

文章编号: 2095-4980(2025)09-0906-06

E 波段混合慢波结构行波管仿真和实验

瞿波, 梁晓峰*, 梁潇, 李志良, 常通, 李安, 闫冠齐, 冯进军

(北京真空电子技术研究所, 北京 100015)

摘要: 针对未来大容量高速率通信系统对行波管(TWT)高频率、大功率、宽带宽等关键特性的迫切需求, 提出一种将螺旋线慢波结构和折叠波导慢波结构结合的新型混合慢波结构, 旨在实现行波管宽带特性和热稳定性。通过理论分析和设计仿真研究混合慢波系统中电子注参数和高频参数的传递关系, 开展注波相互作用仿真研究; 并基于研究设计了一支 E 波段混合慢波结构 TWT 样管, 进行功率和增益测试, 对比混合慢波结构和折叠波导(FWG)行波管的主要参数特性。测试结果表明, 该混合慢波结构行波管在 68~80 GHz 频率范围内输出功率 ≥ 78 W, 饱和增益 ≥ 20 dB, 带内小信号增益参数相对折叠波导降低 50% 以上, 验证了混合慢波结构的可行性和有效性。

关键词: 混合慢波结构(SWS); E 波段; 行波管(TWT)

中图分类号: TN124

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025164

Simulation and experimental studies of mixed slow wave structure for E-band TWT

QU Bo, LIANG Xiaofeng*, LIANG Xiao, LI Zhiliang, CHANG Tong, LI An, YAN Guanqi, FENG Jinjun
(Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: To address the urgent needs of future high-capacity, high-rate communication systems for key Traveling-Wave-Tube(TWT) characteristics—high frequency, high power, and wide bandwidth—a new hybrid slow-wave structure that combines a helical slow-wave structure with a folded-waveguide slow-wave structure is proposed, aiming to realize broadband performance and thermal stability in TWTs. Through theoretical analysis and design simulations, the transfer relationships between electron-beam parameters and high-frequency parameters in the hybrid slow-wave system are studied, and beam-wave interaction simulations are conducted. Based on these studies, an E-band hybrid slow-wave structure TWT prototype is designed and fabricated; its output power and gain are tested, and the main parameters are compared with those of a conventional Folded-Waveguide(FWG) TWT. Test results show that the hybrid slow wave structure TWT delivers more than 78 W output power and more than 20 dB saturated gain over 68~80 GHz, while its in-band small-signal gain parameter is reduced by more than 50% relative to the folded-waveguide device, verifying the feasibility and effectiveness of the hybrid slow-wave structure.

Keywords: mixed Slow Wave Structure; E-band; Travelling-Wave-Tube(TWT)

随着全球卫星通信技术的高速发展, 大容量、高速率、低延时通信需求呈指数级增长, 无线通信系统对频谱效率和传输容量的要求已逐步向毫米波及更高频段延伸。在此背景下, E 波段(71~76 GHz 和 81~86 GHz)凭借其频谱资源丰富、使用成本低、抗干扰性强以及支持超密集组网等优势, 成为未来无线通信回传链路的关键频

收稿日期: 2025-05-13; 修回日期: 2025-07-23

*通信作者: 梁晓峰 email:53557099@qq.com

引用格式: 瞿波, 梁晓峰, 梁潇, 等. E 波段混合慢波结构行波管仿真和实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(9):906-911. DOI:10.11805/TKYDA2025164.

Citation format: QU Bo, LIANG Xiaofeng, LIANG Xiao, et al. Simulation and experimental studies of mixed slow wave structure for E-band TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(9):906-911. DOI:10.11805/TKYDA2025164.

段^[1-4]。但实现这一目标亟需突破高频段、大功率、宽带宽微波功率放大器的技术瓶颈。

目前,在毫米波至太赫兹频段,行波管放大器因其高增益、宽带宽和高效率,成为卫星通信与雷达系统的核心功率器件。行波管的性能关键在于其慢波结构设计,该结构决定了器件的相互作用效率、带宽、增益及功率等重要指标。传统慢波结构主要分为螺旋线(Helix)、折叠波导(FWG)、耦合腔(Coupled cavity)等类型,每种结构均存在显著的技术特性和适用场景的差异。

