

文章编号: 2095-4980(2024)01-0006-05

耳型折叠波导慢波结构 W 波段行波管

高 畅, 张小青, 穆涵硕, 潘 攀, 蔡 军, 冯进军

(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: 毫米波行波管具有大功率、宽频带、高增益等特点, 广泛用于雷达、高速通信、电子对抗等现代军事装备中。为提高折叠波导耦合阻抗并考虑工程应用性, 提出一种耳型折叠波导新型慢波结构。与常规矩形波导相比, 工作频带内耦合阻抗提高 30% 以上, 损耗降低 10%。研制的耳型折叠波导 W 波段行波管, 在工作电压 21.9 kV, 电流 210 mA, 占空比为 5% 时, 10.8 GHz 带宽内输出功率大于 192 W, 峰值功率达 278 W, 电子效率和增益分别达到 6.3% 和 44.6 dB, 行波管工作稳定。

关键词: 行波管; W 波段; 新型折叠波导慢波结构

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023191

A W-band Traveling Wave Tube with ear-Folded Waveguide slow-wave structure

GAO Chang, ZHANG Xiaoqing, MU Hanshuo, PAN Pan, CAI Jun, FENG Jinjun

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

Abstract: Millimeter-wave Traveling Wave Tubes (TWTs) have the characteristics of high power, broad band and high gain, and are widely used in modern military electronic equipment, such as radar, high-speed communication and electronic countermeasures, etc. In order to improve the coupling impedance of the Folded Waveguide (FWG) and the engineering applicability, a novel type of ear-FWG is proposed, which increases the coupling impedance in the working frequency band by more than 30% and reduces the loss by 10% compared with the conventional rectangular waveguide. When the ear-FWG W-band TWT operates at 21.9 kV and 210 mA, and the duty cycle is 5%, the output power in the 10.8 GHz bandwidth is higher than 192 W, the peak power reaches 278 W, the electron efficiency and gain reach 6.3% and 44.6 dB, respectively, and the TWT works stably.

Keywords: Traveling Wave Tubes; W band; novel Folded Waveguide slow-wave structure

毫米波行波管具有功率大、频带宽、增益高等特点, 广泛用于卫星通信、雷达、电子对抗等领域。慢波结构作为行波管的核心部件, 与行波管工作带宽、功率、效率等密切相关, 直接决定了行波管的性能^[1]。随着技术人员对慢波结构的探索, 各类新型慢波结构不断涌现, 折叠波导慢波结构在高频段具有鲜明的优点^[2]。中国电科 12 所研制的一种低电压高效率 W 波段脉冲行波管, 采用非半圆弯曲波导边界折叠波导慢波结构^[3], 在工作电压 16 kV, 电流 125 mA 下, 6 GHz 带宽内输出功率大于 125 W^[4]; 之后提出一种适用于 W 波段行波管的筒型重入式折叠波导慢波结构, 该脊加载结构大幅提高了耦合阻抗, 行波管在工作电压 12.4 kV, 电流 50 mA, 互作用长度 30 mm 的条件下, 8 GHz 带宽内输出功率超过 30 W^[5]。美国 L3 公司研制的 W 波段脉冲行波管, 慢波电路采用整体极靴式折叠波导, 电路散热好, 采用双周期聚焦结构, 在工作电压 21 kV, 电流 324 mA 下, 0.4 GHz 带宽内输出功率大于 300 W^[6]。美国海军实验室研制的宽频带 W 波段行波管功率放大器, 采用弯曲折叠波导慢波结构, 在工作电压 20 kV, 电流 140 mA 下, 实现了 10 GHz 带宽内输出功率大于 100 W^[7]。本文提出一种耳型折叠波导新型慢波结构, 给出了耳型折叠波导结构特征, 并与相同色散条件下的常规矩形波导冷特性进行对比; 根据应用提出的输出功率、工作电压等指标, 完成耳型折叠波导互作用电路设计并对其进行性能测试。

收稿日期: 2023-07-11; 修回日期: 2023-08-21

1 结构特征

耳型折叠波导慢波结构是在矩形折叠波导的基础上进行改进的，具有高耦合阻抗、工程化应用性，其单周期结构示意图如图 1(b)所示。耳型折叠波导的宽边尺寸为 a ，窄边尺寸为 b ，弯曲宽度为 d ，慢波结构的几何周期记作为 p ，直波导高度为 h ，横向波导长度为 l ，电子注通道半径为 r_c ，内、外耳型结构波导圆弧分别为 R_w 和 R_n 。

