

文章编号: 2095-4980(2023)10-1211-06

W 波段行波管切断位置性能分析与实验

张小青, 蔡 军, 高 畅, 穆涵硕, 杜英华, 冯进军

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

摘 要: 为分析折叠波导行波管相互作用电路切断位置的功率和频谱特性, 提出并研制出一只四端口 W 波段脉冲行波管。对该行波管频带内相互作用电路的 S 参数、切断处功率和对应频谱特性进行测试, 分析表明: 端口 2(输入段的切断)的功率幅值主要取决于饱和状态下行波管的输入功率, 与输入段增益不成正比关系分布; 端口 3(输出段切断)功率主要取决于端口匹配性能, 其数值计算功率和测试数据吻合良好。本文研究为毫米波及太赫兹行波管切断设计提供了一种有效方法。

关键词: 行波管; 切断位置; 折叠波导; W 波段

中图分类号: TN752

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023207

Analysis and experimental study on performance of the W-band TWTs' sever region

ZHANG Xiaoqing, CAI Jun, GAO Chang, MU Hanshuo, DU Yinghua, FENG Jingjun

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

Abstract: To analyze the power and spectrum performance of the Folded Waveguide(FWG) Traveling Wave Tube(TWT) sever region, a W-band TWT with four-port structure is proposed and developed. The S-parameter of interaction circuit, power and spectrum characteristic at the sever region are obtained and analyzed. The analysis shows that the power amplitude of port 2(sever of the input segment) mainly depends on the input power of the TWT at the saturated state, which is not proportional to the gain of the input segment. The power of port 3(sever of output segment) mainly depends on the matching performance of the ports, and the calculated power is in an excellent agreement with the measured data. The study in this paper provide a practical method for designing sever region of the millimeter wave and terahertz TWTs.

Keywords: Traveling Wave Tube; sever region; Folded Waveguide; W-band

W 波段行波管作为系统核心部件之一, 为发射机提供放大信号, 在高分辨雷达成像、电子对抗等军事领域和高速通信、气象雷达等民用领域有着广泛的应用前景^[1-4]。近年来, W 波段行波管在大功率、高效率、宽频带、低电压小型化、微波功率模块(Microwave Power Module, MPM)等方向取得了诸多成果, 其中: a) 在大功率、高效率方向, 中国电子科技集团公司第十二研究所(中国电科 12 所)研制出输出功率达 647 W 的大功率 W 波段行波管^[5]和总效率大于 40% 的高效率 W 波段行波管^[6]; b) 在低电压小型化研究方向, 中国电科 12 所研制的小型化 W 波段行波管实现了 6 GHz 频带内输出功率大于 180 W, 整管尺寸 $\leq 270 \text{ mm} \times 49 \text{ mm} \times 46 \text{ mm}$, 质量 1.5 kg^[7]; c) 在宽频带方向, 美国海军实验室研制的 W 波段行波管工作带宽 10 GHz, 输出功率 $>100 \text{ W}$, 其中 93 GHz 频点输出功率最高为 215 W, 增益为 20 dB^[8]; d) 在 MPM 研究方向, L3 公司研制的百瓦级 W 波段脉冲 MPM, 工作带宽 4 GHz, 最大输出功率为 176 W^[9]; 中国电科 12 所研制的 W 波段连续波功率模块, 工作带宽 6 GHz, 功率 $\geq 50 \text{ W}$, 效率 $\geq 20\%$, 模块的外形尺寸为 380 mm \times 180 mm \times 50 mm, 质量为 5.5 kg^[10]。

W 波段行波管在折叠波导相互作用电路中设置切断和集中衰减器, 以中断反射或外部反馈路径, 消除自激振荡, 实现器件的高增益工作。集中衰减器作用是吸收掉相互作用电路在切断位置的功率, 内置在切断位置的波导槽内。当行波管高占空比工作时, 如果不能及时将衰减器吸附的热量导出, 衰减器会因高温出现性能下降或释

收稿日期: 2023-07-28; 修回日期: 2023-08-26

放气体等现象,影响行波管性能和可靠性,甚至导致器件无法正常工作。常规行波管切断端口与集中衰减器内置在折叠波导行波管电路中,无法直接测量。因此,本文提出并研制出一只四端口高频结构的W波段行波管,测试了该行波管频带内相互作用电路的 S 参数、切断处功率和对应频谱特性,并进行详细分析,为毫米波及太赫兹行波管切断功率计算提供数据支撑和分析方法。

