

文章编号: 2095-4980(2016)01-0031-03

W 波段宽带螺旋线行波管设计

任大鹏, 蔡 军, 胡银富, 冯进军

(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: 提出了 W 波段螺旋线宽带行波管(TWT)设计方案, 论述了高频系统、电子光学系统以及输能系统的计算与模拟。结果表明在 80 GHz~100 GHz 的范围内, 能够得到大于 15 W 的输出功率, 为开展 W 波段低电压螺旋线行波管的研制工作提供了依据。

关键词: W 波段; 螺旋线; 行波管; 设计

中图分类号: TN124^{+.5}

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0031

Design of W-band helix Traveling Wave Tube

REN Dapeng, CAI Jun, HU Yinfu, FENG Jinjun

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

Abstract: The design of a W-band wide band helix Traveling Wave Tube(TWT) is presented in this paper. The slow wave structure, the electron optical system and the RF output system are simulated in design. The computational results indicate that an output power of 15 W can be obtained in the frequency range from 80 GHz to 100 GHz.

Key words: W-band; helix; Traveling Wave Tube(TWT); design

目前世界各国都在积极开展 W 波段通信研究, NASA 开展了 IIN(Integrated Interplanetary Network)项目研究, 目的是实现行星间的海量数据传输, 意大利空间局开展了 DAVID(Data and Video Interactive Distribution Mission)项目研究, 用来探索 W 波段高速数据转换能力。美军已经正式启动“100 GHz 射频骨干网”项目研发, 可使美军在野战条件下组件成光纤传输等能力的通信链路, W 波段行波管是开展这一系列研究的核心器件^[1-2], 目前 L3 公司研制的耦合腔行波管输出功率为 100 W, 带宽为 4 GHz, 工作电压为 22 kV。

为进一步提高通信容量, 降低电压, 提高效率, 并扩大 W 波段行波管在卫星通信中的应用, 需要研制带宽超过 20 GHz 的低电压宽带行波管, 螺旋线高频结构具有带宽较宽、电压低、效率高的特点, 是研制低电压宽带行波管的良好选择。同时, W 波段螺旋线行波管由于瞬时带宽可以覆盖 W 波段全频段, 在电子对抗领域也有广阔的应用前景。随着工艺条件和设计水平的逐渐提高, 国内已经具备了研发 W 波段宽带螺旋线行波管的基础。本文进行了理论计算和计算机模拟, 完成了高频系统、电子光学系统和输能系统的优化, 为实际制管提供了依据。

1 螺旋线高频系统设计

W 波段螺旋线高频结构尺寸小, 精确度高, 损耗大, 工艺难度大。本文从降低工艺难度的角度出发, 选用工艺比较成熟、色散平坦、带宽较宽的“品”型夹持杆螺旋线慢波结构, 通过适当提高相光速比减小损耗, 通过选取较大的 γa (γ 为径向传播常数, a 为螺旋导面半径), 来增大螺旋线半径, 降低工艺难度, 其结构如图 1 所示。

在螺旋线慢波结构中, 电磁波在周期边界条件下传播, 对螺旋线和夹持杆的结构进行适当的设计优化, 可以实现电磁波与电子注的同步。经过注波相互作用后, 电磁波得到电子注的能量, 从而实现信号的放大。从理论计算出发可以



Fig.1 Scheme of the helix slow wave structure
图 1 螺旋线高频结构示意图

近似得到螺旋线结构的色散、耦合阻抗等冷特性参数^[3]。随着计算机仿真技术的快速发展,可以利用 CST 微波工作室、HFSS 等电磁软件的本征计算模块得到更加精确的结果。为了满足功率、增益以及带宽的要求,需要对螺旋线慢波结构的几何参数进行综合优化设计,在所需要的工作带宽内色散尽量平坦,耦合阻抗尽量高。按照设计目标,电压低于 10 kV,相光速比在 0.19 左右,最终优化后的螺旋线高频结构的参数如表 1 所示。得到的色散特性、耦合阻抗与衰减特性如图 2、图 3 和图 4 所示。

表 1 螺旋线高频结构的几何尺寸

parameter	size/mm
helix inner radius	0.14
spiral width	0.15
spiral belt thickness	0.07
holding rod height	0.45
pitch	0.260~0.265

