

3 mm低电压回旋管设计与模拟

黄勇^{1,2}, 李宏福¹, 喻胜¹, 罗勇¹, 牛新建¹, 徐勇¹, 雷朝军³

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

3. 中国人民武装警察部队学院基础部 河北 廊坊 065000)

【摘要】设计了一种3 mm低电压二次谐波渐变结构复合腔回旋管, 采用二次回旋谐波工作可以在获得高效率的同时, 降低工作磁场到基波工作所要求磁场的1/2, 使磁场系统简单紧凑。选择工作电压为25 kV, 可以降低回旋管对绝缘的要求和供电系统的体积及重量; 采用渐变结构复合腔控制模式竞争和提高效率; 工作模式为低损耗的 TE_{02}/TE_{03} 模式, 有利于连续波工作。通过对回旋管中谐振腔结构、模式竞争以及注-波互作用的研究, 分析了高频结构特性、寄生模式的抑制和工作参数优化等问题, 给出了模拟设计结果。

关键词 复合腔; 电子注; 回旋管; 低电压; 二次谐波

中图分类号 TN129

文献标识码 A

Design and Simulation of a 3 mm Low-Voltage Gyrotron

HUANG Yong^{1,2}, LI Hong-fu¹, YU Sheng¹, LUO Yong¹, NIU Xin-jian¹, XU Yong¹, and LEI Chao-jun³

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Information Equipment, Academy of Equipment Command and Technology Huairou Beijing 101416;

3. Foundation Department, Chinese People Armed Police Forces Academy Langfang Hebei 065000)

Abstract A 3 mm low-voltage second-harmonic complex cavity gyrotron with gradual transition is designed and evaluated with a particle-in-cell code. The high efficient gyrotron interaction can be achieved at the second harmonic. The insulation requirements of the gyrotron and the size and weight of the power supply can be reduced by setting the operation voltage at 25 kV. A diffraction-coupled complex cavity operating in the low ohmic loss TE_{02}/TE_{03} circular modes is introduced to control the mode competition problem and promote efficiency. The characteristics of RF structure, the suppression of parasite oscillations, and the optimization of work parameters are discussed. The PIC simulation results show that the gyrotron can generate 34 kW output power at 94 GHz with 34% operation efficiency.

Key words complex cavity; electron beam; gyrotron; low voltage; second harmonic

在微波武器、毫米波雷达、通信、精确制导、陶瓷烧结、热核聚变等离子体加热和高能物理等应用需求的推动下, 高功率相干毫米波源的研究受到了极大的关注, 成为研究前沿与热点。在等离子体物理学和相对论电子学的发展带动下, 人们开发出了能够在此波段有效工作的快波器件——回旋管^[1]。回旋管结构相对简单, 在很宽的频率范围, 特别是在毫米波和亚毫米波段能以多种方式产生脉冲峰值功率与连续波功率^[2]。高频率回旋管面临的一个严重问题是为了满足回旋谐振条件, 基波回旋管需要很强的工作磁场。如频率在94 GHz的回旋管, 为了保证工作模式与电子注回旋基波高效互作用, 需要大约3.5 T的直流磁场, 如果利用普通电磁线圈获得

如此强的磁场, 磁系统不仅笨重而且体积庞大, 使实用性变差, 特别是不利于要求高机动性的军事应用。谐波工作的回旋管所要求的磁场强度是基次回旋谐波工作的 $1/s$ (s 是谐波次数)。因此, 谐波回旋管的工作磁场系统能够得到极大的简化, 整管的体积和重量最终能适用于中等大小的军用直升飞机或车辆等机动平台^[3]。但是, 伴随着谐波次数的增加, 模式竞争问题越来越严重; 较高的注-波互作用效率也变得更加困难。

为了有效地工作在要求的回旋谐波, 高次谐波回旋管主要采用开槽波导腔结构大回旋电子注和光滑波导复合腔结构小回旋电子注两种方案。文献[4]提出复合谐振腔为解决模式竞争和提高效率提供了

收稿日期: 2008-05-23; 修回日期: 2008-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(DZ0203)