Helix行波管具有宽带宽、高效率、高增益等特点,特别是带内色散平坦,在通信、电子对抗等领域长期占据主要地位^[5-7]。但随着电子信息系统应用向毫米波、短毫米波波带发展,螺旋线行波管结构的局限性逐渐显现:a)高频段下Helix的几何尺寸(如螺距、内径)随频率升高而急剧缩小,导致功率容量受限;b)高频损耗显著增加,热管理难度急剧上升;c)精密加工工艺要求极高,面临良品率低、成本高的瓶颈。

FWG慢波结构是一种二维全金属结构,具有功率容量大、耐高温、高频损耗小、加工兼容性强等显著优势,特别适合高频率行波管的研制应用,国内外开展了大量的研究工作^[8-13]。但相对于Helix,FWG慢波结构的固有缺陷限制了其在通信系统中的应用:a)其色散特性相对更强,带宽特性受到限制,增益等参数随频率变化显著;b)电子注通道在波导上形成微波传输通道上的不连续点,造成微波的固有反射,同时集中衰减器的微波反射也远大于Helix行波管中的碳膜衰减器,两者叠加引起带内增益波动、群时延波动、相位波动等反射相关参数的恶化;c)耦合阻抗相对Helix降低约30%~50%,造成电子效率降低,影响了整管效率的提升。这些不利因素都会影响折叠波导行波管在通信系统的应用。

结合Helix和FWG两种慢波结构的技术优势,本文提出一种混合慢波结构(H-FWG)的概念^[14-15],该结构打破了单一慢波结构的性能边界,核心理念在于色散组合。TWT的输入相互作用段采用螺旋线慢波结构以发挥其宽带、色散平坦特性,确保信号在初始放大阶段的增益平坦特性;在输出相互作用段切换为FWG慢波结构,利用其高功率容量与热稳定性,实现功率的最终放大与高效输出。基于理论和仿真分析,建立混合慢波结构的等效联立模型,并采用粒子模拟方法验证注波相互作用的动态过程。系统分析验证了混合慢波结构模型的可行性,基于仿真结果,设计并进行制管验证。

1 理论分析

图1为慢波结构的两段式结构,高频输入段采用螺旋线慢波结构,高频输出段采用折叠波导慢波结构。微波信号在输入段与电子注先经过一段距离的相互作用使电子注得到调制,与普通的螺旋线行波管相同。高频中间设置切断结构,被调制后的电子注经过切断,进入后置的折叠波导高频电路激励起新的高频场,并与调制后的电子注再次发生相互作用并放大信号功率。输出折叠波导段采用单段式,与纯折叠波导输出段结构一致,采用相速跳变方式,增加相互作用效率。

混合慢波结构与Helix和FWG的最大区别在于对电子注的调制输入段与输出段不同。电磁波在切断处终止,而电子注在Helix段调制后通过切断进入FWG慢波结构段重新激励新的信号,参量传递仅在于电子注的速度和相位参量。Helix注波相互作用分析使用诺埃的等效电路方法,FWG注波相互作用分析使用瓦因斯坦的波导激励方法。两种方法使用的归一化变量选择不同,诺埃假定电子速度可分为直流分量和交流分量,而瓦因斯坦理论中空间电荷场由交变电流激励,通过归一化和坐标系变换,在切断前后建立电子的传递变换关系。

电子注速度的传递关系如式(1)所示:

$$\frac{d\phi}{dy} = \frac{1}{C} \left[\frac{1}{1+2Cu(y, \phi_0)} - 1 \right] \quad (1)$$

式中: ϕ 和 y 为瓦因斯坦理论中电子归一化相位参量和位置参量;等式右边为诺埃理论中的速度变化后的表达式, C 为皮尔斯增益参量; u 为电子圆盘的速度; ϕ_0 是电子的初始相位。

式(2)给出了瓦因斯坦理论中电流密度和诺埃理论中电子圆盘相位之间的关系:

