

文章编号: 2095-4980(2020)06-1025-05

E 波段折叠波导行波管集成极靴结构设计及仿真

李思睿, 李天一, 陈 辑, 蔡 军, 冯进军, 闫铁昌

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 为进一步提升毫米波折叠波导行波管的输出功率, 通过整体加工的工艺方法, 将折叠波导慢波结构和周期永磁聚焦系统在母材上同时加工, 形成一种集成极靴结构。基于圆形注电子光学系统, 设计了 E 波段折叠波导行波管的集成极靴结构。利用三维电磁场模拟软件(CST)的微波工作室, 设计并模拟了慢波结构的冷特性参数, 并根据慢波结构尺寸设计周期永磁聚焦系统。通过电磁工作环境仿真软件(OPERA)对磁场进行仿真验证, 最终整管粒子数值模拟(PIC)计算结果表明, 在 61~71 GHz 频带内可获得大于 1 kW 的饱和输出功率。该集成极靴结构在提供强轴向磁场的同时, 具有结构紧凑、散热性好等优点。

关键词: E 波段; 折叠波导; 集成极靴; 行波管

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019321

Design and simulation of integrated pole piece structure for E-band Folded Waveguide TWT

LI Sirui, LI Tianyi, CHEN Ji, CAI JUN, FENG Jinjun, YAN Tiechang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics,
Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: It is an effective way to use the integrated pole piece structure in order to improve the output power of millimeter wave Folded Waveguide(FWG) Traveling Wave Tube(TWT). Based on the circular beam electron optical system, an integrated pole piece structure is designed for E-band folded waveguide TWT. In this paper, the cold characteristic parameters of slow wave structure are designed and simulated by using the Computer Simulation Technology(CST), and the integrated pole piece focusing system is designed. The magnetic field is simulated and verified by Operating Environment for Electromagnetic Research and Analysis(OPERA). The final Particle-In-Cell(PIC) simulation calculation results show that the output power of more than 1 kW can be obtained in the frequency band of 61–71 GHz. The integrated pole piece structure not only provides strong axial magnetic field, but also has the advantages of compact structure and good heat dissipation.

Keywords: E-band; Folded Waveguide; integrated pole piece; Traveling Wave Tube

毫米波电真空器件在高速通信、导弹精确制导、气象探测及电子战等领域具有广泛的应用前景^[1]。行波管是目前研究和应用最为广泛的真空电子器件, 国内外相关研究机构针对行波管的工作原理、精密加工方法及装配工艺, 展开了相应的研究工作^[2-4]。

目前毫米波行波管主要采用的结构是折叠波导慢波结构及周期永磁聚焦系统。自 1979 年美国斯坦福大学的 J K Waterman 提出折叠波导作为行波管慢波结构以来, 折叠波导由于其良好的性能和易加工特点一直备受关注, 并且在不断地发展和改进^[5-7]。折叠波导为全金属结构, 易加工, 带宽宽, 功率容量大, 适合规模生产。近些年, 随着微加工技术的发展成熟, 如 UV-LIGA、离子刻蚀等技术, 毫米波甚至太赫兹行波管仍可以使用折叠波导慢波结构。周期永磁聚焦系统是通过周期性分布的磁场实现电子注聚焦的一类聚焦系统。周期永磁聚焦系统具有质量小, 体积小的优势, 且不需能耗, 可通过小型磁钢片对局部磁场进行微调, 可以在保证大功率、宽频带的同时, 最大限度地缩小器件的体积。

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-09-28

作者简介: 李思睿(1992-), 女, 硕士, 主要研究方向为大功率毫米波真空电子器件。email:lisirui_ve@hotmail.com.

