

文章编号: 2095-4980(2016)02-0171-05

D 波段 7 W 连续波折叠波导行波管的研制

雷文强, 蒋 艺, 周泉丰, 胡 鹏, 阎 磊, 胡林林, 马国武, 陈洪斌

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要:介绍了一种 D 波段连续波行波管放大器。该行波管采用了高压压缩比皮尔斯会聚电子枪、折叠波导慢波结构(FWSWS)、蓝宝石输能盒形窗、周期永磁聚焦系统、集中衰减器以及一级降压收集极, 经过装配、焊接、排气、磁场调试等过程, 得到了 D 波段连续波放大器样管, 并进行了流通率的调试和信号放大的测试。实验测试结果为: 电子电压 15.4 kV, 电子流通率 97%时, 连续波输出功率 7.3 W, 中心频率 140.2 GHz, 增益 24.6 dB, 3 dB 带宽 3 GHz。该放大器连续运行稳定, 满足工程化要求。

关键词: D 波段; 连续波行波管; 折叠波导慢波结构; 蓝宝石输能盒形窗; 集中衰减器

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0171

Research for D band 7 W Continuous-Wave Folded Waveguide Traveling Wave Tube

LEI Wenqiang, JIANG Yi, ZHOU Quanfeng, HU peng, YAN Lei, HU Linlin, MA Guowu, CHEN Hongbin

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China)

Abstract: A D band Continuous-Wave(CW) Folded Waveguide Traveling Wave Tube(FWTWT) is introduced. The high compress ratio Pierce electronic gun, Folded Waveguide Slow Wave Structure(FWSWS), sapphire transmission energy window, Periods Permanent Magnetic(PPM) focus system, concentrated attenuator, single-stage depressed collector are adopted in the FWTWT. After the processes of the assemblage, welding, exhaust and magnet installation, a D band CW FWTWT is obtained. In the experiment of electron transmission ratio and signal amplification, under the electron voltage of 15.4 kV and electron transmission ration of 97%, the maximum saturated CW output power, the output central frequency, the maximum gain and 3 dB bandwidth are 7.3 W, 140.2 GHz, 24.6 dB and 3 GHz, respectively. The tube works stably and satisfies the engineering requirement in D band.

Key words: D band; Continuous-Wave Traveling Wave Tube; Folded Waveguide Slow Wave Structure; sapphire transmission energy window; concentrated attenuator

微波电真空器件的频率正在向短毫米波、亚毫米波甚至太赫兹频段扩展。随着微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)技术、阴极技术等水平的提高, 实现高于 100 GHz 的微电真空器件研制已成为可能。美国已启动了多个关于太赫兹真空器件和系统的研究计划, 如 HiFIVE, SWIFT 等; 欧洲也启动了以放大器为主的 OPTHER 计划^[1]。美国 NG 公司研制了在 220 GHz 的行波管获得了 30 W 的脉冲功率输出^[2]。国内中国电子科技集团第 12 研究所在 2006 年就开始了 W 波段折叠波导行波管的研究, 目前已获得最大 200 W 的脉冲功率输出, 150 W 输出时的带宽 4.5 GHz^[3]。其连续波输出可到 10 W, 带宽 5 GHz^[4]。国内 140 GHz 行波管的研究还处于起步阶段。中国工程物理研究院电子工程研究所和应用电子学研究所是国内较早进行 140 GHz 折叠波导行波管研究的单位^[5-6], 并已取得了一些成果。

宽带大功率 140 GHz 行波管放大器, 为高速无线数据通信系统产生宽带的载波信号, 为太赫兹高速数据通信系统的后续发展提供了必要的硬件支持。另外, 140 GHz 行波管处于高分辨力雷达系统中信号放大链的第二级, 负责为末级放大器 140 GHz 回旋行波管提供前级激励信号, 为太赫兹高分辨力雷达系统的后续研制提供了必要