$$J_n = \frac{2}{k} \sum_k e^{-jn\phi_k} \quad (2)$$

式中: J_n 为传输矩阵中的激励电流密度; ϕ_k 为电子圆盘相位; n 为激励电流数; k 为电子圆盘数。

由式(1)~(2),可利用数值计算方法将Helix输入段的电子注输出信息作为FWG输出段相互作用电子的输入信

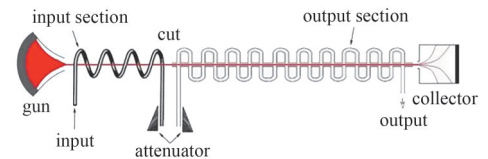


Fig.1 TWT of the mixed slow wave structure

图1 混合慢波结构行波管示意图

息，连接输入输出段的互作用计算。

2 设计仿真

为验证混合慢波结构模型的可行性及性能提升的效果，选择在 E 波段进行设计仿真研究。使用 CST 软件的粒子工作室分别建立 FWG 和混合慢波结构两种注波互作用模型，两个模型的输出段都采用 FWG 且结构参数相同，混合慢波结构模型的输入段采用螺旋线，二者的电压和电流等工作参数相同，均为 $U_k = -13.8 \text{ kV}$ ， $I_k = 70 \text{ mA}$ ，电子注发射面简化为平面均匀电流密度模型，半径为 0.1 mm ，聚焦磁场采用 0.7 T 的均匀磁场。

图 2 为 FWG 的模型，相互作用区为两端结构，输入为等周期，输出段采用一次跳变设计，详细的结构尺寸如表 1 所示。折叠波导材料设置为铜材料，电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，模型未考虑集中衰减器，采用理想匹配波导端口近似。与实际的体衰减器相比，驻波参数更低。

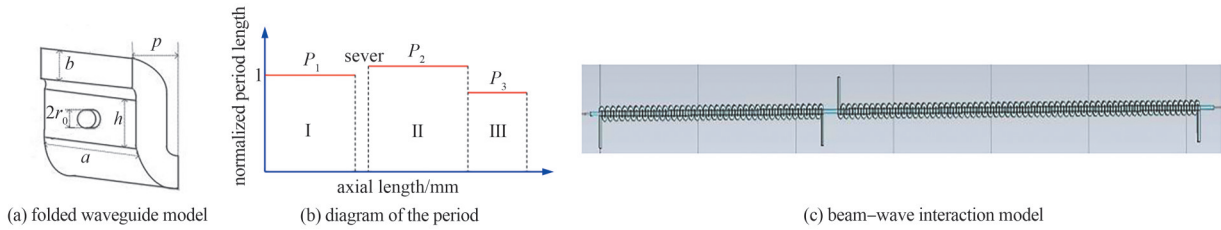


Fig.2 FWG model, period and beam-wave interaction model
图 2 折叠波导慢波结构模型和周期示意图及注波互作用仿真模型

表 1 折叠波导和混合结构尺寸(单位:mm)

Table1 Dimensions of the mixed slow wave structure(unit:mm)

a	b	h	r_0	P_1	P_2	P_3	t	w	R_3	P	R_c	m	n	R_h
2.28	0.35	0.5	0.2	0.58	0.59	0.55	0.06	0.12	0.16	0.4	1.25	0.6	0.13	0.97

图 3 为混合慢波结构的示意图，螺旋线慢波结构的尺寸如表 1 所示。螺旋线采用铜材料，电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ ，微波输入端口采用非标同轴结构，使用分段的有损耗空气材料模拟衰减器，介电常数为 1，损耗角正切为 $0.2 \sim 1.0$ 分段渐变，衰减模型设置在螺旋线中部和尾部，长度分别为 5 mm 和 7 mm 。夹持杆采用 T 形结构的氧化铍材料，以提高耦合阻抗，介电常数为 6.7 。为适应折叠波导集中衰减器的长度，切断长度设计为 10 mm 。

采用 CST STUDIO 2019 的 PIC 求解器对混合慢波结构进行全三维注波互作用仿真。分别对两种模型进行网格收敛性分析，如图 4 所示。当中心频率为 73.5 GHz ，输入功率为固定值时，以输出功率作为网格收敛性分析的标准。折叠波导在每波长大于 20 个网格线时，输出功率趋于稳定，波动为 0.4 W ，波动比例 1.8% ，因此 FWG 仿真的网格数选择每波长 25 线，共 1 101 万个网格单元，单次计算用时约 8 h 。混合结构由于螺旋线尺寸较小，需要的网格数更大，在每波长 40 线后保持功率稳定，波动为 0.9 W ，波动比例 1.1% ，因此混合结构网格数选择每波长 40 线，共 4 948 万个网格单元，单次计算时间约 24 h 。

