

文章编号: 2095-4980(2023)10-1194-05

E 波段连续波空间行波管研制进展

李志良, 李梦园, 梁文龙, 李安, 梁晓峰, 瞿波

(中国电子科技集团公司 第十二研究所, 北京 100015)

摘要: 针对高波段空间行波管的卫星通信应用需求, 介绍了 E 波段连续波空间行波管的研制情况。该行波管通过进一步优化折叠波导慢波结构参数和调整周期跳变方案, 实现改善带内增益波动性、提高效率的目的。研制出的样管在 14.7 kV、74 mA 条件下, 实现电子注动态流通率高于 98%, 在 71~76 GHz 范围内, 输出功率大于 85 W, 总效率大于 37%, 增益大于 40 dB。

关键词: E 波段; 折叠波导; 连续波; 空间行波管

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023185

Development of an E-band continuous wave space TWT

LI Zhiliang, LI Mengyuan, LIANG Wenlong, LI An, LIANG Xiaofeng, QU Bo

(The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: According to the satellite communication application requirements for high-frequency space Traveling Wave Tube(TWT), the experimental results of an E-band continuous wave space TWT are introduced. The parameters of the Folded Waveguide(FWG) slow wave structure are further optimized and the phase velocity taper scheme is adjusted to reform the gain fluctuation, improve the overall efficiency. A prototype tube is fabricated and tested with beam voltage of 14.7 kV and beam current of 74 mA, the experimental measurement results show this prototype is capable of producing an output power up to 85 W and a gain above 40 dB, with the total efficiency over 37% from 71 to 76 GHz. In addition, the TWT has achieved a beam transmission over 98% at the continuous wave operation.

Keywords: E-band; Folded Waveguide; Continuous Wave; space Traveling Wave Tube

空间行波管是星载转发器与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)发射机的关键部件, 其作用是射频功率放大。随着高速率通信技术的快速发展, 以真空器件为代表的毫米波射频源在高分辨力成像、高通量通信等诸多领域得到愈来愈多的应用^[1-2]。其中 E 波段行波管的研制已成为各主要研究机构的研究热点^[3-10], 为满足未来天基通信系统等方面的需求, 本文开展了可用于通信卫星下行链路的高效率 E 波段(71~76 GHz)空间行波管的研制工作, 其中电子光学、输能系统和收集极等部件均采用文献[10]的结构, 本文仅介绍高效率折叠波导高频系统的设计与优化。

1 折叠波导(FWG)高频系统的设计

表 1 为各研究机构在 E 波段行波管方向的最新研究成果。由此可见, 对比部分 81~86 GHz 行波管的性能, 同时鉴于 71~76 GHz 的特殊应用环境, 该波段行波管的效率等指标还需进一步提升。

表 1 部分 E 波段连续波行波管的工作参数

Table 1 Parameters of some CW E-band TWTs

company	f/GHz	P_{out}/W	efficiency/%	U/kV	I/mA
L3 ^[4]	83~88	200.0	30.0	20.8	200
Innosys ^[5]	81~86	90.0	—	16.0	90
BVERI ^[6-7]	81~86	120.0	43.0	15.8	77
AIRCAS ^[8]	81~86	76.7	26.7	16.5	80
BVERI ^[9]	71~76	63.1	23.6	16.5	80
BVERI ^[10]	71~76	87.0	31.0	14.8	73

根据文献[10]的设计及测试结果，本文的研究仍基于图 1 中的传统 FWG 结构。为进一步改善带内输出功率及增益的波动性，同时提高电子效率和总效率，通过优化 FWG 慢波结构参数，获得较为平坦的色散曲线和较高的耦合阻抗。同时，由图 2 可见，优化后的注电压线远离上截止频率，这样可避免止带振荡对输出的影响。根据高频特性理论，利用三维电磁模拟软件对 FWG 慢波结构的高频特性进行模拟分析。图 3 给出了利用 CST 软件仿真的相光速比 (V_p/c) 和轴向耦合阻抗曲线 (K_c)。从而确定出调整后的 E 波段 FWG 慢波结构的结构尺寸如表 2 所示。