目前行波管的研究主要集中在高频率、高可靠性、大功率、小型化等方向，其中大功率毫米波行波管一直是国内外的研究热点。在毫米波、太赫兹频段，提高折叠波导行波管的直流功率及电子效率可以显著提高行波管的输出功率。其中，利用相速再同步技术提高电子效率的方法获得了深入的研究，取得了很好的效果^[8]。由于工作电压的提升会给器件的实用化带来诸多问题，如电压过高，会导致电子枪内瓷件绝缘能力下降，引起电极间打火，甚至直接烧毁电子枪，也对配套高压电源的性能提出了很大的挑战，影响行波管与功率模块的集成。目前多采用增加工作电流的方式提高行波管的饱和输出功率，但工作电流的提升会带来电子间斥力引起的电子注的散焦问题，因而需要更强的磁场来约束电子注。最直接可行的方案是将慢波结构与聚焦系统集成^[9-10]，最大限度缩小聚焦系统内径，使聚焦磁场得到显著提高，约束强流电子注，从而实现利用强流电子注电流最终提升行波管的输出功率。本文基于圆形注电子光学系统，针对 E 波段折叠波导行波管的集成极靴结构进行设计和仿真。

1 集成极靴结构与传统结构对比

本文提出一种嵌入式集成极靴结构，如图 1 所示，折叠波导行波管集成极靴结构采用电工纯铁—无氧铜复合金属母材，将直角型折叠波导慢波结构嵌入到小内径聚焦结构中。每个极靴磁钢组合之间包含多个折叠波导结构，直角型折叠波导慢波结构穿过极靴，电子注通道即为极靴内径。极靴以轴线为中心对称预留 2 个长方体开孔，用于加工折叠波导穿过极靴的部分，从而实现周期永磁(Periodic Permanent Magnet, PPM)聚焦结构与折叠波导(FWG)慢波结构的集成，除极靴为电工纯铁材料外，其他均为无氧铜金属材料。

常规折叠波导和周期永磁聚焦结构是分别加工而后通过装配焊接而成的，折叠波导由高速铣在无氧铜母材上加工，周期永磁聚焦系统由环形极靴、无磁隔环和磁钢在高频上装配构成。由于无氧铜材料质软，且尺寸精细，在传统工艺装配及焊接中易导致慢波结构变形，造成行波管工作频率偏移、产生自激振荡等问题。集成极靴结构加工在电工纯铁—无氧铜复合金属母材中进行慢波结构的加工，最后加工出整体外形，避免了在装配中引起的结构变形。将极靴内径缩小到电子注通道尺寸，可最大限度提高轴向磁场，整体加工可使所有焊接面均为大面积焊接面，可提高整管强度、可靠性和散热性。由于极靴厚度影响慢波结构的尺寸参数，目前集成极靴式相互作用结构适用于毫米波真空电子器件中。

2 慢波结构冷特性参数模拟

图 2 为直角型折叠波导单周期示意图，其中 h_1, b_1 为横向直波导的长度和宽度， h_2, b_2 为轴向直波导的长度和宽度， r_c 为电子注通道半径，半周期 $p=h_2+b_1$ ， a 为折叠波导宽边尺寸。极靴中电工纯铁材料的充磁量应位于退磁曲线的线性区域，即不饱和状态。经仿真计算，厚度为 0.5 mm 时，本结构极靴内磁场不饱和。根据该尺寸首先确定 h_2 为极靴厚度 0.5 mm，E 波段折叠波导结构尺寸在 2.4~2.7 mm 之间选择， b_1 与 b_2 的尺寸在 0.2~0.3 mm 之间。基于这些尺寸，使用 CST 微波工作室中的本征模求解器对直角型折叠波导的色散和耦合阻抗进行优化，最终确定尺寸参数如表 1 所示，仿真计算所得色散、耦合阻抗见图 3、图 4。该尺寸直角型折叠波导慢波结构工作中心频率 65 GHz，具有 10 GHz 工作带宽，60~71 GHz 频带内相光速比范围为 0.228 9~0.224 3，色散较为平坦，中心频点处耦合阻抗为 2.17 Ω 。