1 基于四端口结构的W波段行波管设计

1.1 四端口高频结构

与常规W波段行波管不同,四端口高频结构行波管的切断连接过渡波导和输能窗,在切断位置形成2个输出端口,分别记作端口2和端口3,如图1所示。端口2可监测折叠波导相互作用电路的输入段放大信号;端口3可监测相互作用电路输出段的反射功率。行波管输入端(记作端口1)和输出端(记作端口4)分别传输行波管的输入和输出信号。四端口高频结构不仅可以原位获得折叠波导行波管切断位置的冷热测参数,监测切断位置的功率和频谱特性,还可以对相互作用电路的输入段和输出段开展近似独立分析。

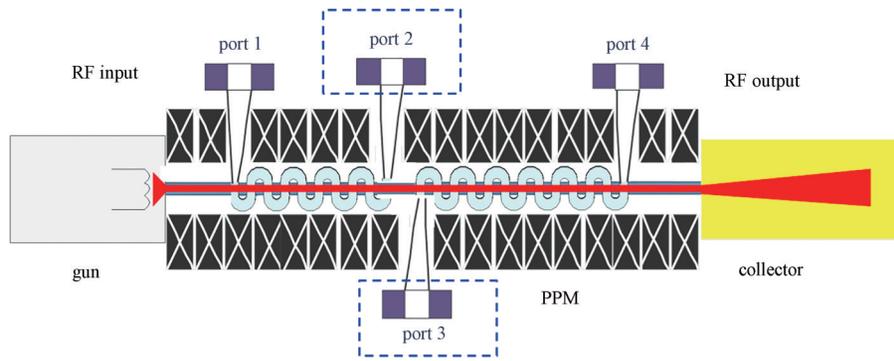


Fig.1 Three-dimensional diagram of the TWT with four-port structure

图1 四端口结构的行波管三维图

1.2 相互作用电路设计

在W波段及太赫兹频段,较低的耦合阻抗(K_c)是限制折叠波导行波管功率和相互作用效率的瓶颈之一。为提升慢波电路的耦合阻抗,本文主要采用以下2种技术手段:一是工作点优化,通过优化折叠波导的宽边尺寸,综合考虑功率以及工作带宽等设计目标,选择合适的工作点,在满足技术指标要求的工作带宽前提下,尽可能地提升频带相互作用耦合阻抗;二是采用弧形弯曲边界折叠波导慢波结构。相比于常规慢波结构,弧形弯曲边界折叠波导的耦合阻抗在W波段频段内, K_c 可提升30%,且没有引入额外的复杂性工艺^[11],结构示意图和尺寸参数如图2所示。

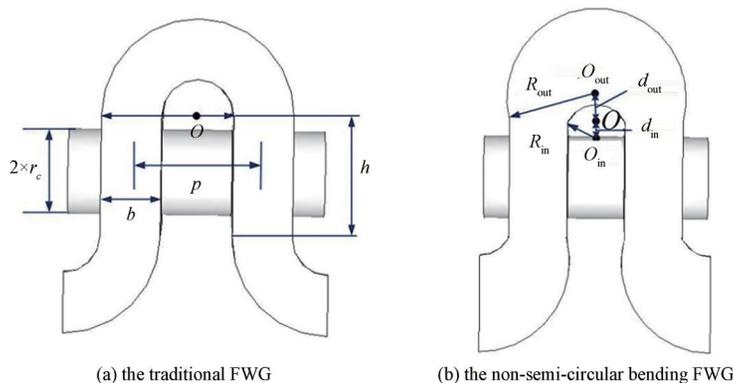


Fig.2 The diagram of FWG structure

图2 折叠波导结构示意图

为了提升W波段行波管电子效率,相互作用电路采用相速跳变技术,使相互作用后平均速度下降的电子与行波的速度再同步,延长电子注与电磁波相互作用时间,实现能量交换、效率提升。本文基于常规折叠波导慢波结构的特点和加工工艺,通过改变参数 p 进行相速调控,实现慢波电路与电子注的相速再同步。相速跳变选用2次下