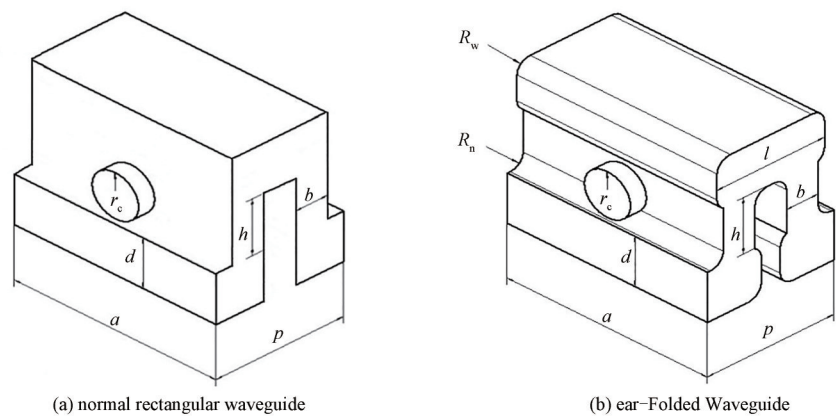


Fig.1 Schematic view of folded waveguide slow-wave structure
图1 单周期慢波结构示意图

改进型的耳型折叠波导改变了常规矩形波导内部场强分布，提高了电子注通道附近的场强强度，使慢波结构耦合阻抗得到提升。利用电磁模拟软件 CST 本征模求解器对其结构参数进行优化设计^[8]，分析其对色散特性、耦合阻抗和衰减系数等慢波结构冷特性的影响。在保证频带内电磁波相速和电子注同步、耦合阻抗高的情况下，综合考虑零件加工、聚焦系统、整体长度等因素，初步确定了折叠波导慢波结构各个尺寸参数，如表 1 所示。

表1 折叠波导慢波结构的尺寸参数(单位:mm)
Table1 Parameters of ear-FWG slow-wave structure(unit:mm)

	a	b	h	p	r_c	d	l	R_n	R_w
ear-FWG	1.9	0.3	0.54	1.30	0.24	0.45	1.1	0.14	0.14
normal FWG	1.9	0.3	0.54	1.28	0.24	0.45	—	—	—

为对比分析耳型折叠波导耦合阻抗的提升幅度，计算了一组常规矩形波导慢波结构冷特性，结果如图 2 所示。2 种折叠波导的归一化相速值基本一致，频带内耳型折叠波导慢波结构耦合阻抗提高 30% 以上，损耗降低 10% 以上。耳型折叠波导简单，易于加工，可用于 W 波段行波管功率提升研究。

2 相互作用电路设计

W 波段行波管的饱和和工作状态设计过程必须考虑大信号理论，利用三维模拟软件 CST 与 MTSS 对行波管进行注-波相互作用计算，实现在 10 GHz 带宽内输出功率大于 200 W 的设计目标。

基于上述慢波结构冷特性结果，考虑色散、耦合阻抗和损耗等特性，利用电子科技大学开发的 MTSS 微波管模拟套装软件对耳型折叠波导慢波结构相互作用电路的输入输出段长度、切断位置长度、输入功率等进行参数优化，得到如图 3 所示的相互作用电路的输出功率曲线和增益特性曲线。结果显示，耳型折叠波导 W 波段行波管在工作电压 22.1 kV，电流 170 mA 下，90~100 GHz 频带内，饱和输出功率≥213 W，电子效率≥5.7%，增益≥25 dB，满足设计目标。其中，频点 97 GHz 输出功率最高为 273 W，电子效率达到 7.3%。

在相同的工作电压和电流条件下，计算了一组常规矩形折叠波导 W 波段行波管的输出功率和增益特性曲线。与常规矩形波导相比，在增益特性相近时，耳型折叠波导慢波结构的相互作用长度缩短了 10%，在 90~100 GHz 频带内饱和输出功率增幅大于 10%，最大功率相差 53 W。

