

文章编号: 2095-4980(2013)06-0853-04

工艺参数影响的 D 波段行波管盒型窗分析

雷文强, 蒋 艺, 胡林林, 阎 磊, 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: 由于尺寸较小, D 波段行波管盒型窗对各个参数的影响较为敏感, 因此使用 CST 软件对蓝宝石窗片的盒形窗进行优化设计。从各个工艺参数出发, 对窗片金属化层的内径和厚度, 以及焊料层的厚度和圆波导高度等的影响进行了软件仿真分析, 得到了优化后最佳值为 10 GHz 的带宽, 即在 133 GHz~144 GHz 范围内, 驻波比低于 1.2。最后加入整个慢波结构和衰减瓷的模型中进行计算, 得到了驻波比低于 1.4 的结果, 满足整管指标要求。

关键词: D 波段行波管盒型窗; 窗片金属化层; 10 GHz 带宽; 电压驻波比; 慢波结构

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0853

Analysis of pill-box window for D band TWT considering process parameters influence

LEI Wen-qiang, JIANG Yi, HU Lin-lin, YAN Lei, MA Guo-wu, CHEN Hong-bin

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

Abstract: The dimension of the pill-box window for D band Traveling Wave Tubes(TWT) is so small that its influence on every process parameter is very sensitive. The sapphire pill-box window is analyzed and simulated by using CST software according to its process parameters, including inner radius, thickness of the metallization layer in the sapphire window, thickness of the solder layer and the height of the cylinder waveguide. The optimized value of bandwidth is about 10 GHz. The Voltage Standing Wave Ratio(VSWR) is below 1.2 from 133 GHz to 144 GHz. The simulation model of the pill-box window structure added in the folded waveguide slow wave structure is calculated. The obtained VSWR result is below 1.4, which meets the design requirements of D band traveling wave tube.

Key words: pill-box window for D band Traveling Wave Tubes; metallization layer in the sapphire window; 10 GHz bandwidth; Voltage Standing Wave Ratio; slow wave structure

输入输出盒形窗是行波管中应用最为广泛的微波输能结构。它不仅能密封真空, 而且还有频带较宽的优点, 因此在 D 波段折叠波导行波管的研制中是一个相当重要的环节。目前, 中电集团 12 所在 W 波段的盒形窗研究已有报导并制管成功^[1-2]。对于此波段的行波管输出窗而言: 一方面由于频率的增大, 介质窗片变得非常薄(通常都低于 0.5 mm), 给设计和加工带来了很大的困难; 另一方面在高频率下, 要求较宽的带宽也是人们一直努力要解决的问题。中物院电子工程研究所的王亚军等人也报导了 140 GHz 行波管盒形窗的研究进展^[3-4], 为研究提供了指导作用。本文在 D 波段折叠波导行波管的盒形窗模拟过程中, 考虑了工艺参数的影响, 直接使用 CST 软件建立模型, 分别对窗片金属化的影响, 以及圆波导的高度等参数进行仿真分析, 最后得到优化后的带宽 10 GHz, 驻波比低于 1.2。再加入慢波结构和衰减瓷的模型中进行计算, 得到了驻波比低于 1.4 的结果。这一仿真结果可以用于指导加工实验测试。

1 设计与模拟

传统的标准波导盒型窗^[5]见图 1, 由 3 部分组成: 标准矩形波导、圆波导和介质窗片。这种盒型窗依靠介质窗片的侧壁和波导壁焊接密封。通过理论计算, D 波段折叠波导行波管盒型窗的介质窗片侧壁厚度只有在 0.1 mm 到 0.3 mm 之间, 才能保证阻抗的匹配。如果采用侧面封接方式, 那么焊接面只有 0.1 mm 到 0.3 mm, 无论是气密性还是焊接牢固度都很难得到保证。