跳变方式，相速归一化如图 3 所示。相互作用电路包括均匀电路部分(周期参数为 p_1)，相互作用电路长度为 l_1 ；一次负向跳变电路部分(周期参数为 p_2)，相互作用电路长度为 (l_2-l_1) ；二次负向跳变电路部分(周期参数为 p_3)，相互作用电路长度为 (l_3-l_2) 。采用 CST 软件建立折叠波导模型，六面体网络的每波长网格数、最小网格限制、网格线比率限制设置为 $35 \times 35 \times 35$ 。在 91~97 GHz 频段内的相光速比(v_p/c)曲线和 K_c 曲线如图 4 所示。

利用微波管模拟套装(Microwave Tube Simulator Suite, MTSS)软件优化相互作用电路中相速跳变各部分的相互作用长度、切断位置、增益等参数，使输出功率和带宽满足设计要求。W 波段折叠波导相互作用电路设计结果如图 5 所示，行波管的工作电压为 17.2 kV，工作电流 140 mA，在 91~97 GHz 频段内饱和输出功率大于 230 W，最高输出功率达到 355 W。

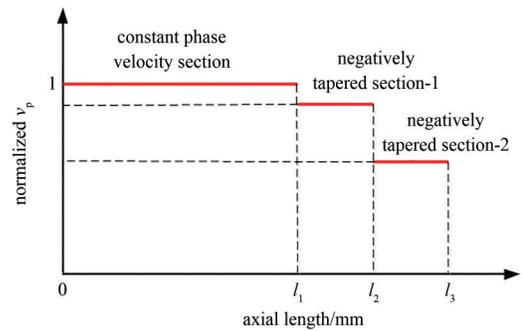


Fig.3 Phase velocity stepping technique of the FWG interaction circuit
图 3 折叠波导相互作用电路相速跳变

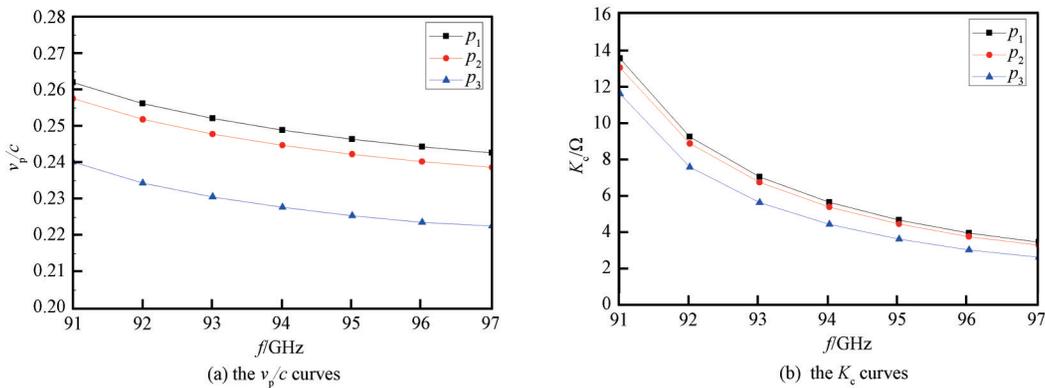


Fig.4 Cold characteristics of the FWG for the three sections with p_1, p_2 and p_3
图 4 不同周期的折叠波导冷特性曲线