作者简介: 黄勇(1967-), 男, 博士, 副教授, 主要从事高功率微波毫米波技术方面的研究。

有效的途径,引起了高度的重视并受到深入的研究。1984年出现了工作于TE₄₁/TE₄₂模式对,谐振频率为33 GHz的二次谐波回旋管,输出功率为150 kW。1986年出现了三次谐波渐变结构复合腔回旋管,较高的电压下,在54 GHz获得10%的电子效率。文献[5]报道了工作于TE₄₂模式的二次谐波回旋管的实验结果,在电压为60~70 kV条件下得到了30%的效率、200 kW的输出功率,频率为42 GHz。文献[6]报道了工作于TE₆₁/TE₆₂模式,频率为35 GHz的三次谐波回旋管,电子效率为12%。文献[7]报道了国际上第1只频率为35 GHz的永磁包装3次谐波复合腔回旋管。文献[8]采用自治理论模拟计算了一个TE₀₂/TE₀₃模式的3 mm渐变结构复合腔回旋管,工作电压60 kV,最高效率达27%。

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-波相互作用进行详细、精确的模拟计算是十分重要的。随着计算机性能的不断提高,使得大量应用PIC粒子模拟方法到注-波相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着关键作用^[9-10]。

本文研究的复合腔,第一腔和第二腔通过渐变过渡段相连^[8]。首先用动力学理论分析了二次谐波TE₀₂/TE₀₃复合腔回旋管的工作特性,确定了工作参数;用复合腔高频结构优化设计程序设计了高频结构;然后通过PIC粒子模拟研究了复合腔回旋管中的注-波相互作用特性,给出了3 mm二次谐波低电压回旋管相互作用电路的设计结果。

1 动力学理论分析

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^[5]:

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

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; $H_s(r_c)$ 为与电子注引导中心半径相关的部分; $H_s(r_L)$ 为与电子拉莫尔半径相关的部分。

根据式(1)可得到二次谐波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 $r_c = 0.44r_w$ 时,电子注和第一腔中的工作模式TE₀₂⁽²⁾(上标表示谐波数)耦合最强。

谐振腔中回旋电子注分别与第一腔和第二腔中的腔膜TE₀₂和TE₀₃的非耦合色散曲线如图1和图2所示,电子注电压为25 kV,数度比为 $\alpha = 1.6$ 。从色散曲线可以看出,第一腔中可能的竞争模式有TE₂₁⁽¹⁾和TE₂₂⁽²⁾,第二腔中可能的竞争模式有TE₁₂⁽¹⁾、TE₄₁⁽¹⁾、TE₃₁⁽¹⁾和TE₂₃⁽²⁾。在复合腔中只存在1个模式对TE₀₂⁽²⁾/TE₀₃⁽²⁾,其他模式对不存在。寄生模式只分别存在于第一腔或第二腔中,竞争模式的起振电流远大于工作模式对,且可通过工作磁场很好地分离开^[2],因此,可以得到稳定的二次谐波输出。

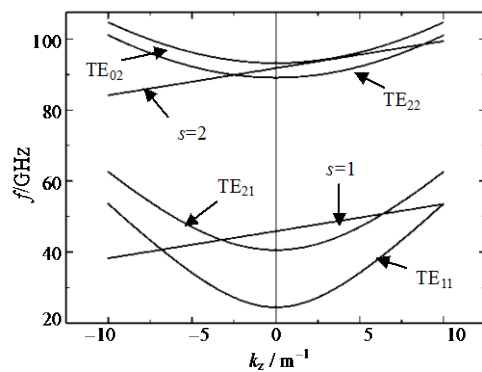


图1 TE₀₂二次谐波回旋管非耦合色散曲线

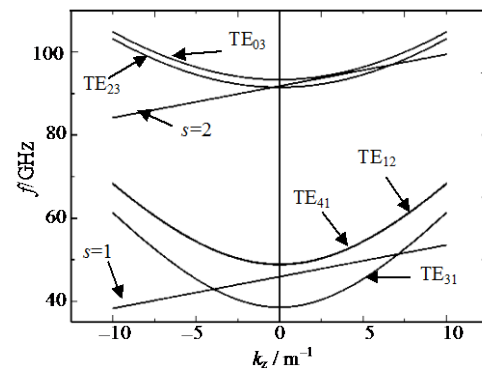


图2 TE₀₃二次谐波回旋管非耦合色散曲线

2 模拟计算与分析

复合腔回旋管的腔体尺寸与相互作用效率有密切的关系,因此,对渐变结构复合腔的高频结构进行优化设计非常重要。本文利用文献[6-8]中描述的渐变复合腔优化设计程序进行了计算,最终选取第一腔和第二腔的长度分别为2 cm和2.28 cm。编制了针对渐变结构复合腔回旋管的PIC粒子模拟程序,通过改变工作参数进行了大量模拟计算。