利用 CST PIC 粒子工作室的时域电磁场分析方法，模拟出电磁场与粒子束之间的相互作用过程，提取相互作用过程中的粒子运动状态、能量分布、电磁场信号演变过程中的幅度和相位等信息，预测行波管的频谱、有无振荡功率等性能。由图 4 的仿真结果可知，在工作电压 21.5~22.5 kV 范围内，当无信号激励时，15 ns 后输出端口的功率稳定在 0，无振荡频谱产生。

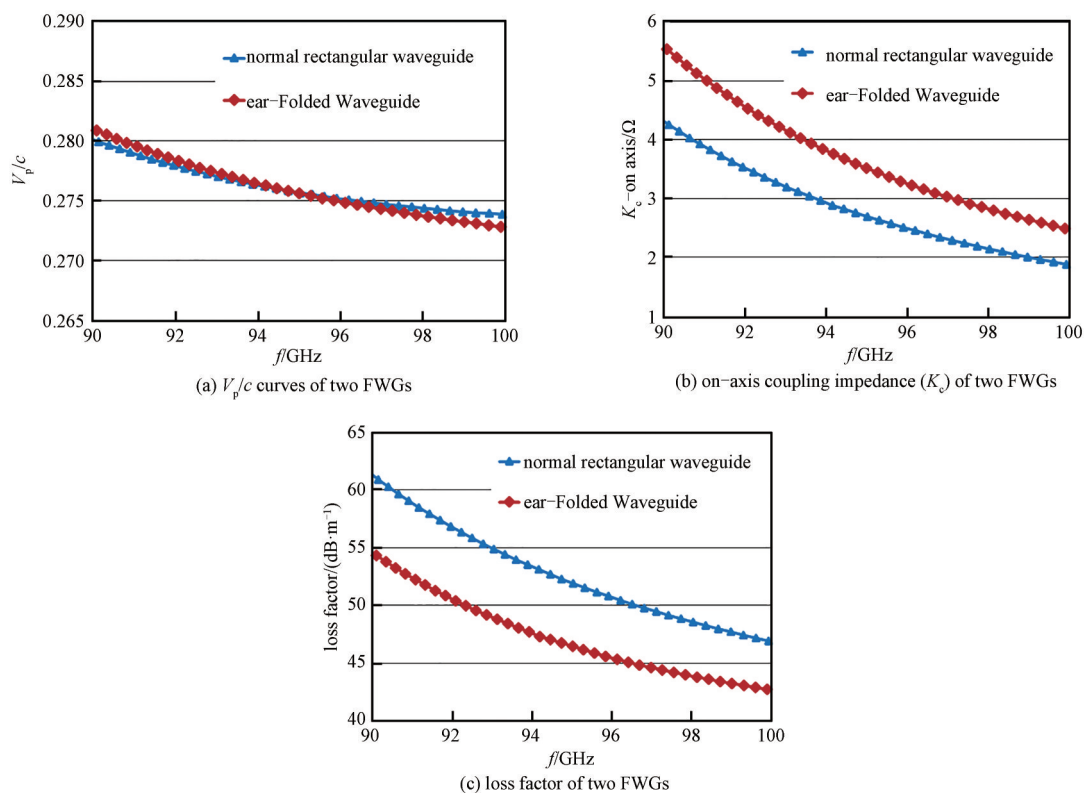


Fig.2 Cold characteristics of the normal rectangular waveguide and ear-folded waveguide