收稿日期: 2014-12-07; 修回日期: 2015-03-07

基金项目: 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心基金资助项目

的支持。因此,该频段在实际应用中具有重要的价值,已受到国内外的高度关注。国内的 D 波段行波管器件正经历了从无到有,逐步发展成熟,并走向工程应用的阶段。

1 主要技术指标和技术方案

1.1 折叠波导慢波结构

该 D 波段连续波行波管采用 FWSWS。折叠波导由于其具有全金属结构、散热能力强、色散较平坦、高频损耗小、功率容量大、加工比较容易、输入\输出耦合结构相对简单等特点,比较适用于微电真空器件中的慢波结构。随着多年来对 FWSWS 的深入研究,已形成了一套色散特性、耦合阻抗、高频相互作用等的设计与仿真方法^[7-8]。

FWSWS 由于加工精密,结构微细,其外形细长,慢波结构中的电子通道非常细,直径不到 0.3 mm,而折叠波导结构长度与电子通道之比大于 400,如图 1 所示。这导致在加工处理、清洗处理和焊接装配过程中非常容易变形,因此完善的工装保障和工艺流程对于后面器件的调试和性能指标实现具有重要的意义。

在 FWSWS 的设计中,还考虑了输入输出端口渐变时的电压驻波比,从仿真设计中保证在很宽的频带范围内实现良好的匹配,这可以避免反射引起的自激振荡,实现整管性能的稳定工作。其慢波结构与窗匹配的仿真模型如图 2 所示。



Fig.1 Photo of beam tunnel and folded waveguide slow wave
图 1 折叠波导慢波与电子通道的照片

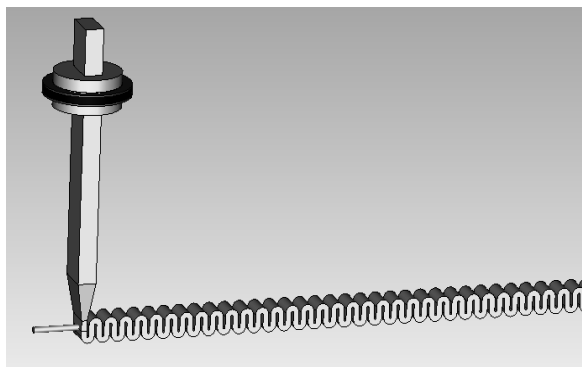


Fig.2 Model of window matching with slow wave structure
图 2 慢波结构与窗匹配的仿真模型

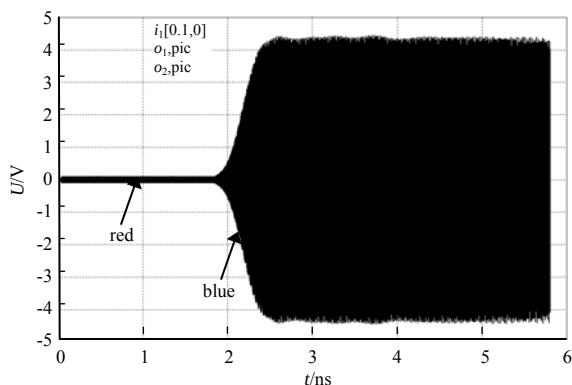


Fig.3 Input and output voltage comparison
图 3 仿真的输入输出电压对比图

通过对折叠波导色散特性和耦合阻抗的分析,选择合适的结构参数,在输出功率和带宽指标的要求下,确定工作电压 14.4 kV,电流 18 mA。最后将慢波结构与输入输出窗模型代入粒子模拟软件进行计算,其中慢波结构的电导率根据计算公式^[9]设置为 2.2×10^7 S/m,计算得到最大输出功率 8.8 W,中心频率 140 GHz,3 dB 带宽 3 GHz,最大增益 32.5 dB。其输入输出信号电压的对比结果如图 3 所示。在图 3 中,红色曲线图形为输入信号,蓝色曲线图形为输出信号,此时可以观察到信号放大随时间变化的过程。其中,输出电压 4.2 V,可换算得到功率 8.8 W,输入为 5 mW,可计算得到增益 32.5 dB。