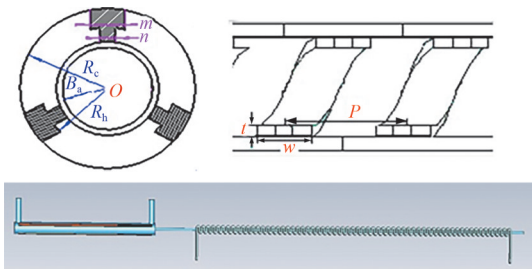


Fig.3 Mixed slow wave structure model
图 3 混合慢波结构模型示意图

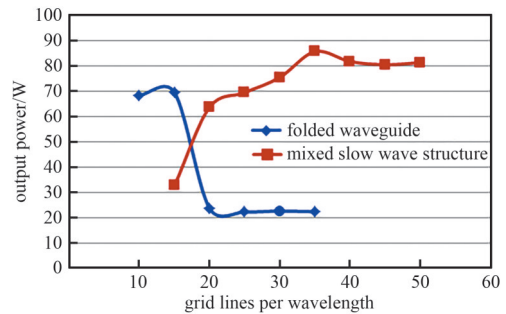


Fig.4 Grid convergence analysis of two kinds of slow wave structure models
图 4 两种互作用模型网格收敛性分析

图 5 为混合结构模型的中频点 (73.5 GHz) 处的仿真结果。从图 5(a) 中可以看出，在中频点处信号得到明显放大，可获得约 80 W 的输出功率，图 5(b) 为通过快速傅里叶变换工具分析的输出信号的频谱和幅值，表明信号输

出端口的输出功率稳定、无振荡。图 5(c)中给出了输出高频末端附近的电子能量情况, 可以看出电子注有明显的群聚。

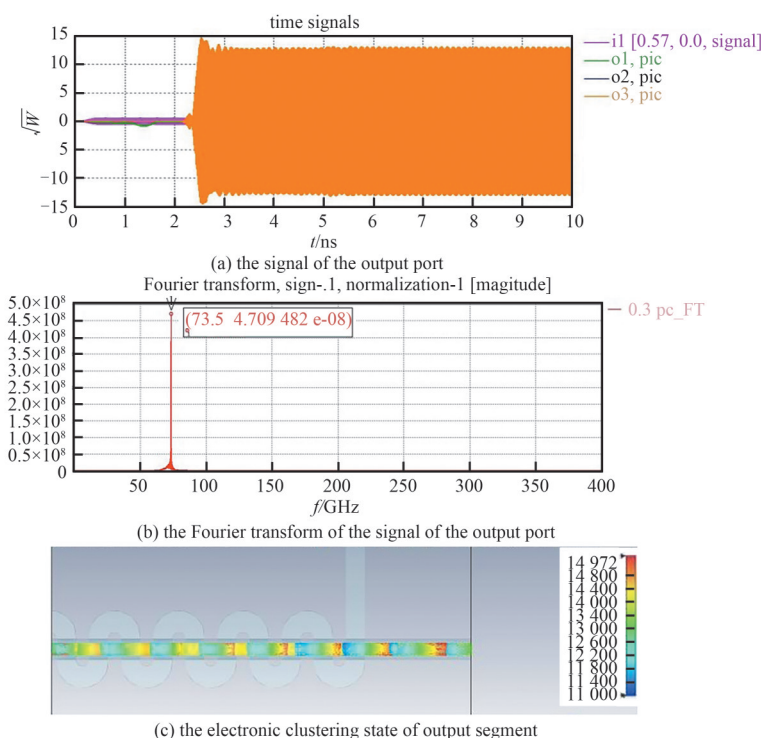


Fig.5 Middle frequency simulation results of mixed slow wave structure model
图 5 混合慢波结构中频点仿真结果

同时, 将输入信号幅值设置为零, 观察静态工作下的振荡情况, 结果如图 6 所示。此时可观察到, 在工作电压下无振荡信号产生。

以上仿真结果说明采用 Helix 和 FWG 构成的混合慢波系统可提供有效的注波互作用, 微波功率得到了有效放大, 验证了混合结构注波互作用的可行性。

对 FWG 和混合结构的带宽特性进行仿真分析对比, 饱和输出功率与增益的对比情况如图 7~图 8 所示。折叠波导在 68~80 GHz 频率范围内, 饱和输出功率在 60.65~109.40 W 之间, 带内功率差值为 48.8 W; 饱和增益在 34.8~54.9 dB 之间, 带内增益差值为 20.1 dB。混合结构在相同的频率范围内, 饱和输出功率在 62.8~95.2 W 之间, 带内功率差值为 26.4 W; 饱和增益在 28.1~33.3 dB 之间, 带内增益差值为 5.2 dB。从这两个图中可以看出, 相对于传统的折叠波导慢波结构, 混合慢波结构的增益平坦度改善明显, 原因是混合慢波结构的输入段为螺旋线。平坦的色散特性有助于改善整管增益平坦度。