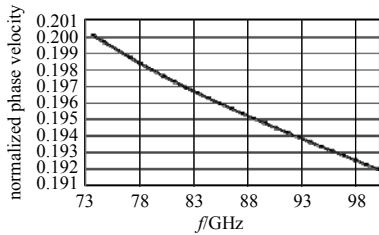


Fig.2 Dispersion of the helix slow wave structure

图 2 螺旋线慢波结构的色散特性

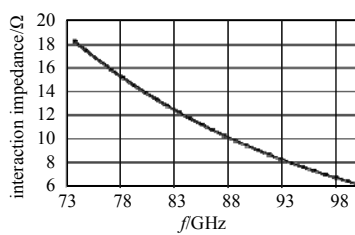


Fig.3 Interaction impedance of the helix slow wave structure

图 3 螺旋线慢波结构的耦合阻抗

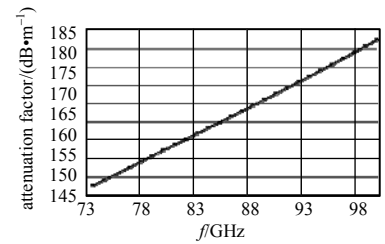


Fig.4 Attenuation factors of the helix slow wave structure

图 4 螺旋线慢波结构的衰减特性

利用微波管模拟器套装软件 MTSS 对该螺旋线行波管的注波相互作用进行了模拟。工作电压为 9 kV,工作电流为 45 mA,互作用长度为 65 mm,采用一次切断和集中衰减。最终计算得到的饱和输出功率和饱和增益如图 5 和图 6 所示。从模拟结果可以看到在 80 GHz~100 GHz 的范围内,能够得到 15 W 以上的输出功率,增益大于 35 dB。

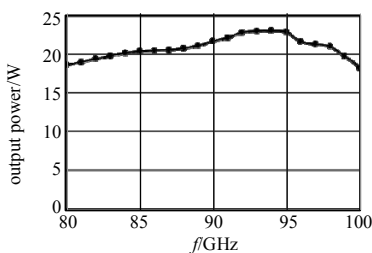


Fig.5 Output power versus frequency

图 5 输出功率随频率的变化

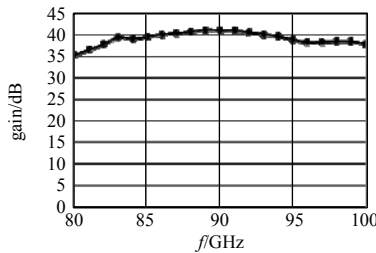


Fig.6 Gain versus frequency

图 6 增益随频率的变化

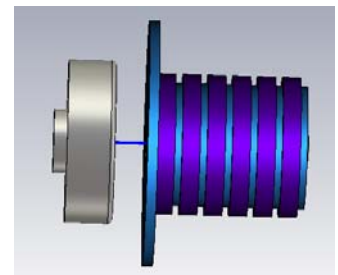


Fig.7 Model of the PPM system

图 7 周期永磁聚焦系统模型

2 电子光学系统设计

W 波宽带螺旋线行波管电子光学系统的设计从设计与工艺难度两方面考虑,预期的导流系数是 0.04 μP ,注腰半径不大于 0.07 mm,螺旋线内径为 0.28 mm。从整管设计的要求出发,合理优化电极,达到满足技术指标的注腰半径和射程。

计算机模拟是计算电子光学系统的关键环节,是对理论设计的验证,同时也是进一步优化。计算机模拟采用 MTSS2013 和 EGUN 软件。电压为 9 kV,电流为 45 mA,周期永磁聚焦系统的布里渊磁场为 2 800 Gauss,峰值磁场可选用 6 200 Gauss,经过计算,目前在 W 波段折叠波导行波管上使用的钕钴磁钢可以满足设计要求。用 CST 软件建立的周期永磁聚焦系统模型如图 7 所示。在静态磁场求解器中进行求解,经过后处理得到轴线上的磁场分布见图 8。

利用 MTSS 和 EGUN 分别计算了考虑磁场时的电子注轨迹。MTSS 的计算结果见图 9,可以看出电子枪具有较好的层流性和较远的射程,模拟的流通率为 100%,初步验证了设计的合理性。

