2019 年 8 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)04-0726-04

低电压高效率 W 波段脉冲行波管设计

杜英华,蔡 军,张小青,杨金生

(中国电子科技集团公司 第十二研究所 微波电真空器件国家重点实验室, 北京 100015)

摘 要:行波管具有大功率、高增益等优点,是雷达、电子对抗系统等武器装备的核心电子器件。采用一种新型慢波结构——非半圆弯曲变形折叠波导,设计出低电压、高效率、宽带W波段脉冲行波管,工作电压16 kV,电流125 mA,6 GHz带宽内输出功率大于125 W,增益大于34 dB,电子效率与总效率分别大于6.3%,25.7%。

关键词: W 波段; 折叠波导; 低电压; 高效率; 行波管

中图分类号:TN773 文献标志码:A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0726

Design of a low voltage high efficiency W-band pulsed Traveling Wave Tube

DU Yinghua, CAI Jun, ZHANG Xiaoqing, YANG Jinsheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, No.12 Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Traveling-Wave Tubes(TWTs) feature high output power and gain, and are the core component for radars and electronic countermeasure systems. This paper presents a design for a low voltage, high efficiency W-band pulsed TWT, using a novel type of Folded Waveguides(FWGs) with modified circular bends. The designed TWT, operated at 16 kV and 125 mA, is capable of delivering an output power over 125 W, with electron efficiency and total efficiency over 6.3% and 25.7% respectively, in a frequency range of 91–97 GHz.

Keywords: W-band; Folded Waveguides; low voltage; high efficiency; Traveling-Wave Tubes

W 波段具有绝对频带宽,波束窄,环境适应性强,可全天候工作等优点,是下一代武器装备的重点工作频段^[1]。W 波段行波管作为雷达系统、电子对抗系统和高速无线通信系统的核心电子器件,对下一代武器装备的建 设发展具有关键作用^[2]。

国内外多家机构已成功研制出 W 波段脉冲行波管。法国 Thales 公司的 W 波段脉冲行波管,工作电压 22 kV, 电流 180 mA,在 0.5 GHz 带宽内得到百瓦输出功率^[3]。美国 L3 公司的 W 波段脉冲行波管,工作电压 20.5 kV, 电流 220 mA,92~96 GHz 内输出功率大于 100 W^[4-5]。国内研究单位有中国科学院电子学研究所、电子科技大学、 中电集团十二所等。中国科学院电子学研究所研制的 W 波段脉冲行波管工作电压 19.4 kV,电流 90 mA,最大输 出功率 65 W^[6]。电子科技大学的 W 波段脉冲行波管工作电压 19.1 kV,电流 145 mA,94~96 GHz 频率内输出功 率大于 100 W^[7]。中电集团十二所已研制出 22 kV 工作电压,170 mA 电流,6 GHz 带宽内输出功率大于 100 W 的 W 波段脉冲行波管产品。

综上所述,目前百瓦级 W 波段脉冲行波管工作电压均在 20 kV 左右。高工作电压很难实现整管小型化,同时会增大整机中电源体积和质量。更为重要的是,电压过高容易引发打火、漏电,降低系统可靠性。因此,低电压、高效率是行波管发展的必然方向。本文设计了一种低电压 W 波段脉冲行波管:工作电压 16 kV,电流 125 mA, 6 GHz 带宽内输出功率大于 125 W,工作比 30%,总效率大于等于 25%。

1 慢波系统设计

高频结构是决定行波管性能的核心部件。折叠波导在高频率具有鲜明的优点:结构简单、易于实现高一致性加工、功率和带宽容易满足技术要求^[8]。因此选择折叠波导作为低电压、高效率 W 波段脉冲行波管的慢波结构。

慢波结构的色散特性和耦合阻抗决定高频的性能。色散特性反映了电磁波的相速随频率的变化关系,相速越低,所需的工作电压就越低。耦合阻抗描述了注波互作用的有效程度,耦合阻抗越大,注波互作用越强。采用一种新型慢波结构——非半圆弯曲波导边界折叠波导慢波结构(ZL201410011491X),利用改变弯曲波导的边界结构, 增加耦合阻抗,提高互作用能力^[9]。