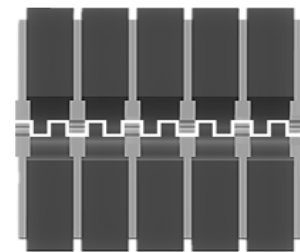


Fig.1 Integrated pole piece interaction structure
图 1 集成极靴结构示意图

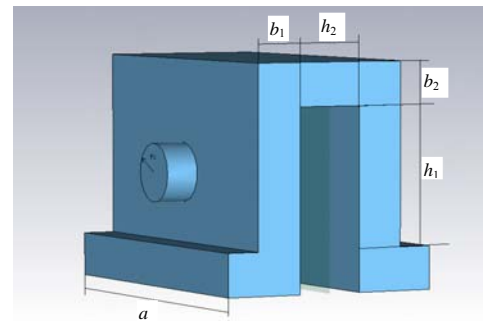


Fig.2 Right-angle folded waveguide slow wave structure
图 2 直角型折叠波导慢波结构示意图

表 1 直角型折叠波导慢波结构尺寸参数(单位:mm)

Table1 Size of right-angle bend folded waveguide slow-wave structure(unit:mm)

parameter	a	b_1	b_2	h_1	h_2	r_c	p
value	2.66	0.20	0.30	0.80	0.50	0.18	0.70

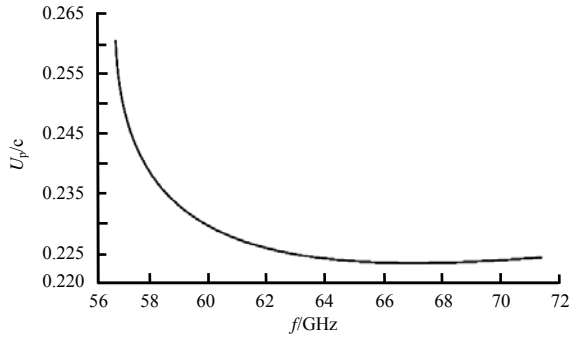


Fig.3 Dispersion curve
图 3 色散曲线

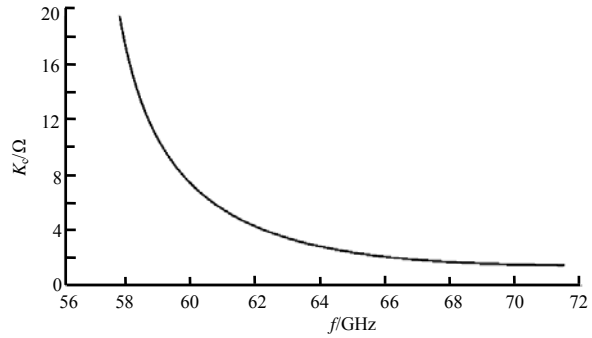


Fig.4 Interaction impedance
图 4 耦合阻抗

3 磁聚焦系统仿真验证

磁聚焦系统的磁场的分布状况、磁系统的稳定性以及其质量和体积都与材料的性能密切相关，因此磁性材料的选择十分重要。本文采用稀土钴永磁材料作为磁钢材料，根据永磁材料产品手册，剩余磁感应强度 B_r 为 1.1 T，剩磁/矫顽力 ($B_r/\mu_0 H_{cb}$) 为 1.05，极靴材料为电工纯铁。

首先验证引入集成极靴结构以后，在其他尺寸不变的情况下，通过缩小极靴内径对于磁场的影响。在 CST 软件中建立多周期模型，通过静磁工作室进行仿真计算，传统聚焦系统的结构尺寸参数如表 2 所示， JR 为极靴外半径， d 为极靴厚度， MR_1, MR_2 分别为磁钢内半径和磁钢外半径， MH 为磁钢厚度。图 5 为极靴内径对于轴向磁场的影响，图 6 为极靴内径对于 0.6 倍电子注通道半径处横向磁场的影响。随着极靴内半径的减小，轴向磁场峰值从 0.76 T 上升为 1.20 T，且磁场在峰值处可维持距离明显增大；横向磁场峰值从 0.03 T 增加至 0.068 T。后续使用 OPERA 软件对电子轨迹进行进一步验证。