表 2 E 波段折叠波导慢波结构尺寸(mm)

Table 2 Dimensions of the FWG circuit(mm)

parameter	value
a	2.28
b	0.35
h	0.50
$P_1/P_2/P_3$	0.59/0.61/0.55
r_c	0.21

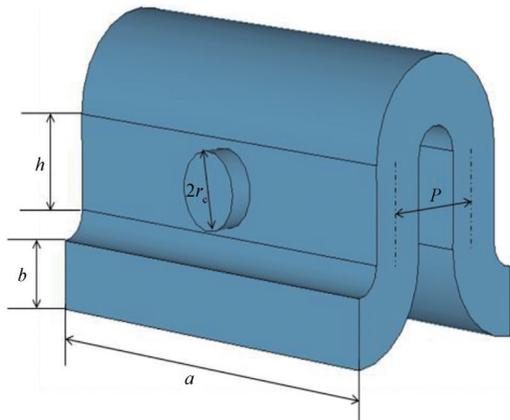


Fig.1 Typical FWG 3D solid model
图 1 传统折叠波导模型

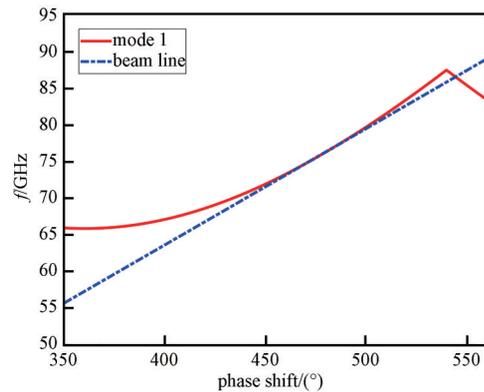
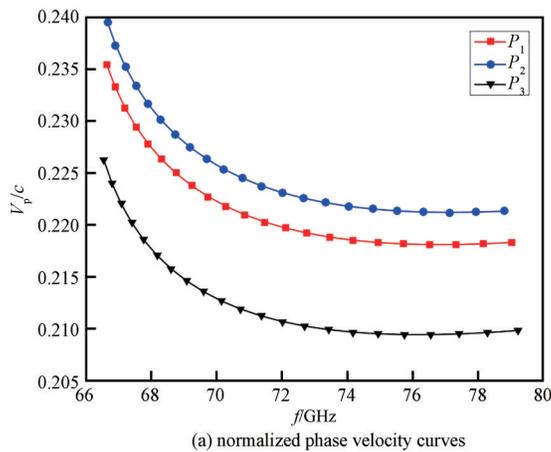
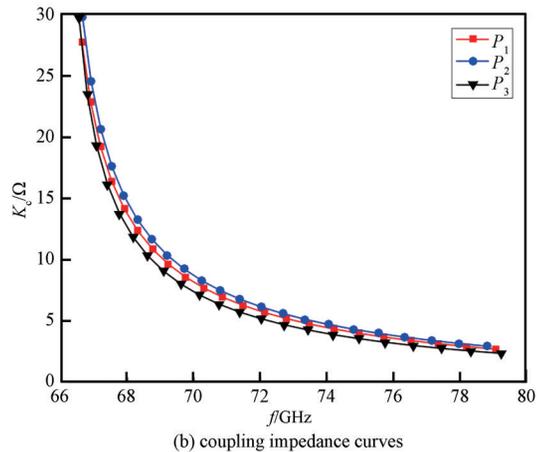


Fig.2 Dispersion curve of slow wave structure
图 2 色散特性



(a) normalized phase velocity curves



(b) coupling impedance curves

Fig.3 Cold characteristics of the FWG for the three sections with P_1, P_2 and P_3

