

W 波段回旋行波管仿真设计与热测实验

邓学¹, 唐勇¹, 罗勇¹, 王丽¹, 王沙飞^{2*}

(1. 电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054;

2. 中国北方电子设备研究所, 北京 100191)

摘要: 通过软件仿真方法分析和设计了 W 波段回旋行波管的输入输出耦合器、磁控注入式电子枪以及高频相互作用电路, 根据优化结果加工了实物并进行了热测实验. 实验结果表明, 电子注电压 60 kV, 电流 6 A, 在 94 GHz 频率获得了最大峰值功率 78 kW, 增益 53.9 dB 以及 21.7% 的效率, 峰值功率大于 50 kW 带宽达到 3.8 GHz. PIC 粒子模拟和热测实验均表明, 设计的 W 波段回旋行波管能够稳定的工作, 从而证明周期加载高频相互作用电路在抑制寄生模式以及自激振荡方面具有很大的优势.

关键词: 软件仿真; W 波段; 回旋行波管; 热测实验; PIC 粒子模拟

中图分类号: TN129 **文献标识码:** A

Simulation and hot test of a W-band gyro-TWT

DENG Xue¹, TANG Yong¹, LUO Yong¹, WANG Li¹, WANG Sha-Fei^{2*}

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

2. North Electronic Device Research Institute, Box 947, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper has designed the input and output coupler, Magnetron Injection Gun (MIG) and beam-wave interaction circuit for a W-band gyrotron traveling tube (gyro-TWT) with software simulation. The tube was manufactured according to the optimized results. The gyro-TWT is driven by a voltage of 60 kV and current of 6 A. Hot test predicts its maximum peak output power of 78 kW, 21.7% efficiency at 94 GHz with a gain of 53.9 dB. The bandwidth with peak power greater than 50 kW is about 3.8 GHz. Both the PIC simulation and hot test indicated that the gyro-TWT can work stably. The periodic lossy dielectric loaded circuit is excellent for suppressing potential spurious oscillations and absolute oscillation.

Key words: software simulation, W-band, gyro-TWT, hot test, PIC simulation

PACS: 41.20.Jb

引言

回旋行波管 (gyro-TWT) 是一种能够在毫米波到太赫兹段产生数百千瓦级的脉冲功率, 并且具有很宽的带宽, 因此在军用高分辨率成像雷达、非致命性武器、电子对抗以及民用陶瓷烧结、受控热核聚变等离子体加热等方面均有不可替代的作用^[1-3]. 但是, 回旋行波管早期的发展长期滞后于其他回旋器件的研究, 这主要是受到工作模式的绝对不稳定性以及返波振荡的影响, 致使其输出功率以及带宽长

期以来得不到提高^[1,4-5]. 通过国内外不懈的努力, 提出了许多注波相互作用电路来解决回旋行波管振荡问题, 这其中最主要也是发展最迅速的有两种结构. 第一种, 在波导相互作用电路内壁加载介质^[1-5]. 台湾清华大学 (NTU) 朱国瑞率领的团队首先系统的用理论以及实验的方法分析了圆波导回旋行波管相互作用电路模式竞争问题, 提出了分布式介质加载高频结构, 并成功研制了电子注效率 26%, 3 dB 带宽 8.6% 的超高增益 (70 dB) Ka 波段 TE₁₁ 模式回旋行波管^[2]. 美国海军实验室 (NRL) 采用陶瓷介质加载

收稿日期: 2014-07-14, 修回日期: 2015-01-15

基金项目: 国家重大专项基金项目 (2013ZX01011001)

Foundation items: Special funds for major national projects (2013ZX01011001)

作者简介 (Biography): 邓学 (1964), 男, 吉林长春人, 讲师, 硕士研究生, 主要研究领域为高功率微波毫米波器件及其应用. E-mail: dx@uestc.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: rockingsandstorm@163.com

Received date: 2014-07-14, revised date: 2015-01-15

相互作用电路,在 Ka 波段获得了饱和峰值功率 137 kW,饱和增益 47 dB,效率 17% 以及 3 dB 带宽 1.11 GHz^[6]. 第二种方式,采用螺纹波导改变圆波导的色散曲线,减少模式的耦合数来抑制模式竞争. 对螺纹波导回旋行波管的研究主要集中在俄罗斯的应用物理研究所(IAP)以及英国的斯特拉斯克莱德大学等单位,并且在理论以及实验上都取得了很多重要的成就^[7-8]. 国内回旋行波管的研究主要集中在电子科技大学、中国科学院电子学研究所以及中电十二所,特别是对介质加载回旋行波管的理论以及实验研究取得了许多瞩目的成就,某些成果甚至于已经达到了国际领先水平^[4-5, 9-16].