常规折叠波导慢波结构如图 1(a)所示,其中 波导宽边、窄边、周期、直波导、电子注通道半 径分别记作 *a,b,p,h,r*_c,非半圆弯曲变形折叠波导 (图 1(b))是将内外圆弧圆心上下偏移,内、外弧圆 心 *O*_{in},*O*_{out}与常规半圆圆心 *O* 的距离分别为 *d*_{in}和 *d*_{out}。

使用 CST 软件计算常规折叠波导和非半圆折 叠波导的冷特性,如图 2 所示。调整波导周期 p尺寸,使 2 种折叠波导的相光速比 V_p/c 数值相同, 当 $d_{in}=d_{out}=0.1$ mm 时,非半圆弯曲折叠波导的耦 合阻抗比常规慢波结构增加了 28.5%,适用于低 电压、高效率行波管慢波结构设计。



Fig.1 A schematic drawing of FWGs 图 1 折叠波导结构示意图



Fig.2 Cold characteristics of the modified circular bends FWG and conventional FWG 图 2 常规与变形折叠波导冷特性对比图

为进一步增加行波管电子效率,使用相速跳变技术提升注波互作用效率。基本原理是利用相速跳变减小行波的轴向速度,与电子注的速度再同步,增加注波能量交换过程,实现互作用效率的提高^[10]。通过改变折叠波导慢波结构的半周期*p*,实现电磁场相速度的改变。调节高频跳变的起始位置、半周期距离和跳变长度,计算输入功率和工作电压,最终得到满足指标要求的饱和峰值输出功率和增益。利用微波模拟



器套装(Microwave Tube Simulator Suite, MTSS)进行互作用模拟,优化高频输出功率,使中心频率在 94 GHz,带宽 6 GHz 频带内输出功率最佳。利用电磁仿真软件 CST 粒子工作室进行 PIC 互作用精确模拟,计算模型如图 3 所示。







MTSS 与 CST 软件 PIC 计算结果分别如图 4、图 5 所示。结果显示,在 91~97 GHz 范围内,输出功率均大于 125 W,电子效率大于 6.3%,增益大于 34 dB。

2 电子光学系统设计

根据总体设计需求,选用聚焦极控制的皮尔斯电子 枪产生电子注,采用高磁能积钐钴周期永磁(Periodic Permanent Magnet, PPM)聚焦系统实现电子注的聚焦, 轴线磁场强度 B≥0.5 T。利用三维电磁仿真软件 Opera-3D 对包括电子枪和 PPM聚焦系统的电子光学系统进行



Fig.6 Simulated result of electronic optical system by Opera-3D 图 6 利用 Opera-3D 模拟的电子光学系统三维仿真结果

仿真优化,结果如图 6 所示, 阴极半径 2 mm 时, 电压 16 kV 下, 电流 128 mA, 电子注流通率 100%。该电子光 学系统在实验室研制的 E 波段行波管中进行了实验验证, 静态与动态流通率分别为 99%和 98%。

3 高效率四级降压收集极

为提高收集极效率,设计了四级降压收集极,使不同动能区间内的电子被不同电位的电极进行回收,以提高整管总效率。使用 MTSS 软件对收集极结构进行了初步设计和仿真计算,多轮次优化各电极结构尺寸及工作电压。分别计算不同频率下收集极电子分布情况,结果 显示,在6 GHz带宽内电子回收效率均大于 88%,图 7 给出了中心频 点 94 GHz 的电子分布情况。当电子效率 5%,流通率 96%条件下,整 管总效率高于 25.7%。



Fig.7 Simulated result of collector at 94 GHz 图 7 94 GHz 频点下收集极计算结果

4 输能系统

使用金刚石盒型窗进行信号的输入输出,该输能系统已成功应用于实验室研制的各类型 W 波段行波管中, 技术成熟,性能可靠^[11]。图 8 和图 9 给出了输能窗的驻波系数(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)以及插入损 耗的模拟与实测结果,结果显示 75~110 GHz 之间驻波系数小于 1.25,插入损耗为 0.5 dB 左右,对比蓝宝石窗性 能有较大提升。