图2 常规矩形弯曲波导和耳型折叠波导高频特性对比

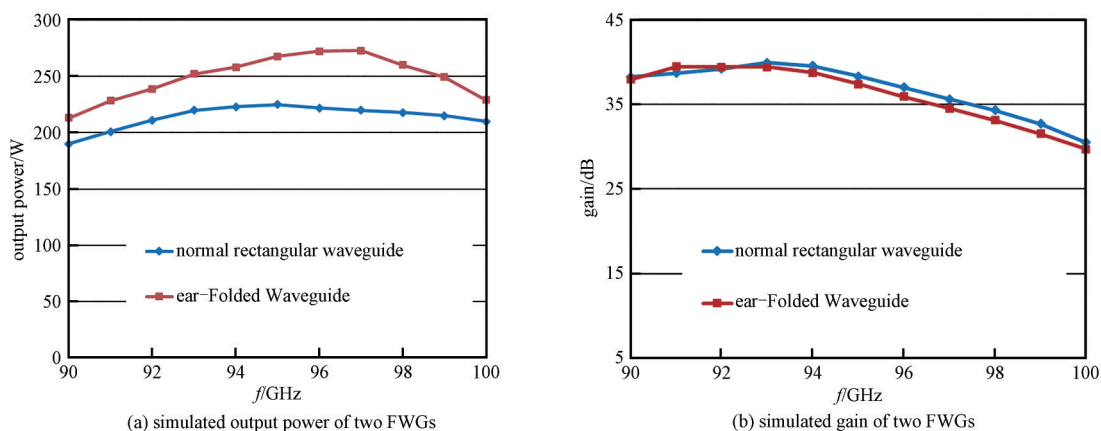


Fig.3 Simulated output power and gain of two FWGs

图3 耳型折叠波导和常规矩形波导的相互作用仿真结果对比

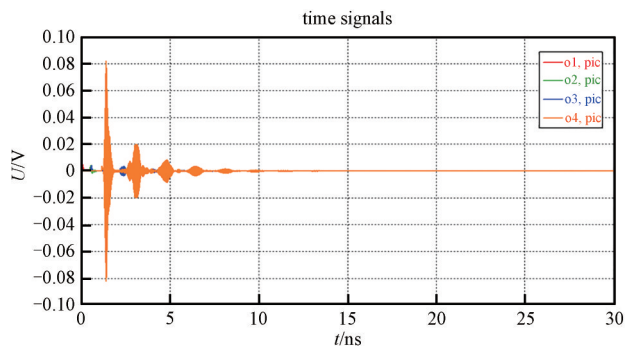


Fig.4 CST PIC simulation of oscillation

图4 CST PIC振荡验证

电磁波信号进入相互作用电路后，与电子注进行能量交换得到放大，由图 5(a)所示的相互作用电路端口电压可知，输入 25 mW 激励信号，频点 97 GHz 的输出功率达到饱和状态，最终输出端口的电场幅值稳定于 23.45 V，计算得到的饱和输出功率为 275 W，与 MTSS 软件计算的 97 GHz 频点功率幅值基本吻合。图 5(b)所示的输出信号频域图显示，输出信号在频点 97 GHz，没有其他杂波和谐波信号，频谱纯净。

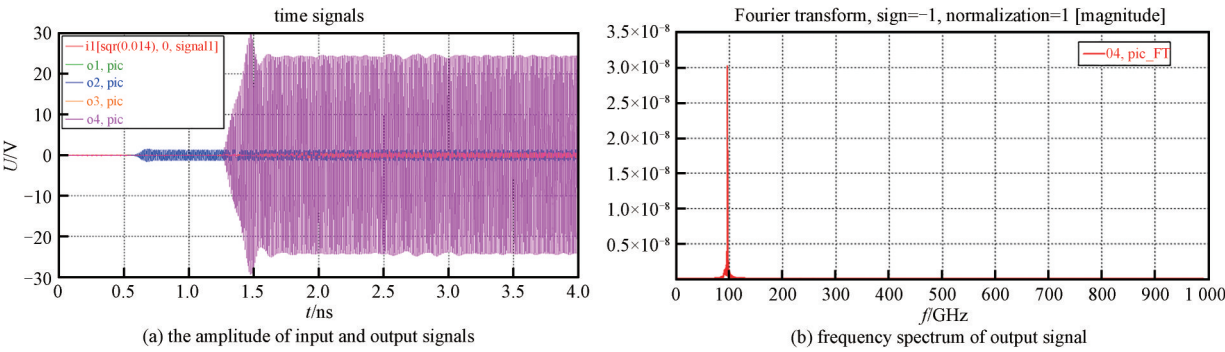


Fig.5 CST PIC simulation result at 97 GHz
图 5 CST PIC 注-波相互作用仿真结果

3 实验研究

慢波结构是决定行波管总体性能的关键因素，微小的尺寸加工误差都会对整个高频结构的色散特性、耦合阻抗有很大影响。利用高速计算机数控机床加工了如图 6 所示的耳型折叠波导慢波结构。使用三维影像测量仪进行全参数检测，各个参数尺寸(如电子注通道与折叠波导外形的同轴度、折叠波导深度和周期等)均在设计公差范围内。