W 波段因其在穿透云雾等方面具有更优越的性能,而且具有更宽的带宽以及高的功率容量,因此近年来吸引了大量的学者研究 W 波段回旋行波管^[3, 5, 10-11]. 早期美国瓦里安公司(Varian)研制的第一支 W 波段回旋行波管产生了 20 kW 输出功率, 30 dB 增益, 8% 效率以及 2% 的带宽^[16]. 美国加州大学戴维斯分校(UCD)研制的 W 波段介质加载回旋行波管在 92.2 GHz 得到了 59 kW 饱和功率以及 42 dB 增益, 3 dB 带宽 1.2 GHz^[3]. 国内杜朝海等人从理论上设计出工作电压 70 kV, 电流 3 A 以及速度比 1.5 的 W 波段回旋行波管,在保持输入功率小于 0.4 W 情况下,获得了效率 32.4%, 输出功率 50 kW, 带宽达到 4.2 GHz^[15]. 本实验室在 W 波段介质加载回旋行波管的理论以及实验研究也取得了相当重要的成果,注波相互作用的理论研究以及实验研究分别发表在参考文献^[10-11]中,本文将结合实验室的工作,通过仿真和实验方法来设计和研究 W 波段周期加载回旋行波管. 本文余下部分的组织结构如下:第一部分用 CST-PS 软件研究电子枪(MIG),用 PIC 粒子模拟高频注波相互作用过程以及高频软件 HFSS 设计输入输出系统;第二部分通过实验研究 W 波段回旋行波管;最后在文章第三部分给出全文总结.

1 仿真研究

1.1 磁控注入式电子枪(MIG)

注波相互作用所需要的小轨道回旋电子注由磁控

注入式电子枪产生,产生的电子注性能直接影响整个相互作用过程的换能. 由于 W 波段回旋行波管电子注通道(注波相互作用高频结构半径 r_w)非常狭窄,所以为了保证电子注在整个相互作用区的流通率,设计电子枪时要求电子注的引导中心半径(r_g)尽可能小,但是较小的引导中心半径会影响相互作用强度,所以引导中心半径选择 $0.4r_w \sim 0.45r_w$ (r_w 为相互作用波导半径)是比较合理的. 根据布虚定理(1)式(式中 f_m 为磁压缩比, r_L 为电子注做回旋运动的拉莫半径, r_c 为发射带半径)可知,通过增大磁压缩比可以减小电子注的引导中心半径 r_g ^[17].

$$r_g = (r_c^2/f_m + r_L^2)^{1/2} \quad (1)$$

横向速度 β_{\perp} 以及速度比 α 由公式(2)以及(3)给出^[17-18]:

$$\beta_{\perp} \approx \frac{1}{\gamma} \sqrt{f_m} \frac{E_c \cos\theta_c}{B_c} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\sqrt{f_m}}{B_c} \cdot \frac{V_a (\cos\theta_c)^2}{r_c \ln(1 + \mu D_f)} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\beta_{\perp}}{\sqrt{1 - \gamma^{-2} - \beta_{\perp}^2}} \quad (3)$$

式中, E_c 为阴极区电场, γ 为相对论因子主要由电子注电压(U_e)决定, V_a 为调制极电压, D_f 为阴极与第一阳极间距, θ_c 是阴极倾斜角度, r_c 是发射带半径, μ 为柱几何因子. 本文对电子枪的设计首先通过理论公式(1)~(3)对电子枪结构进行初始化设计,然后用 CST 建模进行仿真优化. 理论以及 CST 优化后的参数如表 1 所示.

图 1 所示为电子枪 CST 仿真时的 3D 模型以及轴向磁场分布. 电子枪的磁场是一个缓变磁场,在电子枪的出口端为常值. 阴极采用热发射,电子从发射带出来以后,通过电场加速并在缓变磁场中逐步形成稳定的回旋电子注. 图 2 所示为电子注速度离散以及速度比随着电子注电压以及磁压缩比的变化情况. 由图 2(a)可知,电子注电压从 56~64 kV 变化时,电子注速度比从大约 1.14~1.24 变化,而速度离散在 60~62 kV 范围内达到最小值约为 2.65%. 图 2(b)中可以看出,电子注的速度比在磁压缩比为 11.4~12.6 整个范围内变化非常小,而速度离散在整个范围内呈现下降的趋势. 从图 2 总体可以看出,电子注对磁压缩比以及电子注电压的变化不是太敏

表 1 电子枪优化参数

Table1 The optimized parameters for MIG

电子注电压/ U_e	调制极电压/ V_a	电流/ I_0	引导磁场/ B_0	磁压缩比/ f_m	速度比/ α	轴向速度离散/ $\Delta\beta_z$	阴极半径/ r_c
60 kV	35-38 kV	8 A	3.5 T	12.2	1.2	2.7%	2.95 mm

感,设计的电子枪可以稳定的工作.