Fig.9 Transmission loss of the diamond and sapphire window 图 9 金刚石窗插入损耗(与蓝宝石窗对比)

5 结论

本文提出了低电压、高效率 W 波段脉冲行波管的总体设计方案,针对折叠波导慢波结构、电子光学系统、 四级降压收集极和输能结构进行了详细设计,模拟结果显示行波管工作电压为 16 kV 时,在 91~97 GHz 带宽内, 输出功率 125 W,增益 33 dB,电子效率 6.3%,总效率 25%。

参考文献:

[1] 冯进军,胡银富,蔡军,等.W波段行波管发展评述[J]. 真空电子技术, 2010(2):27-32. (FENG Jinjun,HU Yinfu,CAI Jun, et al. The development appraisal of W-band TWT[J]. Vacuum Electronics, 2010(2):27-32.)

- [2] LVES R L. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 32(3):1277-1291.
- [3] GERUM W,MALZAHN P,SCHNEIDER K. 94 GHz TWT for military radar application[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001,48(1):72-73.
- [4] 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.
- [5] CEDRIC W,CONRAD M,ANDREW Z,et al. A 100 Watt W-band MPM TWT[C]// 2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference. Paris,France:IEEE, 2013:1-2.
- [6] LI Fei, HUANG Mingguang, SHAN Meiqin, et al. Development of W band folded waveguide Traveling Wave Tube[C]// 2017 IEEE 18th International Vacuum Electronics Conference. London, UK: IEEE, 2017:1-2.
- [7] CHEN Kaifang, ZHOU Xibang, TANG Tao, et al. A 94-96 GHz 100 Watts Folded Waveguide TWT[C]// 2017 IEEE 18th International Vacuum Electronics Conference. London, UK: IEEE, 2017:1-2.
- [8] 蔡军. W 波段折叠波导慢波结构的研究[D]. 济南:山东大学, 2006. (CAI Jun. Research on W-band Folded Waveguide slow wave structure[D]. Jinan, China: Shandong University, 2006.)
- [9] CAI Jun, FENG Jinjun, WU Xianping. Folded waveguide slow wave structure with modified circular bends[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(10):3534-3538.
- [10] ZHANG Xiaoqing, FENG Jinjun, CAI Jun, et al. Design and experimental study of 250 W W-band pulsed TWT with 8 GHz bandwidth[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017,64(12):5151-5156.
- [11] 杜英华,胡银富,丁明清,等. 金刚石在太赫兹电真空器件中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(3):350-354.
 (DU Yinghua,HU Yinfu,DING Mingqing, et al. Application of diamond in terahertz vacuum electron devices[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(3):350-354.)

作者简介:



杜英华(1978-), 女, 济南市人, 高级工程 师, 主要研究方向为 W 波段行波管研制. email:duyinghua1978@yeah.net. **蔡** 军(1978-),男,河北省唐山市人,研究员级高级工程师,主要研究方向为W波段行波管与太赫兹真空器件研制.

张小青(1982-),男,山东省济宁市人,工程师,主要研究方向为W波段行波管研制.

杨金生(1968-),男,内蒙古自治区赤峰市人, 研究员级高级工程师,主要研究方向为高功率磁 控管与正交场放大器研制.

The 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing

October 23-25, 2019, Xi'an, China

The Annual International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (IC-WCSP) aims to gather international researchers from academia and industry to meet and exchange ideas and recent research works across the broad field of ICT technologies. The event of WCSP 2019 will be held in Xi'an, Shaanxi, China, on October 23-25, 2019. The theme of WCSP 2019 is to embrace the future communications toward intelligence, including but not limited to wireless communications, future networking, signal processing, 5G Beyond, network and information security, optical communications, satellite communications, intelligent informatics and big data and multimedia.