当磁场为1.72 T、工作电压为25 kV、工作电流为4 A、 $\alpha = \nu_{\perp}/\nu_{\parallel} = 1.6$ 时,本文得到了较理想的结果,如图3所示。注入电子后约120 ns,回旋管达到了稳态,输出功率为34 kW,器件效率为34%,横向

运动能量转换效率为48%。在注入电子后第120 ns时采集数据,对回旋管的工作状态进行监测分析,得到的结果如图4~图7所示。从图4可以看出,工作频率为94 GHz时没有寄生模式振荡,说明复合腔回旋管的设计很好地解决了模式竞争问题。从图5~6可以看出,复合腔中电场分布比较合理,第一腔中电场较弱,主要起到控制模式竞争和预群聚电子的作用;第二腔中电场比较强,在第一腔中被预群聚的电子与第二腔中电场猛烈作用,可以使回旋管工作于强受激振荡状态,这是获得高相互作用效率的重要原因。从图7可以看出,电子注群聚良好,回旋管工作于二次谐波,形成两个群聚中心。

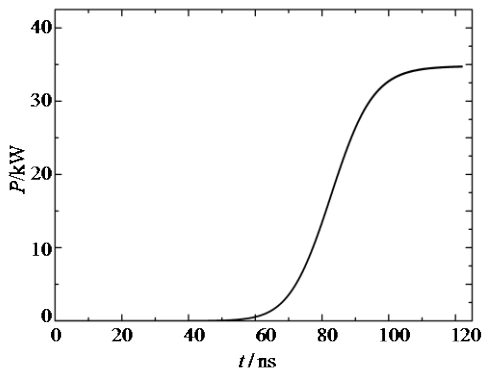


图3 输出功率随时间的变化关系

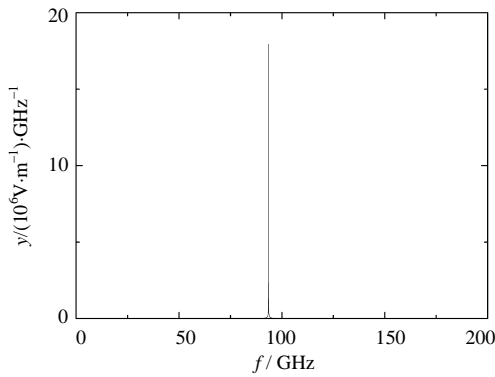


图4 角向电场频谱图

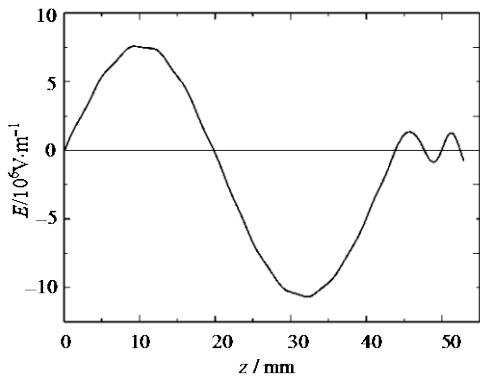


图5 角向电场沿轴向长度的变化关系

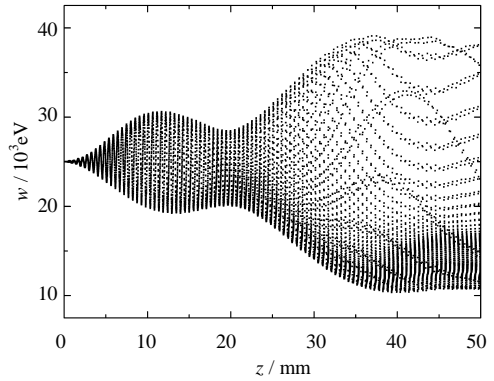


图6 电子能量沿轴向长度的变化

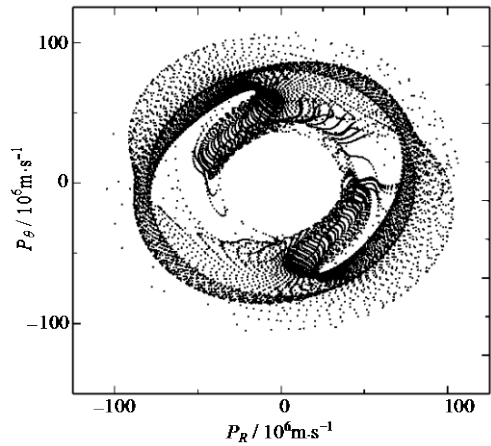


图7 电子横向相空间图

3 结 束 语

本文设计了一种紧凑且高效率的94 GHz低电压二次谐波渐变结构复合腔回旋管,工作在低损耗的TE₀₂/TE₀₃模式对,可进行连续波工作,能应用于要求高机动性的装备。所需要的磁场为1.72 T,可由小体积的高温超导磁铁提供;工作电压为25 kV,大大降低了对绝缘的要求和电源系统的体积、重量,系统总重量可控制在1 000 kg以下,可应用于高机动定向能系统。PIC粒子模拟表明当磁场1.72 T、 $\alpha = v_{\perp} / v_{\parallel} = 1.6$ 、工作电压25 kV、工作电流4 A时,可得到34%的效率,输出功率为34 kW。

参 考 文 献

[1] SCHNEIDER J. Stimulated emission of radiation by relativistic electrons in a magnetic field[J]. Phys Rev Lett, 1959, 2: 504-508.
 [2] NUSINOVICH G S, SINITSYN O V, ANTONSEN Jr T M. Mode switching in a gyrotron with azimuthally corrugated resonator[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98: 205101.
 [3] MCDERMOTT D B, STATZMAN R C, BALLKCUM, et al. 94 Hz 25 kW CW low-voltage harmonic gyrotron[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1998, 26(3): 402-408.
 [4] 喻 胜, 李宏福, 谢仲怜, 等. 8 mm波段三次谐波复合腔

- 回旋管的非线性分析[J]. 物理学报, 2001, 50(10): 1979-1983.
- YU Sheng, LI Hong-fu, XIE Zhong-lian, et al. A nonlinear analysis on 8mm band third-harmonic complex cavity gyrotron with gradual transition. Acta Physica Sinica, 2001, 50(10): 1979-1983.