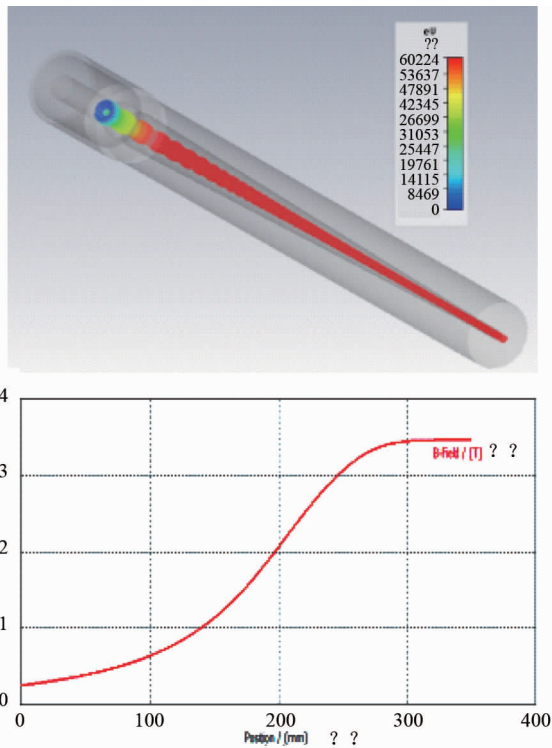


图1 磁控注入式电子枪 CST 三维仿真模型以及轴向磁场分布
Fig.1 MIG CST 3D simulation model and distribution of the magnetic field for the gyro-TWT

1.2 注波相互作用电路

W 波段回旋波管光滑波导注波相互作用色散曲线如图 3 所示,其中曲线为波导模式,直线为电子注回旋模式.该相互作用电路主要容易产生以下两种不稳定性:一种是工作模式在截止频率附近产生绝对不稳定性;另一种是 TE_{11} 、 TE_{21} 、 TE_{02} 在返波区 ($k_z < 0$) 与电子注回旋模式相交产生寄生模式的返波振荡^[2,10-11].本实验所采用的注波相互作用结构 PIC 粒子模拟仿真如图 4 所示,高频结构采用介质加载来抑制模式竞争,以此保证回旋波管有稳定的输出功率以及频谱.仿真的基本参数如表 2 所示.电子注沿着 z 向的相位分布如图 4 所示,在输入段以及周期介质加载段,电磁波主要对电子注进行调制,调制好的电子注进入非线性段激发出自身所携带的高频信号,并与激发信号发生剧烈的相互作用,将自身的

表 2 注波相互作用高频电路优化参数

Table2 Optimized parameters for beam-wave interaction circuit

相互作用段总长度/L	介质介电常数/P	引导中心半径/ r_g	速度比/ α	电流/ I_0	电压/U	磁场失谐/ B_0/B_g
112 mm	10-4j	0.85 mm	1.2	8 A	60 kV	0.98

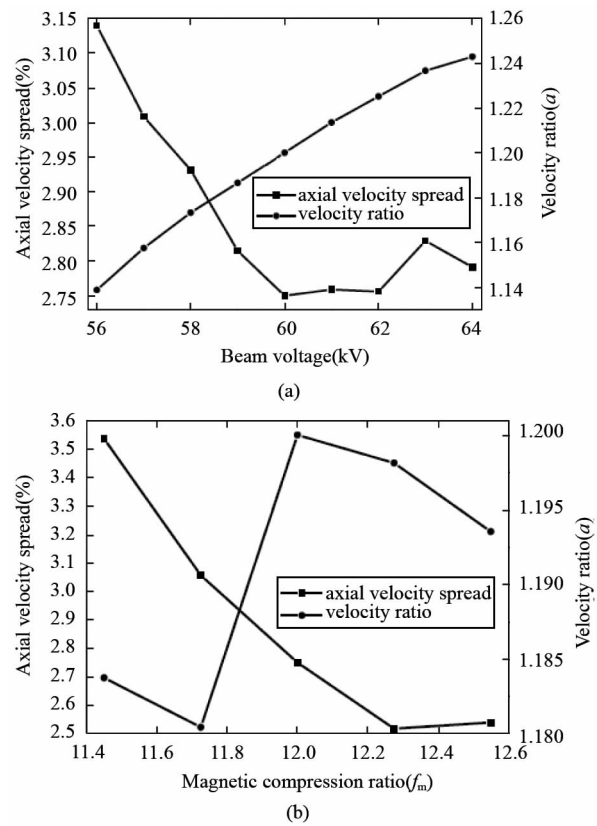


图 2 速度离散以及速度比随着 (a) 电子注电压以及 (b) 磁压缩比的变化
Fig.2 Axial velocity spread and velocity ratio as a function of (a) beam voltage and (b) magnetic compression ratio