非传统波导盒型窗见图 2，同样由 3 部分组成：矩形波导、圆波导和介质窗片。与传统盒型窗的差别在于，它的介质窗片直径大于圆波导直径。因此它的优点是：a) 焊接时靠窗片表面金属化与波导壁进行焊接密封，由于焊接面加大，气密性和牢固度都能得到保证。此时圆波导在加工时，需要加工出 2 个台阶面来与窗片封接；b) 可以设计得到较宽的频率带宽。

在材料选择方面，要求具有较高的机械强度、低的介电常数、低的损耗角正切和高的热传导系数。在低频段使用时，一般采用氧化铝陶瓷作为窗片材料。当频率增高到短毫米波甚至以上时，蓝宝石材料由于具有较小的损耗角正切，较高的导热性，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之一。在模拟过程中，将蓝宝石窗片的相对介电常数设为 9.4，损耗角正切设为 $0.0002^{[6-8]}$ 。

由于窗片很薄，外径又很小，势必给窗片金属化造成一定困难和误差。在模拟时，考虑了金属化层的影响，并进行了建模，见图 3。

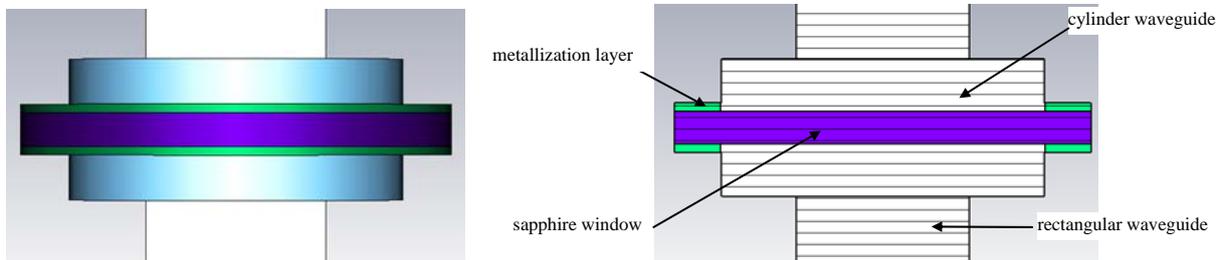


Fig.3 Simulation structure of waveguide pill-box window
图 3 波导盒型窗的模拟结构

在模拟过程中，对窗片金属化层的内径和厚度，以及焊料层的厚度和圆波导高度等参数的影响进行了软件仿真分析。模型中，矩形波导设为国际标准波导(1.651 mm×0.826 mm)，这样便于连接一些标准测试元件和测试信号源。圆波导经过优化调整后，选择了合适的直径为 3.08 mm。窗片的金属化过程大多是手工涂覆钼锰膏^[9]，所以很难保证金属化后，窗片的内径仍然与金属化前保持一致。经过分析，这个参数对驻波影响较大。这将在下一节进行分析。

为了模拟方便，仍然选取该参数为 3.08 mm，通过 CST 软件仿真得到盒形窗的驻波比特性，见图 4。从图 4 看出，在 133 GHz 到 144 GHz 范围内，驻波比都低于 1.2。140 GHz 时的驻波比为 1.088。最大优化的频率带宽为 10 GHz，完全满足 D 波段折叠波导行波管的能量输入输出窗的指标要求。

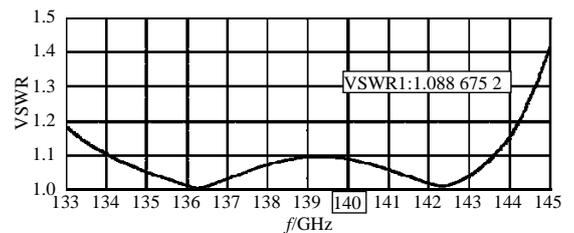


Fig.4 VSWR simulation result of waveguide pill-box window
图 4 波导盒型窗驻波比仿真结果

2 工艺参数对模拟性能的影响

由于尺寸非常小，零件的加工和窗片金属化的误差都对实际测试的结果有一定影响，因此对不同尺寸的变化所产生的驻波比的变化进行分析，以保证和指导实际的加工精确度。

窗片在金属化时，由于手工涂敷金属化膏，通常靠夹具和人工经验来保证，很难做到金属化后的内径也是 3.08 mm。因此假设窗片金属化后，其金属化层的内径是 3.1 mm，从 3.1 mm 扫描到 3.14 mm 来观察其对驻波比的影响，见图 5。由图 5 可知，当金属化层内径是 3.1 mm 时，驻波比最小，为 1.103 8；当金属化层内径是 3.14 mm 时，驻波比变大，为