采用矢量网络分析仪测试耳型折叠波导慢波电路端口的电压驻波比(Voltage Standing Wave Ratio, VSWR)，测试结果如图 7 所示，在 86~107 GHz 频带内，输出端口的 VSWR 优于 1.5，匹配良好，满足设计要求。

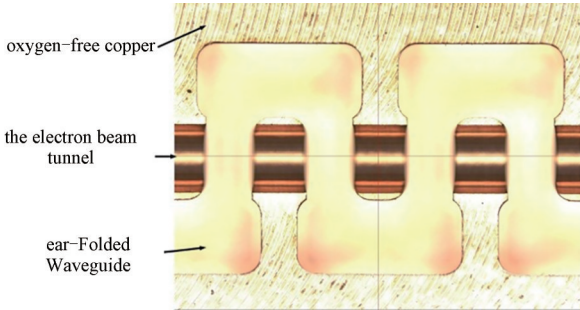


Fig.6 Measurement image of ear-FWG slow-wave circuit
图 6 耳型折叠波导慢波线的测量影像

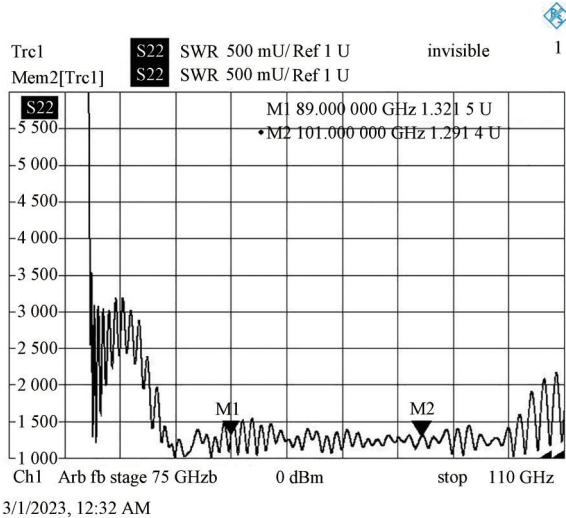


Fig.7 Tested VSWR of ear-folded waveguide
图 7 耳型折叠波导端口 VSWR 测试曲线

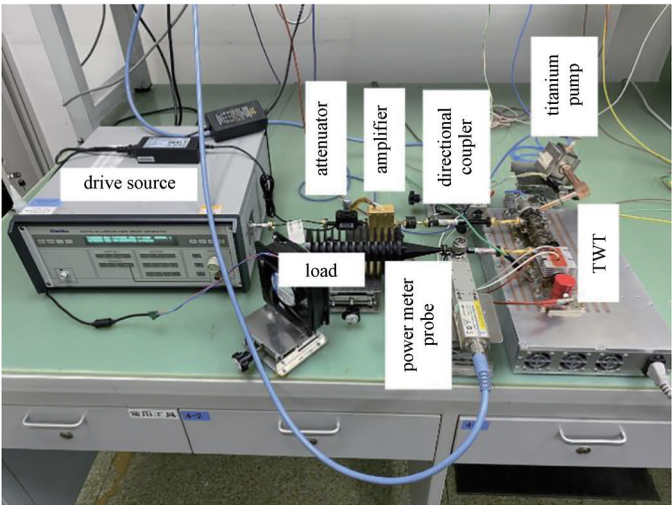


Fig.8 Photograph of the tested TWT
图 8 行波管测试照片

针对耳型折叠波导 W 波段行波管的设计，进行制管验证。耳型折叠波导 W 波段行波管采用皮尔斯电子枪发射电子，形成具有一定电流强度的电子注，同时使用结构紧凑轻巧的周期永磁聚焦系统进行电子注聚束，通过金刚石盒型输能窗传输电磁波信号，三级降压收集极回收相互作用后剩余的电子能量，钛泵保证器件真空度。行

波管测试照片如图 8 所示, 使用定向耦合器和功率计对信号的输入和输出进行功率监测, 在工作电压 21.9 kV, 电流 210 mA 下, 占空比为 5% 的测试结果如图 9 所示, 在 90.1~100.9 GHz 频带内输出功率大于 192 W, 峰值功率为 278 W, 增益和电子效率分别可达 44.6 dB 和 6.3%, 整管流通率为 93%, 行波管工作稳定。因此, 测试结果证实了耳型折叠波导慢波结构用于短毫米波及太赫兹行波管设计的可行性。