能量交给电磁波从而实现场的放大.输出功率以及频谱如图 5 所示,由图 5 可知,输出功率有一个建立的过程并在 5 ns 后趋于稳定,从输出频谱中也没有观察到振荡信号,这充分说明了本论文所采用的介质加载方式对抑制回旋波管振荡是非常有效的.保持其他参数如表 2 所示,输出功率随着工作电压 (U_e) 以及引导磁场失谐量 (B_0/B_g) 的变化如图 6 (a) 和 (b) 所示,由图可知,二者的变化趋势基本保持一致,都是随着参量的变大先增大而后减小,在电压为 58 kV 以及磁场失谐为 0.985 时取得最大值.需要注意的是,当磁场失谐因子大于 1 时,输出功率不稳定,此时出现了振荡.图 6(c) 所示为输出功率以及增益在 93 ~ 97 GHz 频率范围内的变化,在 93.5 GHz 时得到了 158 kW 峰值功率,32.9% 电子

注效率以及 71.6 dB 增益. 从图 6(c) 也可以知道, 在低频端的增益要大于高频段的增益, 这是因为在低频端的耦合阻抗较大, 在高频端的耦合阻抗较弱.

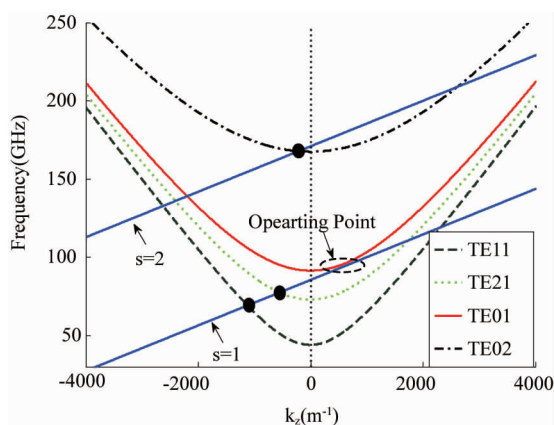


图3 W 波段光滑波导注波相互作用曲线
Fig. 3 Dispersion curves of the W-band gyro-TWT with smooth waveguide

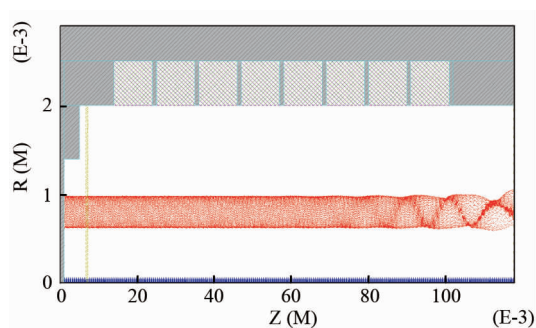


图4 PIC 粒子仿真模型以及电子沿 z 向的分布
Fig. 4 PIC particle simulation model and electron beam distribution in z-direction

1.3 输入输出结构

输入耦合器通过标准的 BJ-900 矩形波导注入 TE_{10} 模式微波信号, 在同轴腔体中激励出 TE_{511} 模式, 通过开的五个缝在圆波导中耦合出回旋波管工作模式 TE_{01} ^[19]. 为了增加带宽, 本实验所用的输入耦合器在电子入口的漂移段采用了一个渐变结构 (taper), HFSS 仿真模型以及仿真结果如图 7 所示. 从图 7(a) 可以看出, 输入耦合器在注波相互作用结构中激励出了纯的 TE_{01} 模式, 由图 7(b) 可知在传输系数 $S_{21} > -0.35$ dB, 反射 $S_{11} < -10$ dB 情况下得到了约 4.2 GHz 带宽, 满足 W 波段回旋波管的设计要求.