图 3 不同半周期折叠波导的冷特性曲线

同时借鉴螺旋线行波管设计中成熟的螺距跳变技术，对该 FWG 行波管的注波相互作用电路进行了进一步优化，在改善带内增益波动性的同时兼顾提高电子效率等指标。采用图 4 中的三段式周期跳变结构，其中输入段(I)用来建立增长波，提供一个群聚良好的电子注；中间段(II)为相速增加段，在这一段上尽可能形成电子群聚；输出段(III)为相速降低段，这一段群聚电子应尽可能地将能量交给高频场，以提高整管的电子效率。使用 MTSS 仿真软件开展了注波相互作用计算(图 5)，并与文献[10]中计算结果进行比对。从图 5 可见，在工作频带内 (71~76 GHz)，输出功率和增益的波动性均获得改善，如

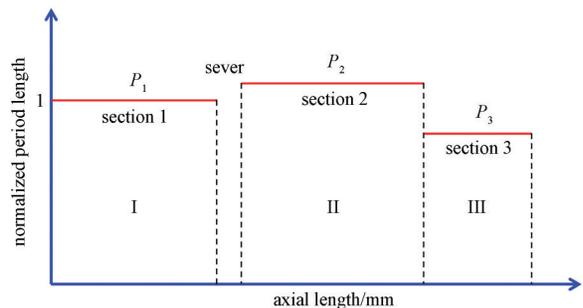


Fig.4 Periods of the phase velocity taper FWG
图 4 折叠波导周期跳变结构示意图

增益波动性从 13.4 dB/5 GHz 降低为 6.3 dB/5 GHz。同时利用 CST 软件的粒子模拟功能在中心频点(73.5 GHz)进行设计结果验证(图 6)，从图 6 可见，在 2 mW 输入功率时，可以获得 105 W 的输出功率，约 47.2 dB 的增益，且输出频谱稳定，与图 5 中计算结果基本一致，从而证实了设计方案的可行性。

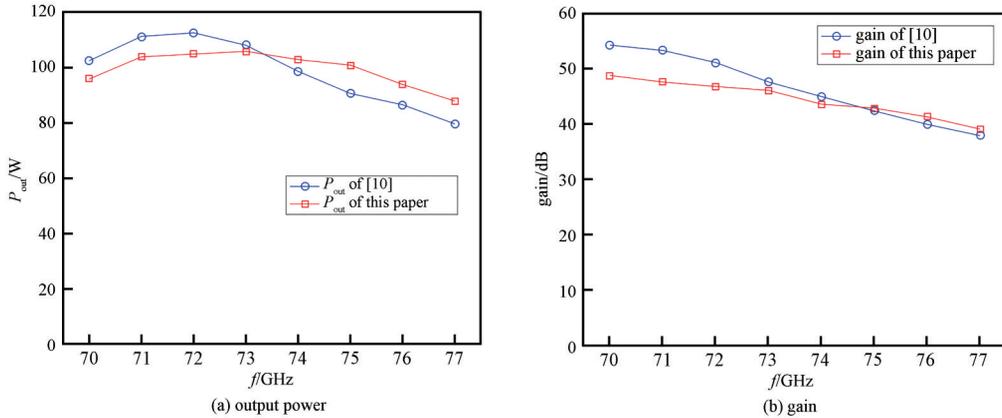


Fig.5 Comparison between the simulation results of this paper and [10]
图5 本文与文献[10]的功率与增益曲线比较