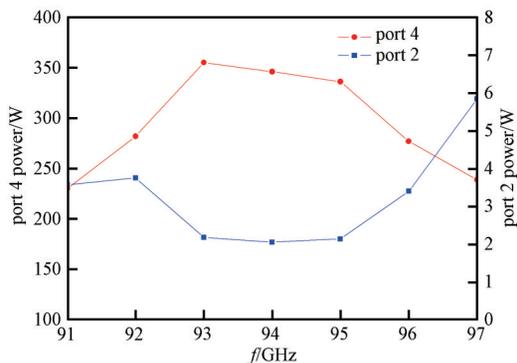


Fig.5 Simulation power curves of port2 and port4
图 5 端口 2 和端口 4 的功率计算曲线

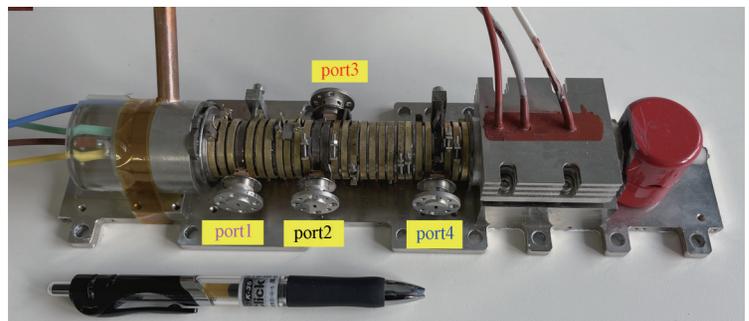


Fig.6 The W-band TWT with four-port structure
图 6 四端口结构的 W 波段行波管

2 W 波段行波管测试与分析

2.1 四端口行波管测试

四端口结构 W 波段行波管如图 6 所示，其中输能窗片采用性能优良的金刚石材料，该材料具有足够的机械强度、高气密性、功率承受能力，在 W 波段频段内输能系统的电压驻波比 ≤ 1.3 ；聚焦系统采用体积小、质量轻的周期永磁聚焦系统；收集极采用三级降压结构。

行波管的工作电压 17.3 kV，工作电流 145 mA，实测样管通过率大于 97%，验证了四端口 W 波段行波管电子光学系统的可行性。在工作比 5% 条件下，测试了四端口结构 W 波段行波管电性能，测试框图和测试系统照片如图 7 所示。行波管测试系统如下：端口 1 连接 W 波段信号源，功率计探头 A 和定向耦合器 A 监测经输入窗进入相互作用电路的电磁波信号；端口 2 连接定向耦合器 B，功率计探头 B 监测切断位置输入段放大功率；端口 3 连接定

向耦合器 C, 功率计探头 C 监测输出段的切断功率; 端口 4 连接定向耦合器 D, 功率计探头 D 监测输出段放大后的信号功率。

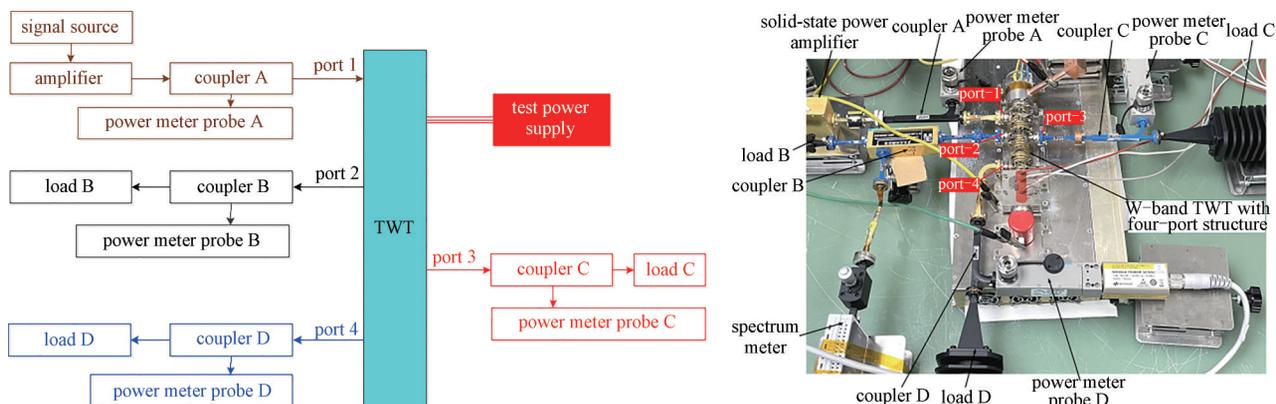


Fig.7 The test system of TWT with four-port structure

图 7 四端口高频结构 W 波段行波管测试系统

2.2 互作用电路输入段测试数据分析

W 波段行波管饱和状态下端口 2(输入段的切断)功率和输入段增益的测试曲线如图 8 所示, 在 91~97 GHz 频带内, 端口 2 的功率幅值范围为 1~7.4 W, 呈中间低两端高分布。频带内端口 2 功率幅值与输入段增益不成正比关系分布, 甚至总体呈反比关系, 因此, 该样管输入端增益不是决定端口 2 功率的主要原因。图 9 为饱和状态下行波管输入功率与端口 2 的输出功率测试曲线, 二者功率分布趋势基本一致。当行波管增益波动较大时, 端口 2 的功率幅值主要取决于饱和状态下 W 波段行波管输入功率大小。因此, 为减少衰减器在切断位置的吸附功率, 在降低输入段增益的同时, 还需重点实现行波管高增益和饱和增益平坦度总体设计。