回旋波管输出耦合器要求尽量小的反射, 如果反射过大, 较多的微波能量返回注波相互作用电路, 返回的微波能量会对电子注进行调制, 从而扰乱整

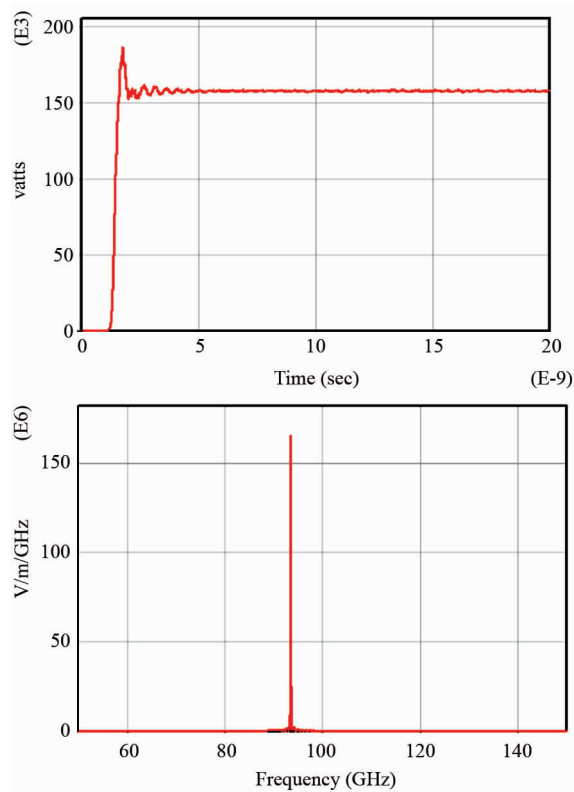


图5 右输出端口观察的输出功率以及频率
Fig. 5 Simulation results of output power and spectrum at right output port

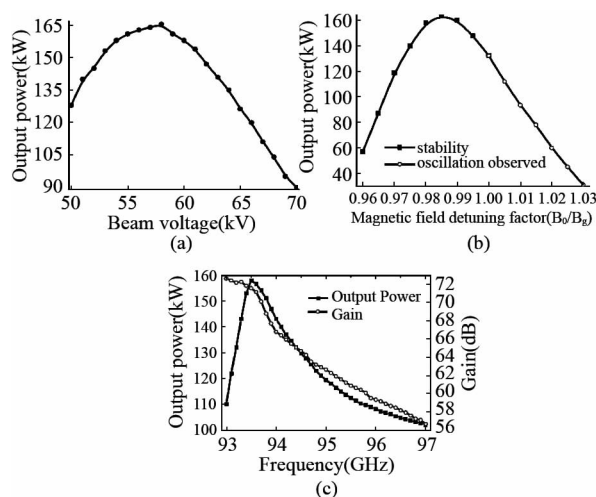


图6 输出功率随着不同参数的变化。(a) 电子注电压; (b) 引导磁场失谐因子; (c) 频率
Fig. 6 Output power changes with different parameters. (a) Beam voltage, (b) magnetic field detuning factor, and (c) frequency

个相互作用过程. 常用的回旋波管输出结构多为线性渐变以及正余弦渐变波导. 理论以及实验表明, 同等长度的切比雪夫 (Cheybshev) 渐变结构的传输性能要优于其他结构. 切比雪夫渐变波导的半径 r 随 z

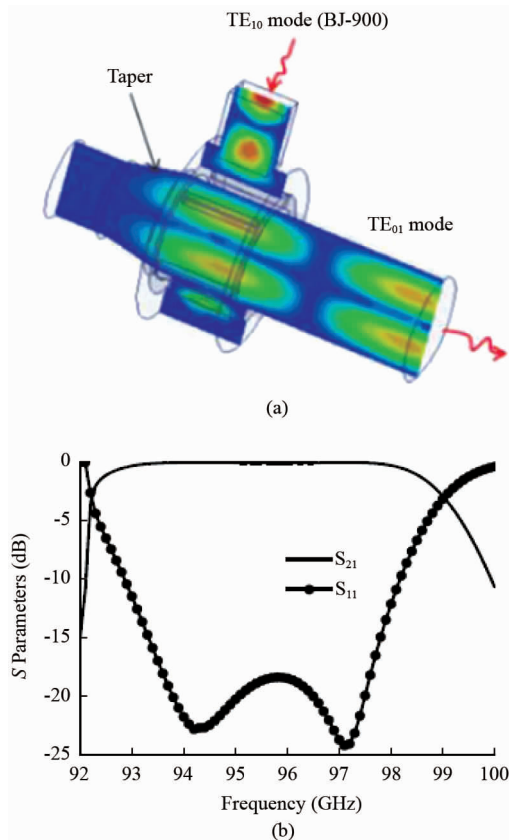


图 7 TE₀₁模输入耦合器, (a) HFSS 仿真模型以及 (b) S 参数仿真结果
Fig. 7 TE₀₁ mode input coupler, (a) HFSS model and (b) simulation results of S-parameters