为抑制行波管产生的自激振荡,在高频慢波电路中加入集中衰减器。在国内首次建立了针对 D 波段集中衰减器的测试系统,对集中衰减器的匹配和插损性能进行测试和挑选。集中衰减器选择了一种掺碳陶瓷材料,精密加工后形成一种楔形结构,为满足行波管的性能要求,制作了一套工装夹具测试系统,选择符合要求的集中衰减器装入慢波电路中,其插入损耗大于 25 dB,反射驻波小于 1.3。

1.2 电子光学系统

电子光学系统是实现 D 波段行波管的一个主要技术难点。该行波管的电子通道非常细,直径不到 0.3 mm,而为了保证行波管产生足够的增益,高频结构还需具有一定的长度,并且电子携带足够大的电流,整个高频电子注通道与长度的比值大于 400 以上。通过高压缩比长射程的皮尔斯(Pierce)会聚电子枪和低脉动周期永磁聚焦系统的设计,保证了电子具有很高的流通率。其电子光学系统的软件仿真结果如图 4 所示。

其中,磁块采用钐钴磁块 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$,周期磁场的系统峰值达到 0.37 T。仿真得到电子电压 14.4 kV 条件下,

总发射电流 18 mA, 流通率 100%。电子全部通过折叠波导内的通道。

最后制成样管后, 通过周期磁场聚焦和补偿磁块的优化, 该行波管的静态电子流通率达到 97.5%, 工作状态下的动态电子流通率达到 97%。

1.3 输能系统

输能系统是能够把信号进行输入和输出的装置, 其设计的好坏关系到信号的放大和计算增益的大小。

输能系统通常采用标准的 D 波段盒形窗结构, 可以实现与折叠波导结构的良好匹配^[10]。密封真空的介质窗片采用蓝宝石材料。蓝宝石材料由于具有较小的损耗角正切、较高的导热性以及良好的机械性能, 是目前高频段真空器件中广泛采用的窗片材料。由于该波段频率高, 其窗片的厚度小于 0.3 mm。

经过对金属化层的精确涂覆和精密焊接工艺的控制研究, 包括对金属化层和焊料层的仿真设计等, 得到了适合 D 波段 10 GHz 频率范围内的优化, 驻波系数低于 1.2。其仿真模型如图 5 所示。其软件的仿真结果如图 6 所示。由于现有的测试设备只能测量窗的传输插损, 再通过插损换算到窗的驻波, 基本符合设计要求。