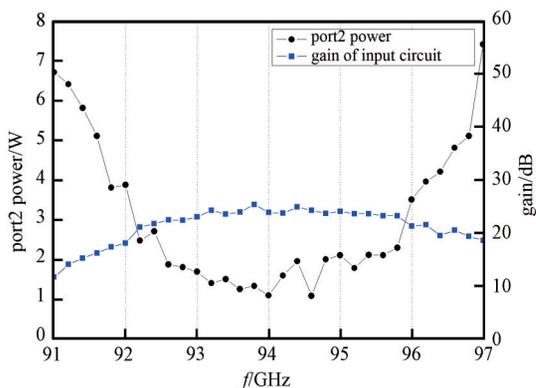


Fig.8 Test power and gain curves of input circuit

图 8 输入段功率和增益测试曲线

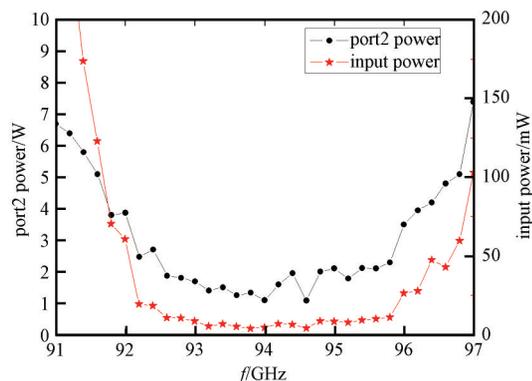


Fig.9 Saturated test power curves of input interaction circuit

图 9 行波管饱和状态下的输入段功率测试曲线

为分析行波管端口功率随输入功率的变化关系, 测试了中心频点的输入-输出功率曲线, 如图 10 所示。端口 2 功率在输入功率 0~7 mW 内随输入功率呈线性增长。因此, 行波管端口 2 的功率等于输入段增益乘以行波管输入功率。端口 4 和端口 3 功率先是随着输入功率线性增长, 之后进入非线性区增长, 直至饱和状态功率达到最高值, 最后进入过饱和区。过饱和后电子将进入加速区, 不仅不再交出能量, 反而要从电磁波中提取能量, 导致行波管输出功率减小。

2.3 互作用电路输出段测试数据分析

行波管端口 3(输入段的切断)和端口 4 功率测试曲线如图 11 所示, 端口 4 在 91.2~96.4 GHz 频带内输出功率大于 230 W, 最高输出功率达到 354 W, 与仿真结果吻合良好,

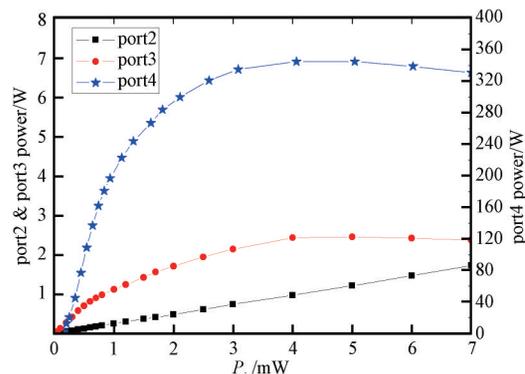


Fig.10 Power transfer curves with drive at center frequency

图 10 中心频率的输入-输出功率曲线

验证了设计参数的正确性。端口 3 的功率幅值在 0.3~3.95 W 之间，呈锯齿状分布，且不与端口 4 功率分布相对应。因此，该行波管输出功率不是决定相互作用电路输出段切断功率的主要因素。通过分析端口 3 和端口 4 的匹配性能，发现端口 3 的功率峰值与端口 4 的 S_{11} 参数值相对应。因此，该行波管输出段切断功率主要取决于端口匹配性能。