轴变化如以下公式所示^[20]:

$$\ln(r(\xi)/r_1) = \ln(r_2/r_1) \int_{-\theta}^{\xi} k(\xi') d\xi' \quad (4)$$

$$z(\xi) = \frac{2k_0}{x_m^2 - x_n^2} \int_{-\theta}^{\xi} r^2(\xi') d\xi' \quad (5)$$

$$k(\xi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_0[\theta \sqrt{1 - (\xi/\theta)^2}]}{\sinh\theta} \quad (6)$$

其中, I_0 为零阶变态 Bessel 函数, r_1 为初始端半径, r_2 为输出端半径, k_0 为真空中的波数, x_m 和 x_n 分别为 m 阶和 n 阶 Bessel 函数一阶导数的根; $k(\xi)$ 为切比雪夫分布函数, θ 为切比雪夫分布的边界值. 本实验采用的是改进后的双级切比雪夫输出结构 (CCW), 如图 8 所示. 图 9 为常规的单级切比雪夫输出结构 (RCW) 以及双级切比雪夫输出结构的 S 参数仿真结果. 由图 9 可知, 相对于 RCW 来说, 改进后的 CCW 传输性能明显更加优越.

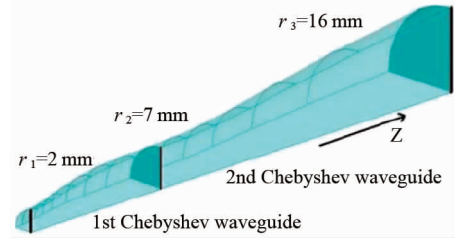


图 8 双级 Chebyshev 输出耦合器结构
Fig. 8 Structure of the CCW

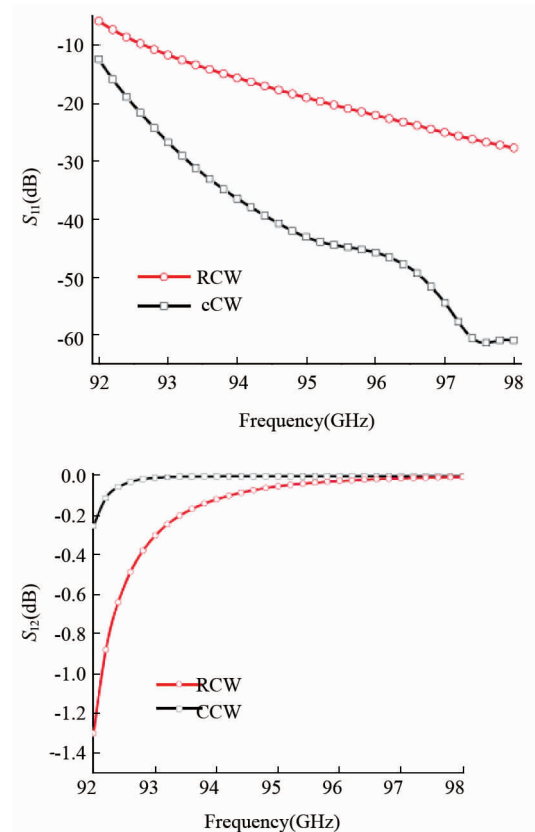


图 9 CCW 以及 RCW 输出耦合器 S 参数仿真结果对比
Fig. 9 Comparison of S-parameters simulated for CCW and RCW output coupler

2 W 波段回旋波管实验研究

利用优化设计的高频结构以及电子枪, 输入输出结构, 加工了 W 波段回旋波管样管并进行了热测实验, 高频损耗材料采用 SiC 陶瓷. 实验平台如图 10 所示, 本实验采用能达到 4T 的超导磁体为电子注提供回旋运动所需磁场. 前级驱动信号由固态放大器所提供, 实际热测实验中观察到的电子注电流为 6 A. 热测结果以及电流为 6 A 的 PIC 仿真结果如图 11(a) 所示, 占空比为 2%, 在 94 GHz 处获得了最大峰值输出功率 78 kW, 53.9 dB 增益以及 21.7%