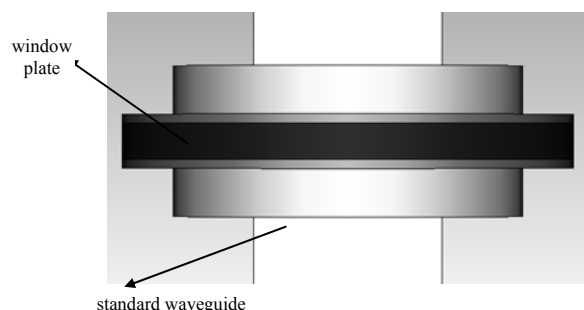


Fig.5 Simulation structure of waveguide pillbox window

图 5 波导盒型窗的模拟结构

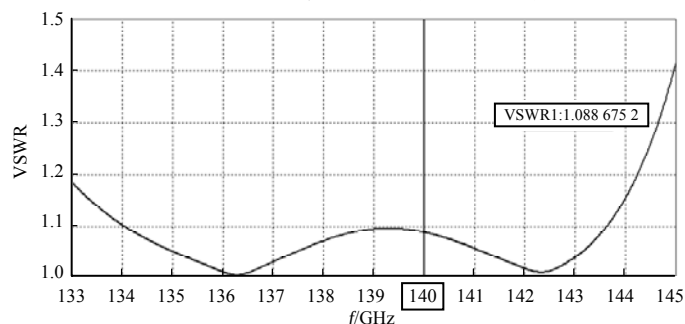


Fig.6 Simulation result of VSWR in waveguide pillbox window

图 6 波导盒型窗驻波比仿真结果

1.4 收集极系统

收集极采用标准的设计方法, 使用单极降压结构, 实现了良好的高压绝缘和散热。其电子在收集极上的运动轨迹仿真结果如图 7 所示。整个试验中, 采用上下两层水冷板的方式, 实现了对 338 W 负载的冷却, 达到了行波管连续波输出的稳定工作性能要求。行波管样管的照片如图 8 所示。目前实验中用的收集极是另一产品中已设计好的, 因此需要对陶瓷绝缘进行设计才能达到较高的降压值。

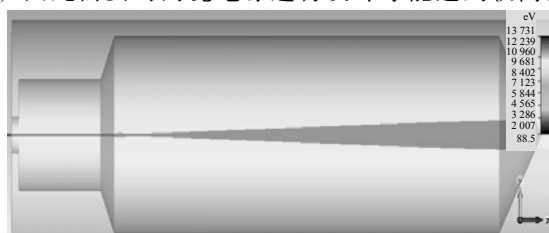


Fig.7 Electronic movement trajectory in collector

图 7 收集极内电子运动轨迹



Fig.8 Prototype of D band CW traveling wave tubes

图 8 D 波段连续波行波管样管照片

2 性能测试

该 D 波段连续波行波管样管经过了装配、焊接、排气、磁场调试等过程, 最后进行了电子流通率的测试和信号放大的测试。测试条件如表 1 所示。

表 1 行波管测试条件参数

Table1 Parameters of traveling wave tubes in measurement condition

parameters	electron beam voltage/kV	electron beam current/mA	filament current/A	filament voltage/V	duty/%	transmission ratio/%
values	15.40	22	0.74	5.42	100	97

在连续波行波管通电测试时, 采用了在行波管安装底板上下处水冷的方式, 在管壳处采用风冷的方式, 这样可以达到工作比 100%, 即连续波稳定运行。其连续运行时的示波器图片如图 9 所示。在测试信号放大时, 采用

了 110 GHz~170 GHz 的返波管作为信号源进行输入,得到了连续波输出功率 7.3 W, 中心频率 140.2 GHz, 最大增益 24.6 dB, 3 dB 带宽 3 GHz 的实验测试结果。其增益、功率与频率的测试曲线如图 10 所示。

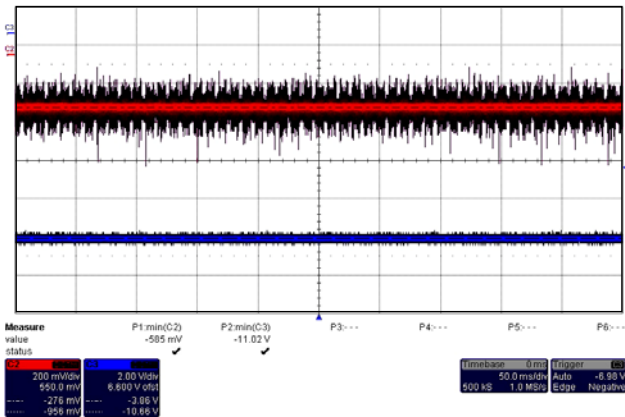


Fig.9 Current waveform of traveling wave tubes in continuous operation
图 9 行波管连续运行时的电流波形