常规折叠波导行波管无法测量切断功率，因此，需要一种计算输出段切断功率的分析方法，并验证其符合性。行波管输出功率、端口匹配或外接负载匹配可以采用功率计和矢量网络分析仪直接测量，线路损耗可利用计算软件初步获取。端口 3 和端口 4 的 S_{11} 参数测试曲线如图 12 所示。假设行波管工作状态下和非工作状态下电路损耗不变或改变较小，根据行波管的输出功率、 S_{11} 参数和电路损耗即可计算出端口 3 功率。以切断功率最高的频点 94.4 GHz 为例，行波管输出功率 315 W，端口 4 的 S_{11} 参数测试为 -11.5 dB，约有 1/14 的功率被返回，计算返回到电路中的功率为 $P'_4 = 315 \div (1 - 1/14) \div 14 \approx 24.2$ W。行波管输出段的线路损耗为 7.5 dB，计算端口 3 的功率为 $P'_3 = 24.2 \div 5.62 = 4.3$ W。因此，返回切断位置的功率计算值为 4.3 W。端口 3 在此频点的 S_{11} 参数为 -13.4 dB，约有 1/22 的功率被反射到慢波电路，最终端口 3 的输出功率为 $P_3 = 4.3 \times (1 - 1/22) \approx 4.1$ W，与实测功率 3.95 W 相近，如图 13 所示。利用该方法计算出频带内整数频点的功率幅值，与测试数据符合较好，验证了计算方法的可行性，为常规折叠波导行波管切断功率幅值分析提供了数据支撑和计算方法。

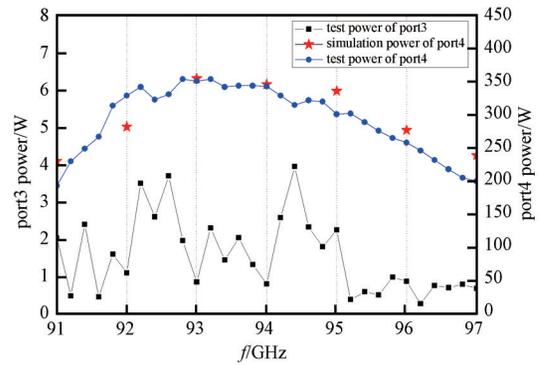


Fig.11 Saturated test power curves of port3 and port4
图 11 端口 3 和端口 4 的饱和功率测试曲线

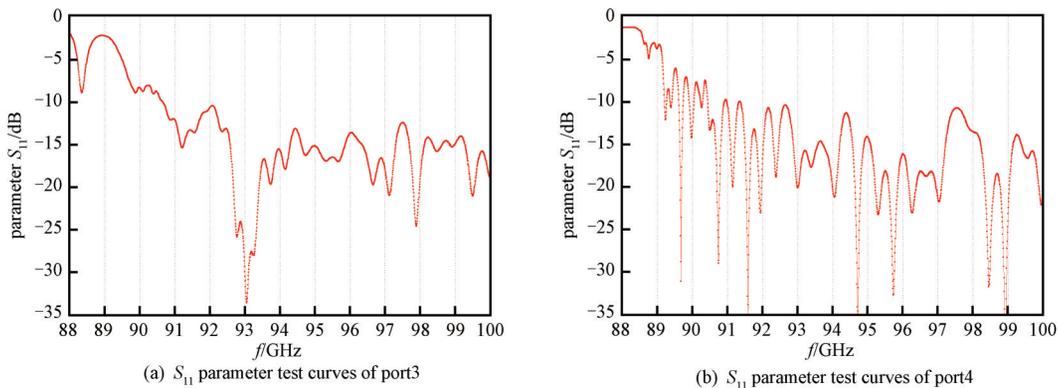


Fig.12 S_{11} parameter test curves of port3 and port4
图 12 端口 3 和端口 4 的 S_{11} 参数测试曲线

采用频谱分析仪分别测试了 W 波段行波管端口 2、端口 3 和端口 4 电磁波的频谱特性，各端口频谱与输入信号相同。行波管电磁波与电子注相互作用过程中，以及被反射的电磁波沿慢波电路返回到切断位置的过程中没有杂波产生，验证了行波管工作的稳定性。