3 实验验证

基于仿真结果, 开展折叠波导和混合结构的制管验证工作。两者的电子枪、收集极和磁聚焦系统均相同, 电子枪采用带离子阱的皮尔斯双阳极电子枪, 收集极采用四极降压收集极, 磁场采用周期永磁聚焦系统。混合结构的微波输入接口引入了波导-同轴结构以适应螺旋线输出。图 9 为整管测试图。

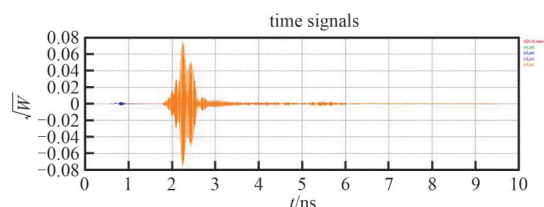


Fig.6 Oscillation analysis of the whole tube
图 6 整管振荡分析

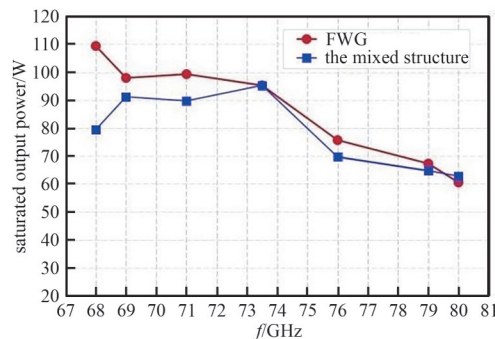


Fig.7 The output power comparison between the mixed slow wave structure and the FWG
图 7 混合慢波结构与折叠波导饱和输出功率对比

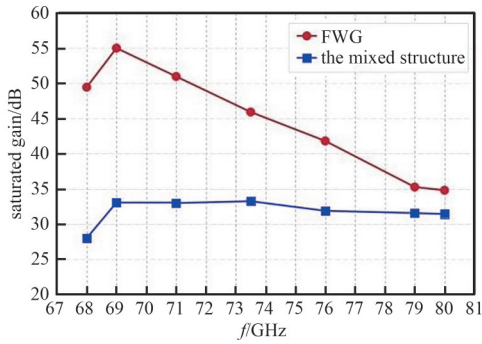


Fig.8 The saturated gain comparison between the mixed slow wave structure and the FWG

图8 混合慢波结构与折叠波导饱和增益对比

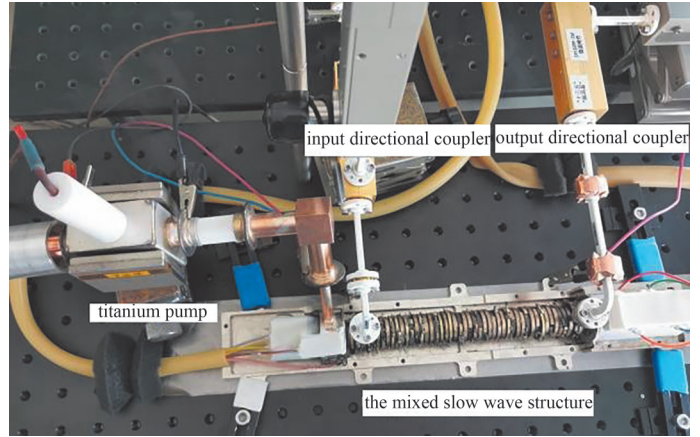


Fig.9 Photograph of the tested TWT
图9 混合慢波结构行波管整管测试图

折叠波导行波管的最佳工作电压为 13.4 kV，工作电流为 69 mA，动态流通率为 96%，静态流通率为 97%，最高功率点电子效率为 7.8%，总效率为 33%。混合慢波结构行波管的最佳工作电压为 13.9 kV，工作电流为 64 mA，动态流通率为 92%，静态流通率为 96%，约有 1.5~2 mA 的电流轰击在螺旋线上，功率最高为 27.8 W。通过热仿真分析，螺旋线的最高温度低于 300 °C 时，行波管可稳定工作。混合慢波结构行波管的最高功率点电子效率为 11.4%，总效率为 42.6%。图 10 为折叠波导和混合结构两种行波管的饱和输出功率和饱和增益对比图，在频率低于 68 GHz 时，两种结构的功率和增益均下降较快，主要是由于进入了折叠波导的截止区域。在 69~80 GHz 频率范围内，混合结构的输出功率在 70.3~99.8 W 之间，差值为 29.5 W；增益在 20.7~28.5 dB 之间，差值为 7.8 dB。在相同的频率范围内，折叠波导的输出功率在 38.7~72.2 W 之间，差值为 33.5 W；饱和增益在 33.7~44.3 dB 之间，差值为 10.6 dB。混合结构的带内饱和输出功率差值和饱和增益差值均小于折叠波导行波管。