图 10 W 波段回旋行波管热测平台
Fig. 10 Hot test platform of W-band gyro-TWT

效率,峰值功率大于 50 kW 带宽达到 3.8 GHz. 通过频谱仪(图 11(b))只能观察到工作模式一根谱线,实验再一次验证了回旋行波管加载方式对抑制返波寄生模式以及自激振荡的有效性. 值得注意的是,热测结果与仿真结果(图 6)基本趋势保持一致,但也存在较大的差别,这是因为仿真时采用的是没有速度离散的理想电子注,而且实验管内或多或少存在一些气体,实验中的电流也小于仿真的电流,并且回旋行波管本身也是一个庞大的系统,由于加工误差以及装配误差等因素,也会导致回旋行波管的热测结果与仿真结果有一定的差别. 在整个带宽内,回旋行波管的增益基本呈现随着频率的增加而下降的趋势(图 11(a)),与仿真趋势一致,但是整体却小于仿真结果,这是因为输入功率在整个传输链路会有功率损耗,输入器件内部的功率要比测试的输入功率小很多,所以器件实际的增益要比热测实验中的增益大. 在热测实验中发现,随着电流的升高,回旋管的峰值功率会提高,但是电子注效率却有所下降,这主要是因为介质材料在高功率条件下容易释放气体,导致管内真空度下降,从而扰乱回旋行波管正常的工作. 如果提高占空比,也会导致相同的结果. 所

以高导热、高稳定性的介质材料一直是回旋行波管研究的重点课题.

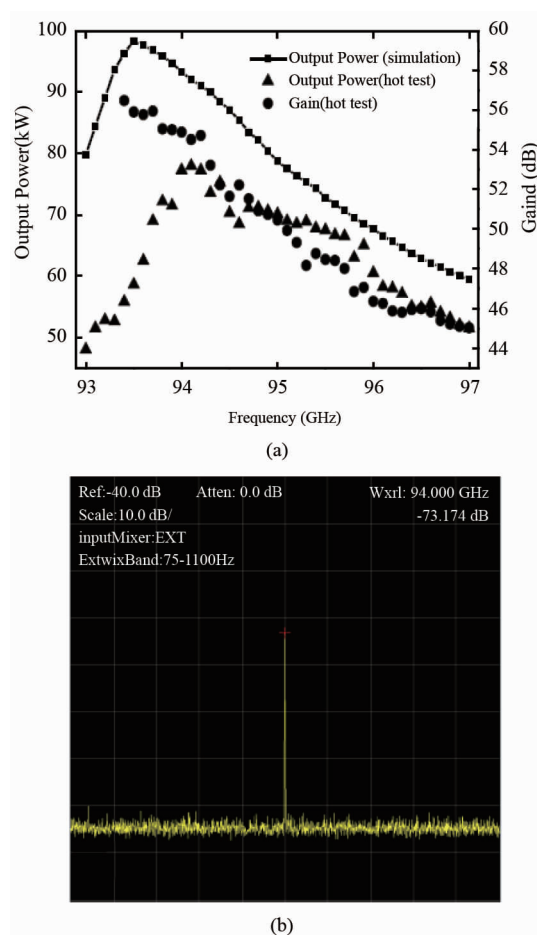


图 11 (a) 热测实验输出功率以及增益,以及(b) 输出频谱
Fig. 11 (a) Output power and gain of hot test results and (b) spectrum

3 总结

本文通过软件仿真的方法设计了 W 波段回旋行波管的输入输出耦合器,磁控注入式电子枪以及高频注波互作用电路. 高频互作用电路采用周期介质加载的方式来抑制返波寄生模式振荡以及工作模式的自激振荡. 在电子注电压 60 kV, 电流 6 A, 占空比 2%, 热测实验在 94 GHz 频率获得了最大峰值功率 78 kW, 增益 53.9 dB 以及 21.7% 的电子注效率, 峰值功率大于 50 kW 的带宽达到 3.8 GHz. 实验测试电流小于设计电流, 主要是因为电流提高后管内真空度下降, 导致介质材料释放气体, 使回旋行波管不能稳定工作. 所以还需要加大力度研究高导热、高稳定性的介质材料.