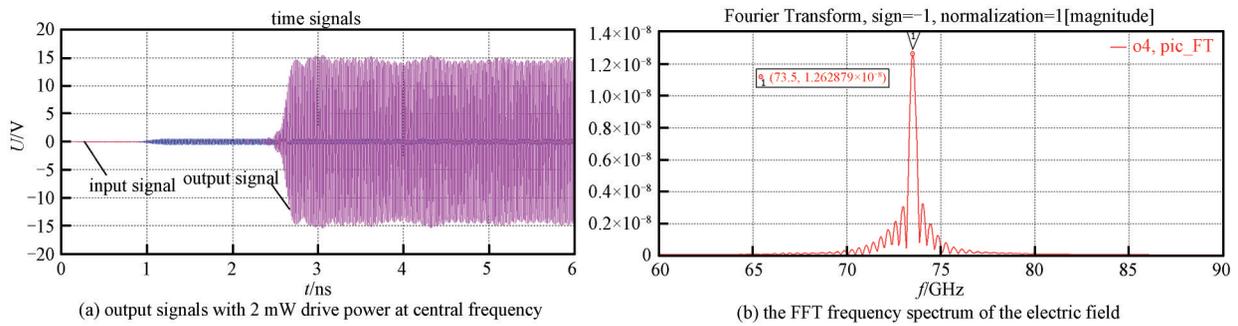


Fig.6 Output signals of PIC with 2 mW drive power at central frequency
图6 中心频点的仿真输出结果

2 实验结果

基于上述优化后高频部件的设计结果，开展了E波段FWG高频系统空间行波管的制管验证，并进行了实验测试。图 7(a)为E波段FWG空间行波管样管，该管质量约 1.5 kg，尺寸 $\leq 310\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 。图 7(b)为该管输出段的冷测驻波曲线，可见在 71~76 GHz 工作范围内，驻波系数低于 2，保证了有较好的输出性能。

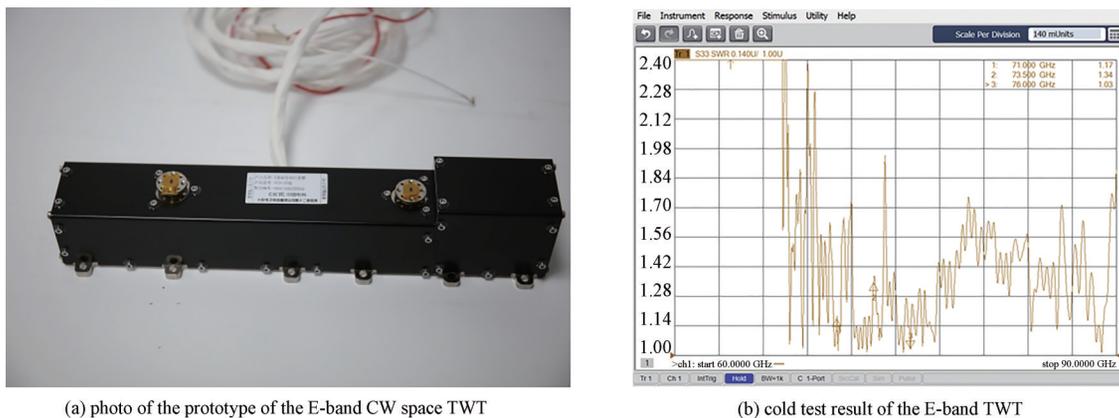


Fig.7 Prototype of the E-band FWG space TWT and its VSWR result
图7 E波段折叠波导空间行波管样管和冷测驻波比曲线

经调试，样管在连续波状态下电子注的动态流通过率高于 98%。图 8(a)~(c)分别为该样管对应频率的饱和输出功率、增益和效率曲线。由图可见，在 14.7 kV、74 mA 条件下，样管在 71~76 GHz 的频率范围内输出功率大于

85 W, 增益超过 40 dB, 电子效率高于 7.8%, 总效率大于 37%, 带内增益波动性为 6 dB/5 GHz。对比文献[9]中的结果, 带内的增益波动性和效率均获得改善或提高, 从而验证了设计方案的可行性。同时, 利用频谱仪测试了该行波管的输出频谱(图 8(d)), 由图可见, 在中心频点 73.5 GHz 处信噪比大于 50 dBc, 且没有其他杂波谱线, 证实了该管输出稳定。