表 2 传统聚焦系统结构尺寸参数(单位:mm)
Table2 Size of traditional focusing system(unit:mm)

parameter	JR	d	MH	MR_1	MR_2
value	10	0.5	2.7	2	11

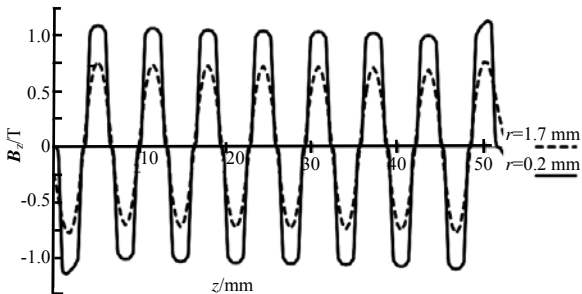


Fig.5 Influence of inner radius of pole piece on axial magnetic field
图 5 极靴内半径对轴向磁场的影响

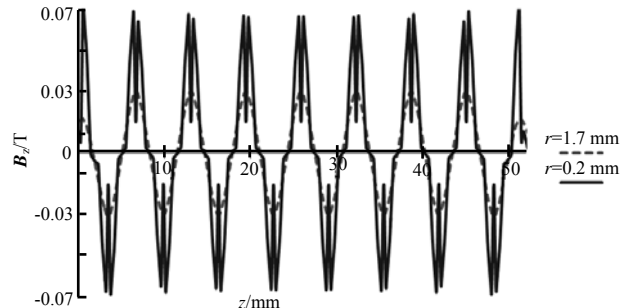


Fig.6 Influence of inner radius of pole piece on transverse magnetic field
图 6 极靴内半径对横向磁场的影响

根据直角型折叠波导慢波结构的尺寸参数对集成极靴式互作用系统进行整体设计，极靴内半径尺寸即为电子注通道半径，极靴间距 MH (即磁钢厚度) 与折叠波导尺寸的关系如下：

$$MH = n \times p - h_2 = (n-1) \times h_2 + n \times b_1 \quad (1)$$

式中 n 代表相邻两极靴内高频结构半周期 p 的个数。磁钢厚度与 n 的关系见表 3。

表 3 极靴间半周期个数与磁钢厚度对照表(单位:mm)
Table3 Relation between the number of half period and the thickness of permanent magnets

n	2	3	4	5
MH	0.9	1.6	2.3	3.0

表 4 集成极靴式结构尺寸参数(单位:mm)

Table4 Size of integrated pole piece interaction structure(unit:mm)

parameter	r_0	d	r	MH	MR_1	MR_2
value	10	0.5	0.2	2.3	2.6	11

钕钴磁钢厚度太低，会导致其整体易碎，同时会影响装配精确度，使磁钢片与极靴间产生倾斜角度，增大横向磁场，降低聚焦系统聚焦能力。故本文选取厚度 2.3 mm 的磁钢进行仿真，磁钢内半径 MR_1 的尺寸需满足条件：

$$MR_1 > \sqrt{\left(\frac{h_1}{2} + b_2\right)^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} = 1.39 \quad (2)$$

根据以上条件，对磁聚焦系统进行综合设计，同时考虑折叠波导慢波结构与磁钢的尺寸配合关系，最终确定集成极靴结构的磁聚焦系统设计尺寸参数，如表 4 所示。利用 OPERA 软件对磁聚焦系统进一步仿真验证，建立

模型如图 7 所示，因折叠波导需嵌入极靴结构中，在极靴上设计矩形开孔，为折叠波导结构加工预留孔。选取 10 块磁钢，模型包括电子枪及集成极靴结构两部分，电子枪结构包括阴极、聚焦和阳极。首先进行磁场的仿真计算，利用磁场求解器求解集成极靴结构磁场分布，观察轴线上轴向磁场及电子注通道半径处横向磁场分布，计算结果如图 8、图 9 所示。轴向峰值磁场能达到 1.12 T，且峰值磁场能维持一段距离，横向磁场峰值由 0.07 T 下降为 0.035 T，有利于对电子的聚焦。

