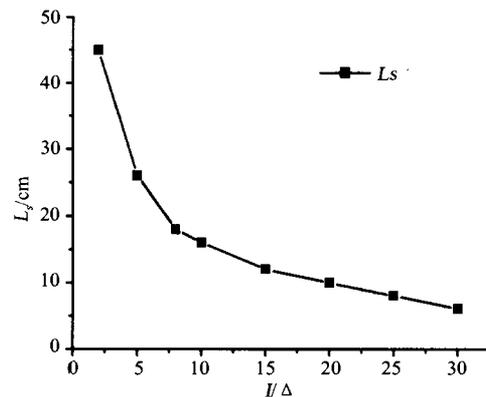


图 7 饱和长度随工作电流的变化  
Fig. 7 Saturation length versus current

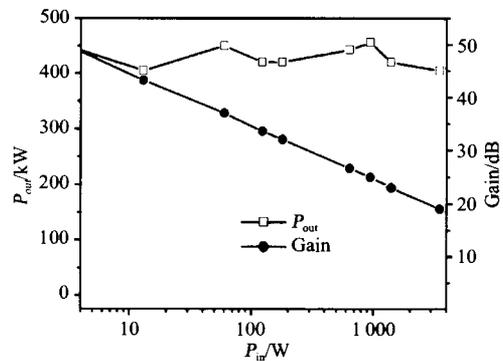


图 8 输出功率与增益随驱动功率的变化  
Fig. 8 Output power and gain versus drive power

工作电流变化时输出功率及增益变化情况如图 10 所示. 在电流较小时,由于束波耦合较弱,输出功率和效率都比较低. 随着电流的逐步增大,输出功率和增益都大幅增加,到  $20\text{A}$  时功率达到了  $450\text{kW}$ ,效率也达到了  $22.5\%$ . 当电流进一步增加时,绝对不稳定性开始产生,影响了放大器的效率,在  $30\text{A}$

以上,功率和效率进一步下降,频谱分析表明杂散频率增多,意味着器件工作变得不稳定.这一变化趋势与理论分析基本相符,只是模拟没有发现明显的临界电流值,大约是在 30A 左右,而小信号理论预言在 45A,考虑到小信号理论的精度有限,我们认为这样的差异是合理的.

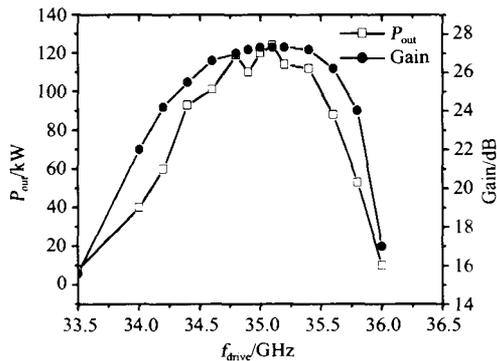


图9 输出功率与增益随驱动频率的变化  
Fig.9 Output power and gain versus drive frequency

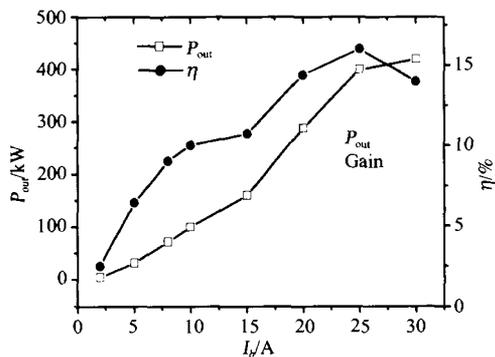


图10 输出功率与增益随工作电流的变化  
Fig.10 Output power and gain versus current

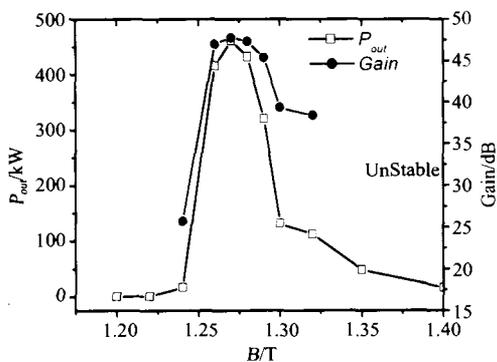


图11 输出功率及增益随工作磁场的变化  
Fig.11 Output power and gain versus magnetic field

放大器的工作磁场决定了束波的回旋谐振匹配,因而也就决定了束波耦合的强度.模拟表明,放大器的工作对于磁场的变化极为敏感,如图 11 所示.在磁场为 1.27T(0.987 $B_g$ )时,放大器获得了最大的功率和增益,当磁场下降到 1.24T(0.96 $B_g$ )时,功率迅速下降到约 14kW,而在磁场大于 1.32T(1.026 $B_g$ )甚至 1.30T(1.01 $B_g$ )时,放大器迅速过渡到不稳定区,杂散振荡的产生大大降低了输出功率.

整个模拟工作除未考虑电子束的能量离散效应和加工工艺、装配精度等因素外,都采用了符合理论设计和实验条件的参数进行,所以其结果具有很大的可信度,能够很好地指导实验.

## 4 结论

本文完成了 Ka 波段基波回旋行波管放大器的模拟和设计,通过 PIC 模拟计算详细研究了回旋行波管放大器性能随工作参数的变化规律.计算表明,我们设计的 TE<sub>01</sub> 模回旋行波管放大器,在 35GHz 频率能获得超过 450kW 的峰值输出功率、约 50dB 的增益、大于 22.5% 的效率和约 5% 的带宽.

## REFERENCES

- [1] Kevin L F, Bruce G D, Howard R J, et al. Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices [J], *Proceedings of the IEEE*, 1999, **87**(5): 752—781.
- [2] XU Shou-Xi, LIU Pu-Kun. The simulation and design of a novel chain bunching cavity for gyrokystron amplifier [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐寿喜,刘濮鲲.新型回旋速调管放大器链式群聚腔的模拟与设计. *红外与毫米波学报*) 2003, **22**(6): 431—435.
- [3] Chu K R. Overview of research on the gyrotron traveling-wave amplifier [J], *IEEE Trans. On PLASMA SCI.*, 2002, **30**(3): 903—908.
- [4] Chu K R, Lin A T. Gain and bandwidth of the gyro-TWT and CARM amplifiers [J], *IEEE Trans. On Plasma Sci.*, 1988, **16**(2): 90—104.
- [5] Chu K R, Drobot A T, Granatstein V L, et al. Characteristics and optimum operating parameters of a gyrotron traveling wave amplifier [J], *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, 1979, **Mtt-27**(2): 178—187.
- [6] Leon K C, Mcdermott D B, Balkcum A J, et al. Stable high power TE<sub>01</sub> Gyro-TWT amplifiers [J], *IEEE Trans. On Plasma Sci.*, 1994, **22**(5): 585—592.
- [7] Lan Y Y, Chu K R, Barnett L R, et al. Gyrotron traveling wave amplifier; analysis of oscillations [J], *Int. of Infrared and millimeter waves*, 1981, **2**(3): 373—393.
- [8] Lin A T, Chu K R, Lin C C, et al. Marginal stability design criterion for Gyro-TWTs and comparison of fundamental with second harmonic operation [J], *Int. J. Electronics*, 1992, **72**(5): 873—885.
- [9] John A Davies. Conditions for absolute instability in the cyclotron resonance case [J], *Phys. Fluids B*, 1989, **1**(3): 663—669.