References

- [1] CHU K R. The electron cyclotron maser [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2004, **76**(2): 489 - 540.
- [2] CHU K R, CHEN Han-Ying, HUANG Chien-Lung, *et al.* Theory and Experiment of Ultra high Gain Gyrotron Traveling Wave Amplifier [J]. *IEEE Trans. On Plasma Science*, 1999, **27**(2): 391 - 403.
- [3] SONG H H, McDermott D B, Hirata Y, *et al.* Theory and experiment of a 94 GHz gyrotron traveling-wave amplifier [J]. *PHYSICS OF PLASMAS*, 2004, **11**(5): 2935 - 2941.
- [4] YAN Ran, LUO Yong, LIU Guo, *et al.* Design and Experiment of a Q-band Gyro-TWT Loaded With Lossy Dielectric [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, **59**(12): 3612 - 3617.
- [5] DU Chao-Hai, LIU Pu-Kun. A Lossy Dielectric Ring Loaded Waveguide with Suppressed Periodicity for Gyro-TWTs Applications [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2009, **56**(10): 2335 - 2342 .
- [6] Garven M, Calame J P, Danly B G, *et al.* A gyrotron traveling wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 2002, **30**(3): 885 - 893.
- [7] Bratman V L, Cross A W, Denisov G G, *et al.* High-gain-wide-band gyrotron travelling wave amplifier with a helically corrugated waveguide [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2000, **84**(12): 2746 - 2749.
- [8] Cross A W, HE W L, Phelps A D R, *et al.* Helically corrugated waveguide gyrotron traveling wave amplifier using a thermionic cathode electron gun [J]. *Appl. Phys. Lett*, 2007, **90**(25): 253501 - 253501 - 3.
- [9] GENG Zhi-Hui, LIU Pu-Kun, SU Y N, *et al.* Design and Simulation of an Ultra-Broadband Ku-Band Gyro-TWT for Radar Applications [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 2008, **29**(10): 627 - 633 .
- [10] YAN Ran, TANG Yong, LUO Yong. Design and Experimental Study of a High Gain W-Band Gyro-TWT with Non-uniform Periodic Dielectric Loaded Waveguide [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, **61**(7): 2564 - 2569.
- [11] TANG Yong, LUO Yong, XU Yong, *et al.* Self-consistent Nonlinear Analysis and 3D Particle In Cell Simulation of a W-band Gyro-TWT [J]. *Int J Infrared Milli Waves*, 2014, DOI 10.1007/s10762 - 014 - 0087 - 7.
- [12] WANG E-Feng, ZENG Xu, LIU Bentian, *et al.* Experimental Study of High-Power Gyrotron Traveling-Wave Tube With Periodic Lossy Material Loading [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, **40**(7): 1846 - 1853.
- [13] 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.
- [14] 来国军, 刘濮鲲. W 波段回旋行波管放大器速度零散的分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(6): 447 - 450.
- [15] DU Chao-Hai, CHANG Tsun-Hsu, LIU Pu-Kun, *et al.* Design of a W-band Gyro-TWT Amplifier With a Lossy Ceramic-Loaded Circuit [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, **60**(7): 2388 - 2394.
- [16] Granatstein V L, Levush B, Danly B G, *et al.* *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1997, **25**, 1322.
- [17] Lawson W. Magnetron injection gun scaling [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci*, 1988, **16**(2): 290 - 295.
- [18] JIANG Wei, LUO Yong, YAN Ran. *Computational Design and Optimization of a Magnetron Injection Gun* [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, **61**(7): 2547 - 2551.
- [19] 徐勇, 罗勇, 王建勋, 等. 34GHz TE01 模基波回旋速调管高频系统设计与实验 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, **32**(6): 531 - 537.
- [20] WANG Hui, LI Hong-Fui, LUO Yong. *Analysis and Design of Ka-Band Gyro-TWT Output Structure with Dolph Chebyshev Waveguide Taper* [C]. 2008 *International conference on Infrared and Millimeter Waves and THz Conference*, 2008.
- [19] HAN J, ZHANG W, CHEN W, *et al.* Far-infrared characteristics of ZnS nanoparticles measured by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2006, **110**(5): 1989 - 1993.
- [20] JOHNSON K M. Variation of dielectric constant with voltage in ferroelectrics and its application to parametric devices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **33**(9): 2826 - 2831.
- [21] CHEN Y C, WU L, CHOU Y P, *et al.* Curve-fitting of direct-current field dependence of dielectric constant and loss factor of Al₂O₃-doped barium strontium titanate. *Mater. Sci. Eng. B*, 2000, **76**(2): 95 - 100.
- [22] CHEN F S. Optically induced change of refractive indices in LiNbO₃ and LiTaO₃ [J]. *Journal of applied physics*, 2003, **40**(8): 3389 - 3396.
- [23] WOIKE T, WECKWERTH G, PALME H, *et al.* Instrumental neutron activation and absorption spectroscopy of photorefractive strontium-barium niobate single crystals doped with cerium [J]. *Solid state communications*, 1997, **102**(10): 743 - 747.
- [24] BUSE K, ADIBI A, PSALTIS D. Non-volatile holographic storage in doubly doped lithium niobate crystals [J]. *Nature*, 1998, **393**(6686): 665 - 668.

(上接 568 页)