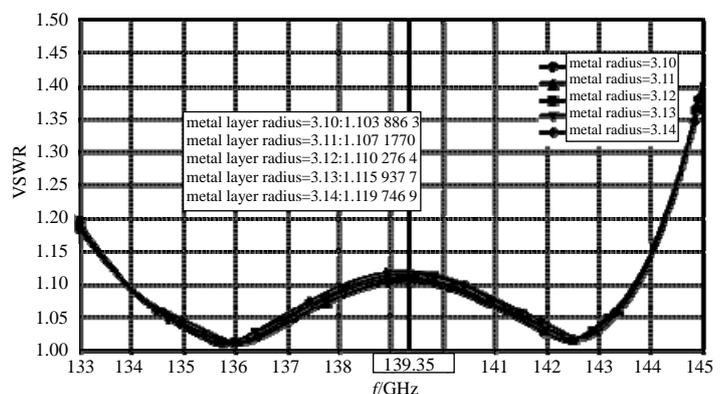


Fig.5 Variation of VSWR with inner radius of the metallization layer
图 5 金属化层内径变化对驻波比的影响

1.119 7。说明这个参数对驻波影响较大，所以需要在金属化时严格控制这个参数，使其尽量接近圆波导的尺寸。但是这个尺寸对于窗带宽的变化影响较小，没有发生带宽变宽或者变窄的趋势。

窗片金属化时，通常金属化层厚度为 0.03 mm 到 0.04 mm，这样才能保证窗片在焊接时的气密性和牢固性。因此对焊料层厚度和金属化层厚度之和的尺寸进行扫描分析，见图 6。通常这个厚度和应该大于 0.04 mm，因为还包括焊料熔化之后留下的厚度，所以从 0.05 mm 开始扫描。由图 6 可知，这个厚度和对于窗的驻波比和带宽都有影响。当厚度和为 0.05 mm 时，带宽比较宽，但 140 GHz 时的驻波比较大；当厚度和为 0.09 mm 时，带宽比较窄，但 140 GHz 时的驻波比较小。最后在使用焊料厚度时，考虑了这方面的因素，选择比较折中的厚度值进行加工和测试。

对圆波导的高度尺寸进行了扫描分析，见图 7，这个结果和图 6 的模拟结果比较类似。也是既对驻波比有影响，又对带宽有影响。所以在综合考虑焊料层和金属化层的基础上，选择合适的圆波导高度进行加工测试，最后通过实际冷测参数来选择合适的尺寸。

3 加入慢波结构的盒形窗模型

盒形窗的模拟结构，最终要加在慢波结构上进行总体计算后，才能得到一个比较优化的结果，这和实际使用情况比较相符。由于整管慢波是分段的，每段后面加入衰减瓷，因此将前面模拟的盒形窗结构加入整体的慢波结构中，其中模拟的慢波周期数与实际分段的慢波周期数情况一致。

通过改变窗片金属化厚度、窗片金属化的内径尺寸，以及圆波导的高度等工艺参数，运用 CST 进行仿真模拟，得到了整管带窗的驻波比计算结果，见图 8。由图 8 可知，整个频带范围从 133 GHz 到 145 GHz，其驻波比都低于 1.4，说明优化的结果比较好。而且在频率为 140 GHz 时，驻波比是 1.158，没有很大的突变结果，可用于慢波和盒形窗的封接，最后在网络分析仪上进行冷测并检验软件仿真的有效性。