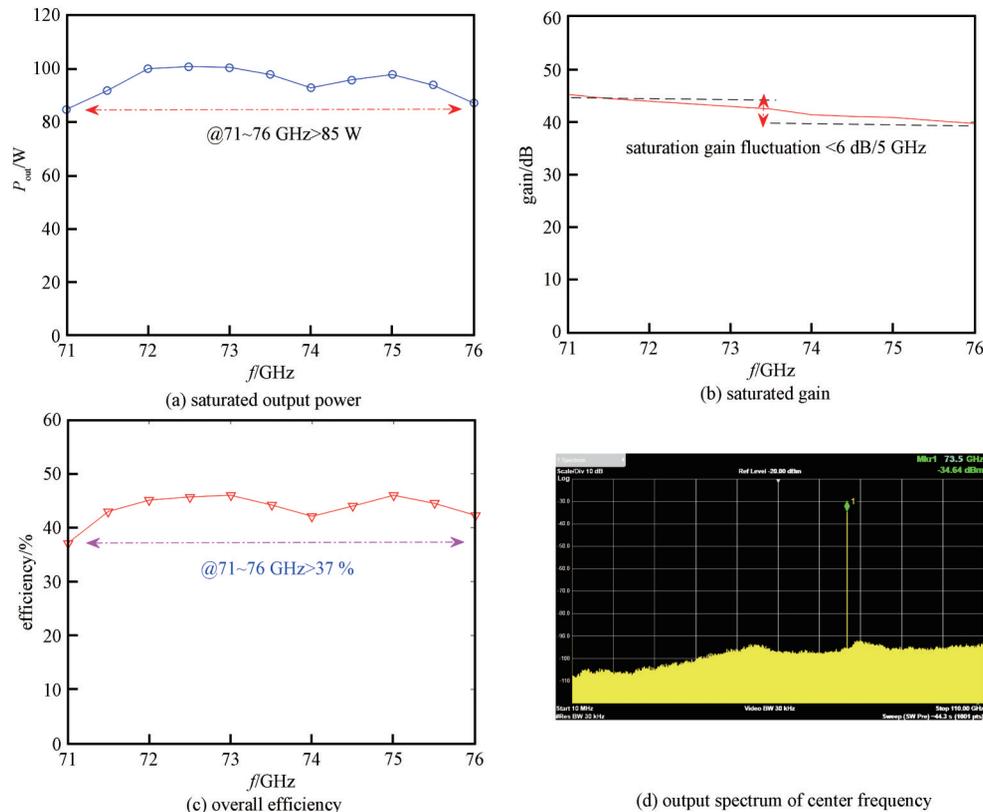


Fig.8 Experimental results of the E-band CW space TWT

图 8 E 波段连续波空间行波管的实验结果

3 结论

本文主要介绍了 E 波段连续波空间行波管的研制情况。样管在 14.7 kV、74 mA 条件下, 实现电子注动态流通过率优于 98%, 在 71~76 GHz 范围内输出功率大于 85 W, 电子效率高于 7.8%, 总效率大于 37%, 增益大于 40 dB 的测试结果, 为今后短毫米波空间行波管在空间环境下的应用奠定了坚实的基础。之后工作将主要针对应用需求, 进一步提升功率及效率, 优化非线性特性, 并提高样管在空间环境下的适应性和可靠性。

参考文献:

- [1] FENG Jinjun, CAI Jun, HU Yinfu, et al. Development of W-band folded waveguide pulsed TWTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014,61(6):1721-1725. doi:10.1109/TED.2014.2307476.
- [2] COOK A M, WRIGHT E L, NGUYEN K T, et al. Demonstration of a W-band traveling-wave tube power amplifier with 10 GHz bandwidth[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021,68(5):2492-2498. doi:10.1109/TED.2021.3068926.
- [3] LI Xiang, HUANG Xuejiao, 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.
- [4] 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.
- [5] HWU R J, KRESS D K, JUDD S V, et al. 81~86 GHz E-band 90 W 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.