

3 mm 波段回旋速调管放大器设计与粒子模拟

黄 勇^{1,2} 李宏福¹

(¹ 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054; ² 装备指挥技术学院信息装备系, 北京 101416)

摘要 设计了一支 3 mm 波段基波回旋速调管, 该回旋速调管工作在低损耗的 TE_{01} 模式, 包含四个谐振腔。首先使用线性理论确定工作参数的大致范围, 然后采用 HFSS 软件设计单个谐振腔, 通过调整谐振腔尺寸和腔壁介质层参数使谐振腔的谐振频率和 Q 值符合设计要求, 最后使用粒子模拟程序优化设计了回旋速调管的互作用电路, 研究了谐振腔参差调谐方案, Q 值对回旋速调管性能的影响, 互作用电路的稳定性以及电子注参数变化对注-波互作用性能的影响。PIC 粒子模拟结果表明, 在电子注电压 65 kV, 电流 6 A, $\alpha(V_{\perp}/V_{\parallel})1.5$, 工作磁场 3.6 T 时, 回旋速调管的 3 dB 带宽约为 600 MHz, 在 93.7 GHz 获得 139 kW 的峰值输出功率, 效率为 35.6%, 增益为 28.4 dB。模拟中没有考虑电子注速度零散的影响。

关键词 光电子学; 3 mm 波段; 回旋速调管放大器; 粒子模拟; 电子注

中图分类号 TN129 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0146

Design and PIC Simulation of 3 mm Band Gyroklystron Amplifier

Huang Yong^{1,2} Li Hongfu¹

¹ School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

² Department of Information Equipment, Academy of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China

Abstract A 3 mm band four cavity gyroklystron was designed and simulated. The working mode was the low loss TE_{01} mode. Linear theory was applied to determine the initial operating parameters. The famous FEM code HFSS was used to optimization design of every single cavity. PIC simulation code was used to design the interaction circuit. Studies to determine the optimal stagger tuning and cavity Q values were performed. Circuit stability was investigated and the effect of beam parameter variation on circuit performance was also studied. Simulations show that a four cavity circuit operating in the TE_{01} mode at the fundamental of the cyclotron frequency can achieve 139 kW peak output power, 35.6% efficiency and 28.4 dB gain at a center frequency of 93.7 GHz with about 600 MHz full width half maximum (FWHM) bandwidth for a 65 kV, 6 A, pitch angle $\alpha(V_{\perp}/V_{\parallel})1.5$ and velocity spread 0% beam.

Key words optoelectronics; 3 mm band; gyroklystron amplifier; PIC simulation; electron beam

1 引 言

目前, 世界各主要大国都在大力发展高功率毫米波雷达系统^[1]。要发展高功率毫米波雷达, 首先要研制高功率毫米波源, 回旋管作为一种新型快波器件, 它不受常规真空电子器件中电子与波相互作用空间的线尺寸和频率成反比规律的限制, 在毫米波段其尺寸比传统器件大得多, 因而其功率容量也大得多^[2,3]。回旋速调管放大器具有高功率、高效率和高增益的特点, 并具有一定带宽, 因而自发明以来

就受到了各国研究人员和政府的高度重视。经过几十年的发展, 回旋速调管放大器在理论和实验两方面都取得了很大的进展^[4~9], 成为最具发展前景和应用价值的高功率宽带毫米波相干辐射源之一。

研制回旋管等微波毫米波功率源时, 为了预测器件的性能, 对器件中的注-波互作用进行详细精确的模拟计算是十分重要的。随着计算机性能的不提高, 使得大量应用 PIC 粒子模拟方法到回旋管类器件注-波互作用的模拟计算成为可能, 并且在完成

器件的优化设计过程中起到了关键的作用^[10]。

2 研究方法

由众所周知的回旋脉塞谐振条件,可以大致确定器件的工作磁场范围。用 Bessel 函数的加法定理把电子运动方程由波导轴坐标系变换到引导中心坐标系,可得到代表 TE_{0n} 模式与电子注 *s* 次谐波作用强度的耦合系数

$$H_s = H_s(r_c)H_s(r_L) = J_s^2(k_{0n}r_c J_s^{\prime 2}(k_{0n}r_L)), \quad (1)$$

式中 J_s 为 Bessel 函数, r_c, r_L 分别为电子注引导中心半径和拉莫尔半径, $k_{0n} = \nu_{0n}/r_w$ 表示截止波数, ν_{0n} 为第一类零阶 Bessel 函数的导数 $J'_s(x)$ 的第 *n* 个根, r_w 是谐振腔半径。其中 $H_s(r_c)$ 是与电子注引导中心半径相关的部分,而 $H_s(r_L)$ 是与电子拉莫尔半径相关的部分。