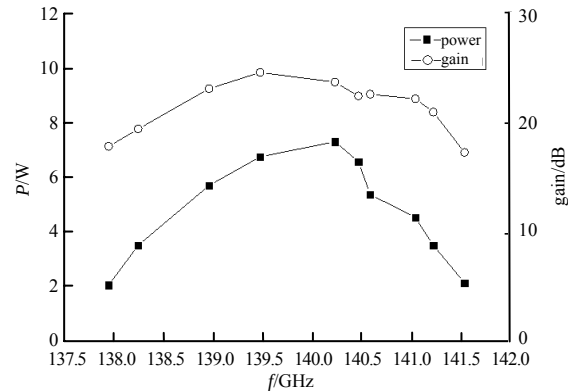


Fig.10 Power, gain and frequency curve
图 10 测试的功率、增益与频率曲线

3 结论

通过本管的研制,逐步掌握了 D 波段连续波行波管的关键技术,包括高压压缩比的电子枪、细长尺寸的折叠波导慢波结构、高峰值磁场的周期永磁聚焦系统、蓝宝石输能窗结构以及大热容量的散热技术等。

样管经过设计、模拟、工艺和测试等一系列优化工作,最后经过测试,得到了连续波输出功率 7.3 W, 中心频率 140.2 GHz, 最大增益 24.6 dB, 3 dB 带宽 3 GHz 的实验测试结果。在 138.2 GHz~141.2 GHz 频带内,得到了大于 3.6 W 的连续波输出。下一步,该样管将经过高低温和振动等环境试验,满足工程应用的需求。

参考文献:

- [1] 冯进军. 集成真空电子学[J]. 真空电子技术, 2010(2):1-7. (FENG Jinjun. Integrated vacuum electronics[J]. Vacuum Electronics, 2010(2):1-7.)
- [2] TUCEK J,BASTEN M,GALLAGHER D,et al. 220 GHz folded waveguide circuits for high power amplifiers[C]// Proceedings of 2009 International Conference on Vacuum Electronics. Rome,Italy:IEEE, 2009:108-109.
- [3] CAI Jun,FENG Jinjun,HU Yinfu,et al. Development of W-band folder waveguide pulsed TWT[C]// Proceedings of 2013 International Conference on Vacuum Electronics. Paris,France:IEEE, 2013:1-2.
- [4] 胡银富,冯进军,蔡军,等. W 波段连续波行波管放大器[C]// 中国电子学会真空电子学分会第 19 届学术年会. 安徽,中国:[s.n.], 2013:51-52. (HU Yinfu,FENG Jinjun,CAI Jun,et al. W-band CW traveling wave tubes amplifier[C]// The 19th Conference of the Chinese Society of Vacuum Electronics. Anhui,China:[s.n.], 2013:51-52.)
- [5] 陈樟,王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构设计及加工[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(3):299-302. (CHEN Zhang,WANG Yajun. Design and manufacture of 0.14 THz folded waveguide traveling wave tube slow wave structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):299-302.)
- [6] 胡林林,陈洪斌,徐翱,等. 0.14 THz 大功率回旋行波管前级激励源粒子模拟研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(3):308-312. (HU Linlin,CHEN Hongbin,XU Ao,et al. Particle simulation of pre-driving source for 0.14 THz high-power gyrotron TWT[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(3):308-312.)
- [7] HAN Seong-Tae,JANG Kyu-Ha,SO Jin-Kyu,et al. Low-voltage operation of Ka-band folded waveguide traveling-wave tube[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(1):60-66.
- [8] 雷文强,蒋艺,胡林林,等. 0.14 THz 折叠波导行波管的设计与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):334-338. (LEI Wenqiang,JIANG Yi,HU Linlin,et al. Design and experiment for 0.14 THz Folded Waveguide Traveling Wave Tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):334-338.)
- [9] 徐翱,胡林林,陈洪斌,等. 太赫兹折叠波导慢波结构 S 参数特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(4):968-972. (XU Ao,HU Linlin,CHEN Hongbin,et al. S-parameter characteristics in THz folded waveguide slow wave structures[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(4):968-972.)

(下转第 185 页)