

非周期同心圆弧折叠波导行波管的 永磁聚焦系统设计

咎铭睿^{1,2} 朱方² 王小霞^{2*}

(1. 中国科学院大学 北京 100049; 2. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

Design of Permanent Magnetic Focusing System of Concentric Arc Folded Waveguide TWT

ZAN Mingrui^{1,2}, ZHU Fang², WANG Xiaoxia^{2*}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract A magnet focusing system for W-band concentric arc folded-waveguide traveling wave tube (TWT) is developed. Based on the technical specifications of W band concentric arc folded waveguide TWT, a uniform permanent magnet focusing system is designed and tested. The beam tunnel is 0.3 mm and the length is 40.5 mm. The simulation result shows that when the voltage between the anode and cathode is 6 kV, a current of 120 mA can be generated, and the beam transmission rate is 100%. The test result is in agreement with the simulation result. The test result shows that the beam transmission rate is 90% with a voltage of 6 kV.

Keywords Traveling wave tube, Concentric arc folded waveguide, Permanent magnetic focusing

摘要 开展了对非周期折叠波导行波管永磁聚焦系统的研究。基于 W 波段非周期折叠波导行波管的技术指标,根据理论分析和电磁仿真,设计了一套均匀永磁聚焦的电子光学系统,并进行了实物加工与测试。仿真结果表明,在电子主通道直径 0.3 mm,长度为 40.5 mm 的条件下,阴阳极电压差为 6 kV,可以产生 120 mA 的电流,电子通过率 100%。测试结果表明,在阴阳极施加 6 kV 的电压时,阴极发射电流为 120 mA,电子通过率为 90%,满足高频结构设计要求。

关键词 行波管 同心圆弧折叠波导 永磁聚焦

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312016

W 波段行波管(TWT)在卫星地面通信、高分辨率雷达、精确跟踪、电子对抗、深空探测等方面具有广泛的应用前景^[1-3]。目前,美国、法国和中国已经开发了 W 波段脉冲 TWT。这些 TWT 的峰值输出功率在 100 瓦左右,工作电压和电流均高于 21 kV,增益平坦度超过 5 分贝^[4-6]。

折叠波导作为行波管的核心部件器件,对行波管小型化的发展具有重要意义,并且由于其自身的全金属结构,在稳定性、导热性、高可靠性^[7-9]等方面具有天然的优势,已经成为 W 波段行波管首选的慢波结构。为了获得高输出功率, W 波段通常选择相对较高的工作电压和电流,这会限制设备的广泛

应用。因此,降低工作电压和改善其增益波动成为突破 W 波段行波管高功率的关键问题。

中国科学院空天信息创新研究院已经成功设计了峰值功率大于 233W 的 W 波段同心圆弧非周期折叠波导行波管的高频结构,电子效率可达 32.4%^[10]。根据慢波结构设计结果,在工作电流 6 kV 的条件下,需要 120 mA 的工作电流通过慢波结构。相比于目前所报道的周期折叠波导行波管,非周期折叠波导行波管在工作电压和电子效率等方面具有显著优势。但与此同时,低压的工作条件会导致聚束电子注所需的布里渊磁场变大,这给电子光学磁聚焦设计带来困难。国内各单位目前采

用的周期永磁聚焦方式在现有技术指标下极难实现,因此,本文采用均匀永磁聚焦约束电子注的方式,设计一种满足所需高频结构技术指标的均匀永磁聚焦系统。

1 电子枪设计

微波器件是通过电子注与电磁波之间进行能量交换,获得高功率电磁波输出的器件。电子枪用于电子注的产生,是微波器件的关键组成部分。设计电子枪的流程一般为先使用皮尔斯法计算出电子枪结构的大致尺寸参数,然后借助三维仿真软件进一步优化设计。