根据(1)式,可得到相互作用系数与电子注引导中心半径的关系,当电子注引导中心半径 $r_c \approx 0.48r_w$ 时,电子注和工作模式 TE₀₁⁽¹⁾ (上标表示谐波数)耦合最强。

谐振腔模的起振电流如公式(2a)所示^[5]

$$I_{stA} = 3.347 \times 10^3 \left(\frac{2^s s!}{s^s} \right) \frac{\gamma_0 L}{Q\lambda} I_{stN} \beta^{6-2s} \times \frac{(\nu_{nm}^2 - m^2) J_m^2(\nu_{nm})}{J_{m-s}^2(k_{\perp} r_c)}, \quad (2a)$$

其中

$$I_{stN} = \frac{144s^2}{\pi\mu^2(\Delta\mu^2 - 12s)} \exp\left[\frac{(\Delta\mu)^2}{24}\right], \quad (2b)$$

$$\Delta = 2/\beta_{\perp}^2 (1 - s\Omega_c/\omega), \quad (2c)$$

$$\mu = (\beta_{\perp}^2 / 2\beta_{\parallel}) (\omega L/c), \quad (2d)$$

(2) 式中 *s* 为谐波数, *Q* 为谐振腔的品质因数, λ 为工作波长, $\beta_{\perp} = v_{\perp}/c, \beta_{\parallel} = v_{\parallel}/c, v_{\perp}$ 为电子横向速度, v_{\parallel} 为电子纵向速度, *L* 为谐振腔长度, *c* 为真空中的光速。

根据(2a)式,针对设计的回旋速调管放大器相互作用电路,确定了每个谐振腔中工作模的起振电流随工作磁场的变化关系,可以保证在所选工作参数范围内,工作电流小于每个谐振腔的起振电流,从而保证所设计的回旋速调管是零驱动稳定的。

表 1 谐振腔设计参数

Table 1 Design parameters of cavities

Cavity	f_0/GHz	<i>Q</i>
Cavity1	93.42	120
Cavity2	94.12	168
Cavity3	93.30	152
Cavity4	93.82	150

采用 HFSS 软件设计单个谐振腔的高频结构^[4,7],通过调整谐振腔的半径、长度和损耗介质参数,可以设计出符合要求的谐振腔,谐振腔的设计结果如表 1 所示,为了拓展带宽,采用了参差调谐技术。

3 模拟计算与分析

编制了针对 3 mm 波段四腔回旋速调管的 PIC 粒子模拟程序,通过改变工作参数进行了大量模拟计算。在电子注电压 65 kV,电流 6 A 和 $\alpha (V_{\perp}/V_{\parallel})$ 1.5 时,改变工作磁场、输入功率和输入信号频率进行了大量计算,器件在电子发射后约 5 ns 达到稳态,计算时间定为 20 ns。

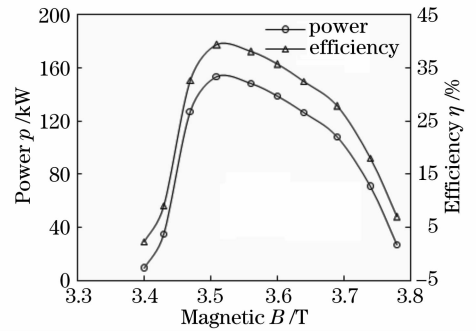


图 1 输出功率和效率与工作磁场的关系

Fig. 1 Dependence of output power and efficiency on magnetic field

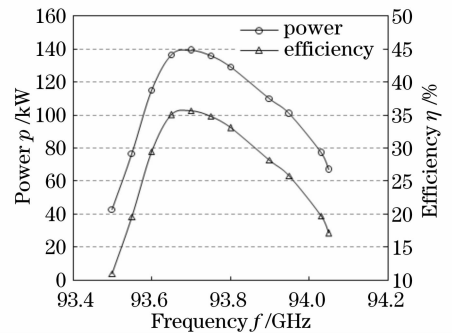


图 2 输出功率和效率与信号频率的关系

Fig. 2 Dependence of output power and efficiency on signal frequency

图 1 是输出功率和效率与工作磁场的关系,输入功率为 200 W,当磁场为 3.51 T 时,输出功率最大为 153.2 kW,效率 39.3%。图 2 是输出功率和效率与信号频率的关系,输入功率为 200 W,磁场为 3.6 T,当频率为 93.7 GHz 时,输出功率为 139 kW,效率为 35.6%,3dB 带宽约为 600 MHz。图 3 是输出功率和效率与输入功率的关系,磁场为 3.6 T,频率为 93.8 GHz,可以看出,增益随输入功率增大而下降,当输入功率为 200 W 时,功率最大为 129 kW,增