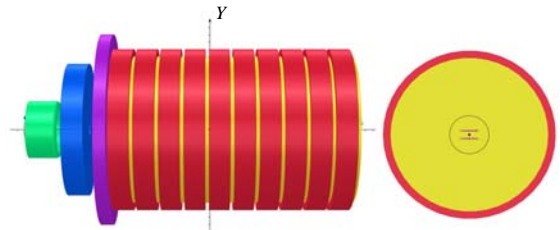


Fig.7 Model of integrated pole piece interaction structure
图 7 集成极靴结构聚焦系统模型

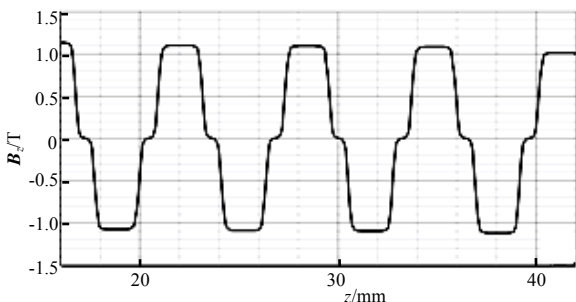


Fig.8 Axial magnetic field distribution of integrated pole piece interaction structure
图 8 集成极靴结构轴向磁场分布

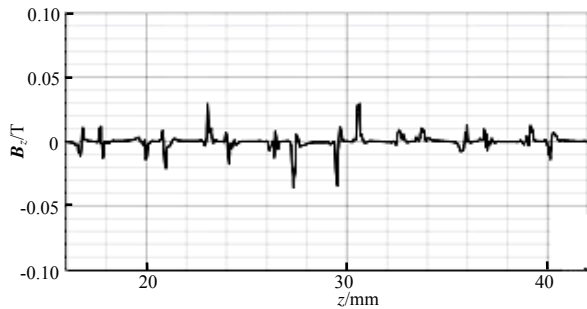


Fig.9 Transverse magnetic field distribution of integrated pole piece interaction structure
图 9 集成极靴结构横向磁场分布

使用粒子求解器模拟计算电子轨迹，当电子注电流为 324 mA 时，采用厚度 2.3 mm 的磁钢，电子轨迹如图 10 所示。由于横向磁场的增大，横向磁场对于电子轨迹的影响不能忽略，导致了电子的脉动有所增大，但对于大电流电子注，这种情况难以避免。静态状态下，磁聚焦系统可以约束大电流电子注，使电子顺利通过电子注通道。

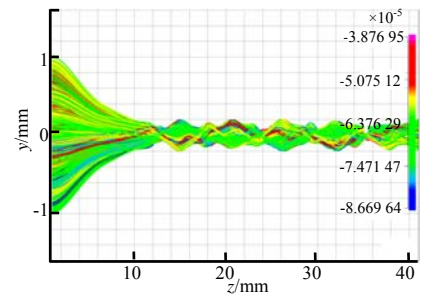


Fig.10 Distribution of electron trajectory
图 10 电子轨迹分布

4 PIC 仿真模拟结果

根据初步设计，使用 CST 粒子工作室中的 PIC 模块对整管进行建模，粒子相互作用模拟中直角折叠波导慢波结构的周期数设置为 40，工作电流为 324 mA，工作电压为 15 600 V，考虑高频损耗，将背景材料金属电导率设为 3.5×10^7 S/m，在仿真时将磁场分布等效为均匀聚焦磁场，大小为布里渊磁场的 1.414 倍^[11]，因此磁场设置为 0.8 T。所建模型如图 11 所示。

图 12 为 60~71GHz 频带内的饱和输出功率曲线，当输入功率范围在 10~90 W 时，在 61~71 GHz 频带内可达到 1 kW 以上的饱和输出功率，在 64 GHz 频点处饱和输出功率为 1.19 kW。图 13 为该结构的饱和增益曲线，频带内饱和增益低于 20 dB，可防止增益过大引起的自激振荡。采用集成极靴结构的折叠波导行波管可用于级联功率模块，前级提供 10~90 W 的功率时，在 61~71 GHz 频带内，功率模块可实现超过 1 kW 的饱和功率输出。