本文中,电子光学的基本设计要求为电子注电压 $U=6\text{ kV}$, 电子注电流 $I=120\text{ mA}$, 漂移通道长度 $L=40.5\text{ mm}$, 电子通道半径 $r=0.15\text{ mm}$, 填充比为 75%。电子枪结构示意图如图 1 所示,根据以上参数及皮尔斯枪综合计算法,可大致求解电子枪结构^[11]。

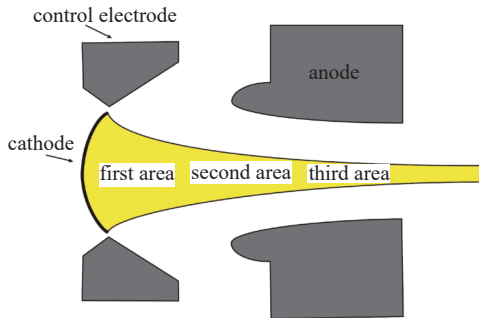


图1 电子枪结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of electron gun

首先通过式(1)算出导流系数 P :

$$P = \frac{I}{U^{1.5}} \quad (1)$$

由束腰半径 r_w 和阴极所允许的发射电流密度 J_c , 用式(2)决定电子枪的压缩比 M^2 和阴极截面半径 r_c 。

$$M^2 = \frac{r_c^2}{r_w^2} = \frac{J_b}{J_c} = \frac{\pi r_w^2}{\pi r_c^2} \quad (2)$$

再查询电子枪压缩比设计曲线可得到阴阳极曲率半径之比 R_c/R_a , 由式(3)可以得到朗缪尔函数 $-\alpha_a$ 的值。结合式(4)即可求出阴极发射面半锥角 θ 。

$$-\alpha_a = \ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right) + 0.3 \left[\ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right) \right]^2 + 0.075 \left[\ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right) \right]^3 + 0.01432 \left[\ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right) \right]^4 + 0.00216 \left[\ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right) \right]^5 + 0.00027 \left[\ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right) \right]^6 \quad (3)$$

$$P = \frac{I_t}{U_a} = \frac{8\pi\epsilon_0 \sqrt{2\eta}}{9} \cdot \frac{1 - \cos\theta}{[-\alpha_a]^2} = 14.67 \times 10^{-6} \frac{1 - \cos\theta}{[-\alpha_a]^2} \quad (4)$$

最后利用方程组(5)求出电子枪的其它结构参数。

$$\begin{cases} r_c = R_c \sin\theta \\ R_a = R_c e^{\ln\left(\frac{R_c}{R_a}\right)} \\ R_k = \sqrt{\frac{l}{2\pi J_c (1 - \cos\theta)}} \end{cases} \quad (5)$$

通过上述计算,可以求得,球面阴极弦半径为 0.7 mm 和曲率半径分别为 2.5 mm , 阳极半径为 0.64 mm 。

为了方便分析结构尺寸和导流系数,电流,束腰半径的关系,作者还引入了一些新的结构参量,如图 2 所示。在设计电子枪的过程中,发现影响电子枪电流和束腰半径的两个主要参数是 r_f 和 z_f 。根据仿真分析, P , I 和 r_w , 随着 r_f 增大而增大,随着 z_f 增大而减小。在保持其它结构参数不变的情况下,最终优化得到的电子枪及电子注轨迹如图 3 所示。仿真结果显示,当阴阳极电压差 $U=6\text{ kV}$ 时,发射电流 $I=120\text{ mA}$ 。

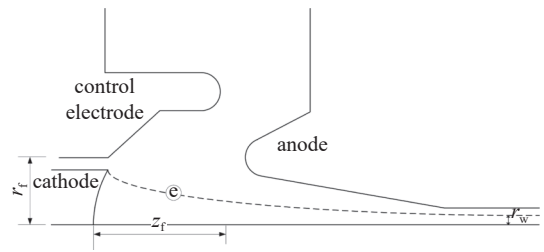


图2 电子枪关键尺寸示意图

Fig. 2 The schematic diagram of key electron gun dimensions

2 均匀永磁聚焦系统的设计和测试

电子注从电子枪发射出来之后,由于自身的空间电荷力的作用,若无外加力进行聚束,电子会迅速发散,进而轰击到行波管的高频结构,降低器件的性能,降低器件的使用寿命。因此,需要外加聚焦系统来对电子注进行聚束,实现电子注的长距离