行波管应用在通信系统时，输入功率在频带范围内大多采用等激励模式，在该模式下输出功率的波动对于系统的相对饱和状态影响更重要；同时，为满足不同天气变化带来的大气衰减的影响，需调整输入功率。因此在评估带内波动特性时，测试了输入功率为大信号和小信号两种典型情况：大信号的输入功率为中心频点的饱和输入功率值；小信号的输入功率为大信号输入功率回退 15 dB。测试结果如图 11 所示，在频率 69~80 GHz 范围内，大信号状态折叠波导和混合结构行波管的带内最大差值分别为 6.0 dB 和 4.3 dB，小信号状态分别为 16.9 dB 和 8.0 dB，混合结构的测试结果明显优于折叠波导。

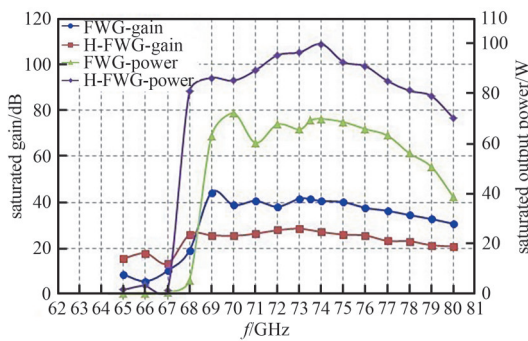


Fig.10 Saturated output power and gain of the FWG and the H-FWG
图10 折叠波导和混合结构行波管的饱和输出功率和增益

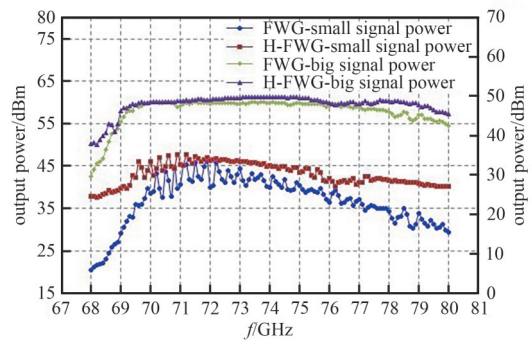


Fig.11 Output power and gain of the FWG and the H-FWG at the same stimulation
图11 等激励时折叠波导和混合结构行波管的带内输出功率

为全面对比饱和输出功率和饱和增益等带内参数，引入带内平坦度比值(X)比较两种行波管的带宽：

$$X = \max(\Delta A_0) / \text{Avg}(A_0) \tag{3}$$

式中： $\max(\Delta A_0)$ 为带内参数的最大最小值之差； $\text{Avg}(A_0)$ 为带内参数的平均值。

FWG TWT 测试饱和功率在 71~76 GHz 内的最大最小差值为 8.9 W，平均饱和输出功率为 66.8 W，则 X 为 13.3%。用此方法对饱和输出功率、饱和增益、大信号输出功率(等激励)、小信号输出功率(等激励)4 个参数的带内平坦度比值进行计算，结果越小，则平坦度越好，计算结果如表 2 所示。在频率范围 71~76 GHz 时，两种结构

的饱和功率、饱和增益、大信号输出功率 3 个参数的对比差异较小, 但小信号输出功率差别较大: 折叠波导为 23.4%, 混合结构为 11.1%。混合结构明显改善, 主要原因是在接近饱和附近区域存在增益压缩, 小信号为饱和输入回退 15 dB 处, 属于线性放大区, 小信号下输出功率平坦度更优。在频率 69~80 GHz 范围内, 混合结构的带内平坦度比值均小于折叠波导, 其中饱和功率、大信号输出功率、小信号输出功率 3 个参数的改善最为明显, 小信号增益参数由 44.5% 改善为 18.3%, 降低一半以上, 主要体现在频率高端增益的提升。