- [5] KARTIKEYAN M V, BORIE E, PIOSCZYK B, et al. Design of a 42GHz 200kW gyrotron operating at the second harmonic[J]. IEEE Trans on Microwaves Theory and Techniques, 2004, 52(2): 243-248.
- [6] HUANG Y, LI H F, DU P Z, et al. Third-harmonic complex cavity gyrotron self-consistent nonlinear analysis[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1997, 25(6): 1406-1410.
- [7] LI H F, XIE Z L, WANG W X, et al. A 35GHz low-voltage third-harmonic gyrotron with a permanent magnet system[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2003, 31(2): 264-271.
- [8] 刘睿, 喻胜, 李宏福. 3mm波段二次谐波渐变复合腔回旋管的非线性模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(3): 418-421.
- LIU Rui, YU Sheng, LI Hong-fu. Nonlinear simulation on 3 mm band second-harmonic complex cavity gyrotron with gradual transition[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(3): 418-421.
- [9] 雷朝军, 喻胜, 鄢然, 等. 注-波相互作用中的功率流隐含信息分析[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(5): 921-923.
- LEI Chao-jun, YU Sheng, YAN Ran, et al. An analysis of meaning of field power in PIC simulation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(5): 921-923.
- [10] 殷瑞剑, 刘濮鲲. Ka波段三段损耗波导结构二次谐波回旋波放大器的模拟与设计[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(1): 16-20.
- YIN Rui-jian, LIU Pu-kun. Primary design of a Ka-band three stage distributed loss second-harmonic gyrotron traveling wave amplifier[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 27(1): 16-20.

编辑 黄莘

· 科研成果专利介绍 ·

微波倍频调制收发器

微波倍频调制收发器由微带双频双极化天线和微波倍频调制电路组成。其结构特征是其天线板与调制电路板背靠背地安装在一块金属板上, 通过微带同轴垂直转换将两部分电路相联接。电路特征是采用了双频双极化天线和高效率的微波倍频调制电路。该微波倍频调制收发器结构紧凑、效率高、生产成本低、便于批量生产, 适用于用微波作为信息载波的无接触式电子信息识别系统。

激发式频率产生器

激发式频率产生器是一种频率产生技术, 具有地说是一种激发式频率发生器在受到具有一定能量的频率信号激发后, 能产生一组符合指标要求的频率信号, 包括电源转换电路、分频及混频电路, 其特征是电源转换电路接收供能频频信号后, 将供能频频信号的能量转换成电能为分频及混频电路提供工作电压, 分频及混频电路接收供能频频信号后能产生符合调制要求的上边频信号、调制码率信号和下边频信号。该激发式频率产生器可广泛应用于无线点式信息识别系统。