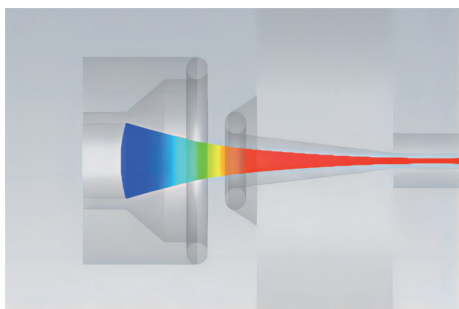


图3 电子枪束流轨迹截面图

Fig. 3 Trajectory of the sheet-beam in the electron gun

稳定传输。考虑到本文针对的非周期同心圆弧折叠波导管处于低电压的工作条件下这一特点, 其所需的聚束电子注的布里渊磁场较大, 周期永磁聚焦难以满足技术指标, 所以本文采用了均匀永磁聚焦的方法。

首先, 由技术指标可知, 漂移通道的长度为 40.5 mm。根据式(6), 可以求得布里渊磁场为 2918 Gs, 考虑到本次设计中, 电子注电流密度较大, 电荷间的空间电荷力较强, 因此选择峰值磁场为 布里渊磁场的 2.0~2.5 倍。

$$B_b = 0.83 \times 10^{-3} \frac{I^{0.5}}{r_w U^{0.25}} \quad (6)$$

本文采用的聚焦系统是 Π 型永磁聚焦系统, 为了产生均匀磁场, 两个磁环在径向的极性方向相反, 如图 4 所示。为了使电子注有良好的传输性, 需要调整过渡区及相互作用区的磁场曲线, 作者发现, 较为敏感的几个结构尺寸为 r_1 , r_2 和 r_3 , 其中, r_1 , r_2 主要影响相互作用区磁场峰值, 而 r_3 影响过渡区斜率。通过多次仿真计算, 并且综合考虑永磁聚焦结构的体积、重量、电子束填充比、刚度等因素, 确定尺寸结构参数为 $r_1=31.7$ mm, $r_2=75.7$ mm, $r_3=2.0$ mm。

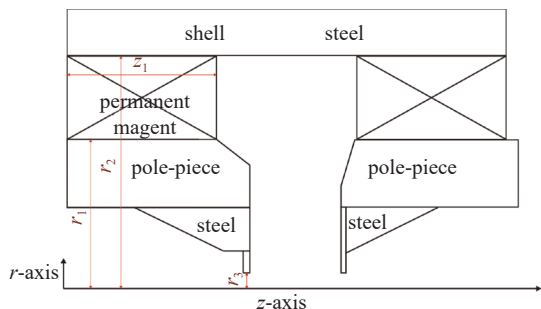


图4 均匀永磁聚焦结构示意图

Fig. 4 The schematic diagram of the Uniform Permanent Magnetic Focusing System

仿真后得到的电子注轨迹如图 5 所示, 由仿真结果可知, 在阴阳极电压差为 6 kV, 发射电流为 120 mA 时, 电子注在漂移通道中的通过率为 100%。为了对仿真结果进行验证, 作者加工了磁系统。图 6 为 CST 仿真结果与实际测试的径向磁场 B_z 的对比, 由图中可以看出, 实验测试结果能较好地拟合仿真下的 B_z 分布曲线, 只是峰值略小。