表 2 折叠波导和混合结构带内平坦度比值

Table 2 The Flatness ratio of FWG and H-FWG

frequency range/GHz	slow wave structure type	saturation output power/%	saturated gain/%	big signal output power/%	small signal output power/%
71~76	FWG	13.30	10.20	2.30	23.40
	H-FWG	13.00	10.90	3.00	11.10
69~80	FWG	67.20	35.30	12.70	44.50
	H-FWG	36.50	33.70	8.80	18.30

4 结论

本文提出了一种将 Helix 和 FWG 结合的混合慢波结构, 并进行了模拟仿真和测试实验。测试结果表明: 该混合慢波结构行波管在 68~80 GHz 频率范围内输出功率 ≥ 78 W, 饱和增益 ≥ 20 dB, 带内小信号增益参数相对折叠波导改善 50% 以上, 验证了混合慢波结构的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] Anon. The DAVID mission of the Italian Space Agency(ASI-Agenzia Spaziale Italiana)[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002,38(4):1370.
- [2] JEBRIL A, SCUCCHIA L, LUCENTE M, et al. The WAVE mission payload[C]// 2005 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA:IEEE, 2005:903-912. DOI: 10.1109/AERO.2005.1559381.
- [3] AYLLON N, ANGELETTI P, LUDWIG M, et al. An overview of European spaceborne vacuum tube amplifiers and system needs[C]// 2017 Eighteenth International Vacuum Electronics Conference(IVEC). London, UK:IEEE, 2017:1-2. DOI:10.1109/IVEC.2017.8289697.
- [4] ROBERTSON C W, CROSS A W, GILMOUR C, et al. 71~76 GHz folded waveguide TWT for satellite communications[C]// 2019 International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Busan, Korea(South):IEEE, 2019:1-2. DOI:10.1109/IVEC.2019.8744912.
- [5] CHONG C K, MENNINGER W L. Latest advancements in high-power millimeter-wave helix TWTs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010,38(6):1227-1238. DOI:10.1109/TPS.2010.2041940.
- [6] 李斌, 朱小芳, 廖莉, 等. 新型大功率毫米波螺旋线行波管高频系统研究[J]. 电子与信息学报, 2007,29(8):2019-2022. (LI Bin, ZHU Xiaofang, LIAO Li, et al. Study of novel slow wave circuit for millimeter wave power helical TWT[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007,29(8):2019-2022.) DOI:10.1109/IVELEC.2006.1666222.
- [7] QU Bo, LI Zhiliang, ZHAO Shilu, et al. Design and experimental study of an E-band CW space TWT[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023,51(4):1059-1064. DOI:10.1109/TPS.2023.3256580.
- [8] LI X, HUANG X J, MATHISEN S, et al. Design of 71~76 GHz double-corrugated waveguide traveling-wave tube for satellite downlink[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2018,65(6):2195-2200. DOI:10.1109/TED.2018.2791559.
- [9] KOWALCZYK R, ZUBYK A, MEADOWS C, et al. High efficiency E-band MPM for communications applications[C]// 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA:IEEE, 2016:1-2. DOI:10.1109/IVEC.2016.7561861.
- [10] HWU R J, KRESS D K, JUDD S V, et al. 81~86 GHz E-band 90 watts high power traveling wave tubes[C]// 2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA, USA:IEEE, 2016:1-2. DOI:10.1109/IVEC.2016.7561862.
- [11] LI Fei, XIAO Liu, HE Jun, et al. Development of E-band continuous wave folded waveguide TWT[C]// 2021 the 22nd International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Rotterdam, Netherlands: IEEE, 2021: 1-2. DOI: 10.1109/IVEC51707.2021.9722528.
- [12] 刘世硕, 蔡军, 郭显平, 等. 折叠波导行波管 PIC 模拟中的相位分析方法研究[J]. 微波学报, 2016,32(4):73-77. (LIU Shishuo, CAI Jun, WU Xianping, et al. Study of the phase analysis method for folded waveguide traveling-wave tubes[J]. Journal of Microwaves, 2016,32(4):73-77.) DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.201604015.
- [13] 王书见, 薛谦忠. 毫米波折叠波导行波管的研究[J]. 微波学报, 2013,29(4):91-96. (WANG Shujian, XUE Qianzhong. Study on millimeter wave folded waveguide traveling-wave tube[J]. Journal of Microwaves, 2013,29(4):91-96.)