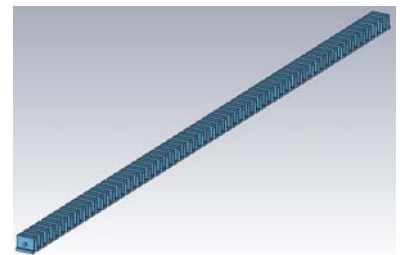


Fig.11 Model of interaction system
图 11 相互作用系统模型图

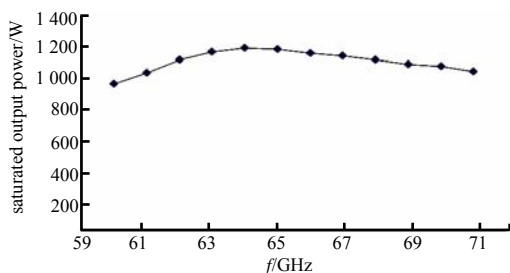


Fig.12 Saturated output power
图 12 饱和输出功率

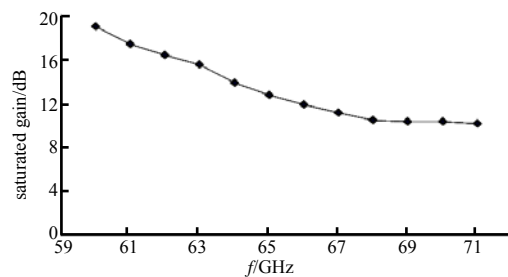


Fig.13 Saturated gain
图 13 饱和增益

5 结论

本文针对 E 波段折叠波导行波管, 结合相应工艺方法提出了一种嵌入式集成极靴结构。对直角型折叠波导进行了冷特性分析, 对集成极靴结构进行了磁场仿真、粒子仿真及互作用特性仿真。本文提出的集成极靴结构适用于级联功率模块的末级放大器, 可大幅度提高 E 波段行波管的输出功率。

参考文献:

- [1] 廖复疆. 真空电子技术: 信息化武器装备的心脏[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (LIAO Fujiang. Vacuum electronic technology: the heart of informationized weapon equipment[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.)
- [2] FENG Jinjun, CAI Jun, WU Xianping, et al. Design investigation of 10 W W-band folded waveguide TWT[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2007: 77-78.
- [3] GERUM W, LIPPERT G, MALZAHN P, et al. 94 GHz TWT for military radar application[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(1): 72-73.
- [4] 冯进军, 蔡军, 胡银富, 等. 折叠波导慢波结构太赫兹真空器件研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 238-243. (FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. THz vacuum electronics devices using folded waveguide slow wave structure[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2009, 4(3): 238-243.)
- [5] ZHANG X, FENG J, CAI J, 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.
- [6] CAROL L K, MICHAEL E R, LAWRENCE IVES R, et al. Design of overmoded interaction circuit for 1 kW 95 GHz TWT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(5): 713-720.
- [7] KENNETH E K, JACK C T, MARK A B, et al. 220 GHz power amplifier testing at Northrop Grumman[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Paris, France: IEEE, 2013: 1-2.
- [8] ALAN J T, CLARK J M, RICHARD B T. Experimental investigation of a novel circuit for millimeter-wave TWTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(5): 1054-1060.
- [9] 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.
- [10] 李飞, 郝宝良, 刘肖, 等. 集成极靴式互作用系统及其聚焦磁场的研究[J]. 微波学报, 2014(S1): 398-401. (LI Fei, HAO Baoliang, LIU Xiao, et al. A study on IPP type interaction system and its focusing magnetic field[J]. Journal of Microwaves, 2014(S1): 398-401.)
- [11] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. (LIU Shenggang. Introduction to microwave electronics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983.)