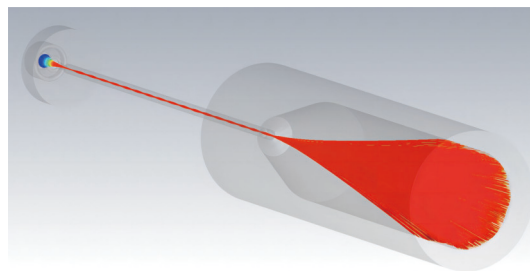
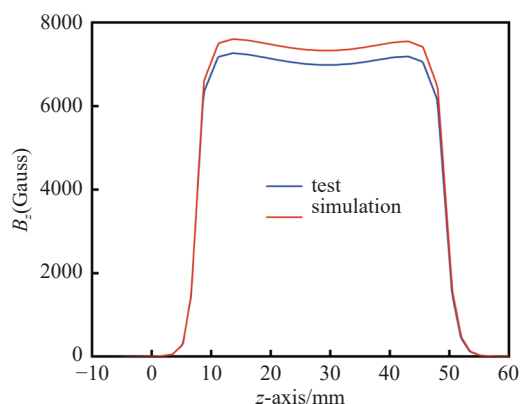


图5 磁场下的电子注轨迹

Fig. 5 Trajectory of the sheet-beam in magnetic fields

图6 B_z 仿真和测试结果对比Fig. 6 Simulation and test results of B_z curves

3 实验测试

为了验证电子光学设计的准确性, 作者加工了束管进行冷测试。实验中保持阳极接地, 阴极接通负高压的脉冲序列, 脉冲宽度为 10 μ s, 如图 7 所示。最终测试结果显示, 在阴阳极施加 6 kV 的电压时, 可以产生 120 mA 的电子注电流, 高频截获电流为 12 mA, 通过计算可知, 收集极电流为 108 mA。电子通过率为 90%。

4 结论

本文根据非周期同心圆弧折叠波导的技术指标要求, 设计了电子枪和均匀永磁聚焦系统, 并进行了实物加工及测试。仿真结果表明, 在电子注通



图7 实验测试

Fig. 7 Experiment layout

道直径 0.3 mm, 长度为 40.5 mm 的条件下, 阴阳极电压差为 6 kV, 可以产生 120 mA 的电流, 电子通过率 100%。测试结果表明, 在阴阳极施加 6 kV 的电压时, 所产生的电子注电流为 120 mA, 电子通过率为 90%。测试结果能较好地验证实验结果, 满足同心圆弧非周期折叠波导行波管的技术指标, 为后续非周期折叠波导行波管的研制奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, et al. Vacuum electronic high power terahertz sources[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1): 54–75
- [2] Chong C K, and Menninger W L. Latest advancements in high-power millimeter-wave helix TWTs[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(6): 1227–1238
- [3] Sengele S, Jiang H, Booske J H, et al. Microfabrication and characterization of a selectively metallized W-band meander-line TWT circuit[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(5): 730–737
- [4] Gerum W, Malzahn P, Schneider K. 94-GHz TWT for military radar applications[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(1): 72–73
- [5] Theiss A J, Meadows C J, Freeman R, et al. High-average-power W-band TWT development[J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2010, 38(6): 1239–1243
- [6] Zhang X, Feng J, Cai J, et al. Design and experimental study of W band pulsed TWT with 8-GHz bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(12): 5151–5156
- [7] Na Y H, Chung S W, Choi J J. Analysis of a broadband Q band folded waveguide traveling-wave tube[J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2002, 30(3): 1017–1023
- [8] Han S T, Jang K H, So J K, et al. Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube[J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2004, 32(1): 60–66
- [9] Sharma R K, Grede A, Chaudhary S, et al. Design of folded waveguide slow-wave structure for W band TWT[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(10): 3430–3436
- [10] Wen Z, Luo J, Li Y, et al. Beam-wave resynchronization method of the nonperiodic meander line and folded-waveguide SWS for TWTs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2021, 69(2): 763–770
- [11] Wang J X, Barnett L R, Luhmann N C, et al. Electron beam transport analysis of W-band sheet beam klystron[J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17(4): 043111