3 结论

为分析折叠波导行波管切断位置性能及频谱特性，提出并研制出一只四端口结构 W 波段行波管，获取了频带内 4 个端口的 S 参数、测试功率和频谱数据。基于测试数据和仿真结果，分别对相互作用电路的输入段和输出段开展了独立分析，分析结果表明，饱和状态下输入段的切断功率主要取决于行波管的输入功率；输出段切断功率主要取决于端口匹配。验证了输出段切断功率计算方法的可行性，为常规短毫米波及太赫兹行波管切断功率计算提供了数据支撑和分析方法。

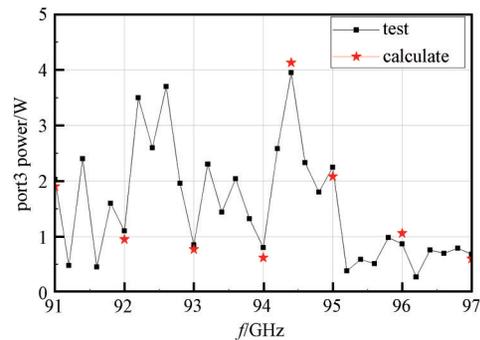


Fig.13 Curves of the estimated power and the measured power of port3
图 13 端口 3 的功率测试曲线和计算功率

参考文献:

- [1] 冯进军,胡银富,蔡军,等. W波段行波管发展评述[J]. 真空电子技术, 2010(2):27-32. (FENG Jinjun,HU YinFu,CAI Jun,et al. The development appraisal of W-band TWT[J]. Vacuum Electronics, 2010(2): 27-32.) doi:10.3969/j. issn. 1002-8935.2010.02.005.
- [2] 蔡军,冯进军. 太赫兹行波管及其通信应用进展[J]. 真空电子技术, 2021(3):10-18,40. (CAI Jun,FENG Jinjun. THz TWT and its application progress in communication[J]. Vacuum Electronics, 2021(3):10-18,40.) doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.03.02.
- [3] 冯进军,张小青,蔡军,等. 毫米波及太赫兹行波管的功率提高方法评述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(4):507-516. (FENG Jinjun,ZHANG Xiaoqing,CAI Jun,et al. Review of power enhancement methods for millimeter wave and terahertz TWTs[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21(4): 507-516.) doi:10.11805/TKYDA 2022233.
- [4] YAO Shisen,CHENG Yujian,BAI Hang,et al. W-band high-efficiency waveguide slot array antenna with low sidelobe levels based on silicon micromachining technology[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(4): 665-673. doi:10.1049/cje. 2020.00.315.
- [5] ZHANG Xiaoqing, FENG Jinjun, CAI Jun, et al. Power enhancement in W-band pulsed folded waveguide TWT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021,68(5):2504-2508. doi:10.1109/TED.2021.3068692.
- [6] ZHANG Xiaoqing, FENG Jinjun, CAI Jun, et al. High-efficiency W-band pulsed TWT with three-stage depressed collector[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022,32(2):121-124. doi:10.1109/LMWC.2021.3122124.
- [7] DU Yinghua,CAI Jun,ZHANG Xiaoqing,et al. A substantially lowered-voltage high-power W-band pulsed traveling wave tube[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021,31(6):590-592. doi:10.1109/LMWC.2021.3070637.
- [8] 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.
- [9] KOWALCZYK R,ZUBYK A,MEADOWS C,et al. A 100 W W-band MPM TWT[C]// 2013 IEEE The 14th International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Paris,France:IEEE, 2013:1-2. doi:10.1109/IVEC.2013.6571123.
- [10] CHEN Ji,WANG Zhigang,WANG Fengyan,et al. Demonstration of a broadband W-band microwave power module with improved gain flatness[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022,43(8):1335-1338. doi:10.1109/LED.2022.3185157.
- [11] 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.

作者简介:

张小青(1982-),男,博士,高级工程师,主要研究方向为短毫米波及太赫兹行波管. email: zhangxiaoping bveri@163.com.

蔡军(1978-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.

高畅(1995-),女,学士,工程师,主要研究方向为短毫米波及太赫兹行波管工艺.

穆涵硕(1995-),男,学士,工程师,主要研究方向为短毫米波及太赫兹行波管测试.

杜英华(1978-),女,博士,研究员,主要研究方向为短毫米波及太赫兹行波管.

冯进军(1966-),男,博士,研究员,中国电科首席科学家,主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.