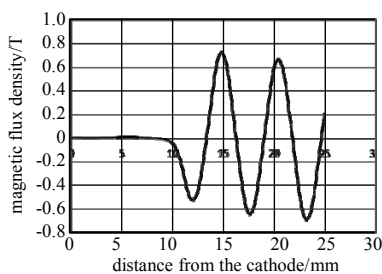


Fig.8 Magnetic field on the axis of the PPM system

图 8 周期永磁聚焦系统轴线上的磁场

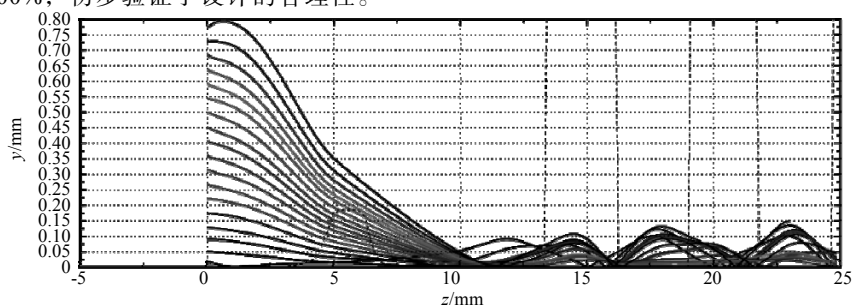


Fig.9 Beam trajectories simulated by MTSS

图 9 MTSS 计算的电子注轨迹

3 输能系统设计

宽带输能窗是螺旋线行波管研制的关键部件之一。

金刚石材料由于具有低介电常数、低微波损耗、高硬度、高导热率等优良特性,是目前 W 波段宽带螺旋线行波管输能窗的最优选择^[4]。目前微波等离子体增强化学汽相淀积(Microwave Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition, MPCVD)生长的人造金刚石材料渐趋成熟,已经在 W 波段折叠波导行波管上得到了应用,材料与工艺可靠性得到了实践验证^[5]。W 波段螺旋线行波管采用金刚石材料作为窗片,输能结构示意图见图 10,为同轴转波导的输能结构。利用 CST 得到了 VSWR 随频率的变化,如图 11 所示,可以看出在 80 GHz~100 GHz 的范围内,VSWR 低于 1.45,具有较好的匹配,验证了设计的合理性。



Fig.10 Scheme of the transmission structure

图 10 输能结构示意图

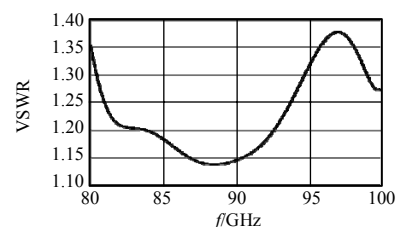


Fig.11 VSWR versus frequency

图 11 驻波系数随频率的变化

4 结论

本文研究了 W 波段宽带螺旋线行波管的总体设计方案以及高频电路设计、电子光学系统设计和输能结构设计,给出了模拟与计算结果,计算表明宽带螺旋线行波管可以在 80 GHz~100 GHz 的带宽范围输出 15 W 以上的输出功率,增益大于 35 dB,为开展 W 波段宽带低电压高效率中等功率行波管提供了依据。

计算验证了 W 波段螺旋线行波管设计的可行性,同时也显示出在制造工艺方面面临较大的挑战,在填充比为 0.5 的情况下,电子注与螺旋线的距离小于 70 μm ,对加工与装配提出了苛刻的要求,研制 W 波段螺旋线行波管需要解决很多关键的工艺问题。

参考文献:

- [1] LI Li,FENG Jinjun. Design consideration of W-band helix TWTs[C]// 2014 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). Monterey,California,USA:IEEE, 2014:267-268.
- [2] 蔡军,冯进军,胡银富,等. W 波段行波管卫星通信系统应用前景[J]. 空间电子技术, 2013,10(4):6-9. (CAI Jun,FENG Jinjun,HU Yinfu,et al. Application prospect of W-band traveling wave satellite communication system[J]. Space Electronic Technology, 2013,10(4):6-9.)
- [3] 电子管设计手册编辑委员会. 中小功率行波管设计手册[G]. 北京:[s.n.], 1976. (Tube design manual editorial board. Design manual for small and medium power traveling wave tube[G]. Beijing:[s.n.], 1976.)
- [4] KENNETH E Kreischer,JACK C Tucek,MARK A Basten,et al. 220 GHz power amplifier testing at Northrop Grumman[C]// Proceeding of IVEC2013. Paris,France:IEEE, 2013:553-554.
- [5] CAI Jun,FENG Jinjun,HU Yinfu,et al. Development of W-band Folded Waveguide pulsed TWT[C]// Proceeding of IVEC2013. Paris,France:IEEE, 2013:1-2.

作者简介:



任大鹏(1983-),男,河南省周口市人,硕士,工程师,主要从事亚毫米波及太赫兹真空电子器件研制.email:p-pan@hotmail.com.

蔡军(1978-),男,河北省唐山市人,博士,高级工程师,主要从事 W 波段及太赫兹真空电子器件的研究工作。

胡银富(1982-),男,安徽省旌德市人,硕士,高级工程师,主要从事短毫米波、太赫兹电真空器件、MEMS 工艺以及集成真空电子器件等相关研究工作。

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,研究员,博士生导师,主要从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS 技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等领域的研究工作。