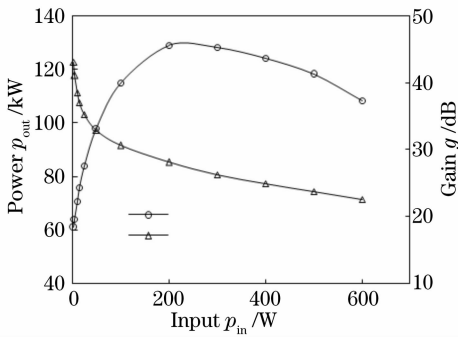


图 3 输出功率和效率与输入功率的关系

Fig. 3 Dependence of output power and gain on input power

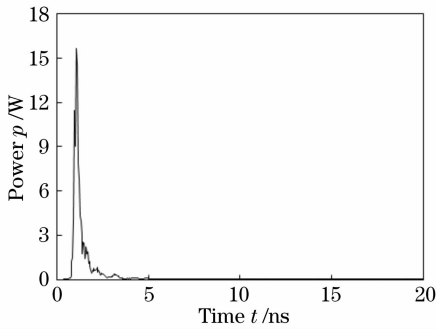


图 4 零驱动时输出功率和时间的关系

Fig. 4 Dependence of output power on time with no drive signal

益为 28.1 dB。放大器必须绝对稳定,图 4 是输入功率为零时,输出功率随时间的变化关系,计算采用的磁场为 3.51 T,可以看出达到稳态时,输出功率在噪声水平,因此,所设计的回旋速调管是零驱动稳定的。

4 结 论

设计了一只零驱动稳定的 3 mm 波段四腔回旋速调管,当输入功率为 200 W,磁场为 3.6 T,频率为 93.7 GHz 时,输出功率达到 139 kW,效率为 35.6%,3 dB 带宽约为 600 MHz,计算中没有考虑电子注速

度零散的影响。下一步工作将考虑电子注速度零散效应,进一步优化互作用电路以提高互作用功率和增益,拓展带宽。

参 考 文 献

- 1 Liu Pukun, Xu Shouxi. Review of gyrokystron amplifiers and its development[J]. *J. Electronics and Information Technology*, 2003, **25**(5): 683~694
刘濮鲲,徐寿喜. 回旋速调管放大器及其发展评述[J]. 电子与信息学报, 2003, **25**(5): 683~694
- 2 Melissa K. Hornstein, Vikram S. Bajaj, Robert G. Griffin *et al.*. Continuous-wave operation of a 460-GHz second harmonic gyrotron oscillator[J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 2006, **34**(3): 524~533
- 3 Colin D. Joye, Robert G. Griffin, Melissa K. Hornstein *et al.*. Operational characteristics of a 14-W 140-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization[J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 2006, **34**(3): 518~523
- 4 Lei Chaojun, Yu Sheng. Cavity for 8 mm second-harmonic gyrokystron amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1893~1897
雷朝军,喻 胜. 8 mm 二次谐波回旋速调管谐振腔设计研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(11): 1893~1897
- 5 Geng Zhihui, Liu Pukun. Design of a Ka-band second harmonic gyrokystron amplifier by using a self-consistent nonlinear simulation[J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 2006, **34**(3): 534~540
- 6 Lei Chaojun. Non-linear analyse of beam-wave interaction of 8 mm 2-harmonic gyrokystron [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(10): 1697~1701
雷朝军. 8 mm 二次谐波回旋速调管非线性分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(10): 1697~1701
- 7 Wang Jianxun, Luo Yong, Xu Yong. Analysis and design of the input coupler of a gyrokystron [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(6): 956~960
王建勋,罗 勇,徐 勇. 回旋速调管输入耦合器分析与设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(6): 956~960
- 8 Monica Blank, Bruce G. Danly, Baruch Levush *et al.*. Experimental investigation of W-band (93 GHz) gyrokystron amplifiers[J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1998, **26**(3): 409~415
- 9 Monica Blank, K. Felch, B. G. James *et al.*. Development and demonstration of high-average power W-band gyro-amplifiers for radar applications [J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 2002, **30**(3): 865~875
- 10 Birdsall K. G., Langdon A. B.. *Plasma Physics Via Computer Simulation*[M]. New York: McGraw-Hill, Inc., 1985