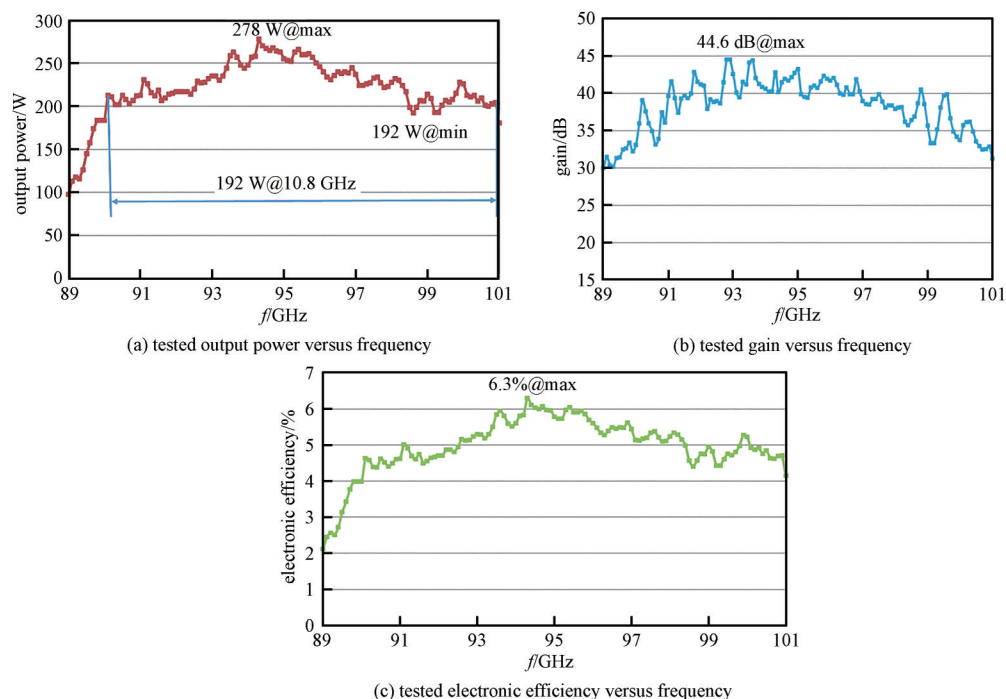


Fig.9 Tested results of the TWT

图 9 测试结果曲线

4 结论

本文提出的耳型折叠波导是基于常规矩形波导的工程化改进, 有效提高了慢波结构耦合阻抗, 利用电磁模拟软件 CST 和 MTSS 对高频特性和注-波相互作用电路进行优化设计, 研制出具有宽频带、大功率和易于加工制造的耳型折叠波导 W 波段行波管。在工作电压 21.9 kV, 电流 210 mA, 占空比为 5% 时, 10.8 GHz 带宽内行波管输出功率大于 192 W, 增益大于 33 dB, 电子效率大于 4.4%。后续开展耳型折叠波导慢波结构相速跳变相互作用电路研究, 通过建立注-波相速再同步条件, 进一步提升行波管输出功率和效率。

参考文献:

- [1] 侯艳. 曲折波导行波管的理论与实验研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013. (HOU Yan. Theoretical and experimental study on folded waveguide traveling wave tube[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.)
- [2] 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): 249-254. (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): 249-254. doi:10.3969/j.issn.1673-5692.2009.03.005.)
- [3] 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. doi:10.1109/TED.2014.2349651.
- [4] 杜英华, 蔡军, 张小青, 等. 低电压高效率 W 波段脉冲行波管设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(4): 726-729. (DU Yinghua, CAI Jun, ZHANG Xiaoqing, et al. Design of a low voltage high efficiency W-band pulsed Traveling Wave Tube[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2019, 17(4): 726-729. doi:10.11805/TKYDA201904.0726.)
- [5] 陈辑, 高畅, 蔡军. 筒型重入式折叠波导结构 W 波段行波管研究[J]. 真空电子技术, 2022(3): 47-51. (CHEN Ji, GAO Chang, CAI Jun. Study on a W-band TWT with cylindrical reentrant folded waveguide structure[J]. Vacuum Electronics, 2022(3): 47-51. doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2022.03.09.)