由于焊接的原因，在网络分析仪上实际冷测的结果并不理想，在这里就不提供冷测结果了。下一步将把握好各个零件尺寸的配合精确度，保证零件放置位置的正确性，减低冷测的驻波值。

4 结论

本文对 D 波段折叠波导行波管的非传统波导盒型窗进行了设计，在考虑窗片金属化的影响，以及圆波导的高度等工艺参数影响条件下，利用电磁仿真软件 CST 进行了分析，优化得到了在 133 GHz 到 144 GHz 范围内，驻波比都低于 1.2，140 GHz 时的驻波比为 1.088。最大优化的频率带宽为 10 GHz。最后将盒型窗加入到慢波结构中进行计算，也得到了在 133 GHz 到 145 GHz 的频率范围内，其驻波比都低于 1.4 的仿真结果。由于在 140 GHz 的频率条件下，加工尺寸较小，对零件安装与焊接工艺条件要求比较严格；同时盒形窗的尺寸较小，实际测量过程中也会产生误差。因此，需要通过实验来验证，选择驻波比小的来装管，再反过来验证仿真的有效性。

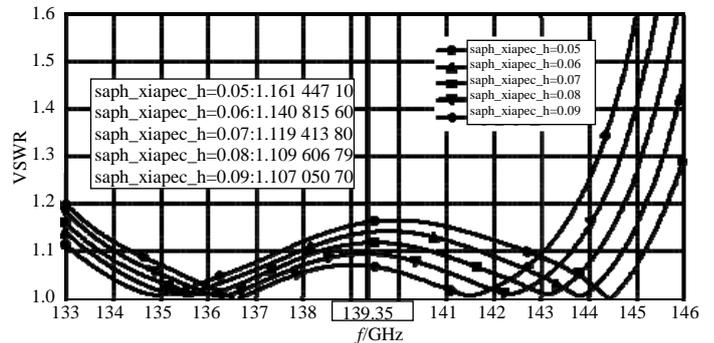


Fig.6 Variation of VSWR with thickness of the metallization layer
图 6 焊料层和金属化层的厚度之和的变化对驻波比的影响

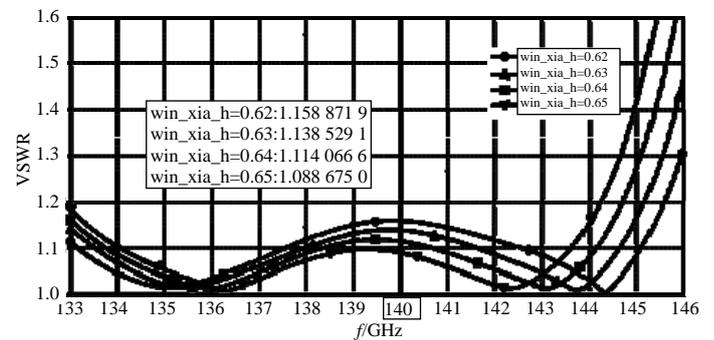


Fig.7 Variation of VSWR with height of the cylinder waveguide
图 7 圆波导高度变化对驻波比的影响

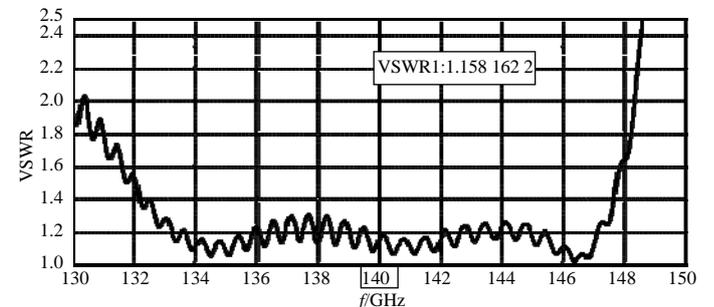


Fig.8 VSWR when pill-box window added to the slow wave structure
图 8 整管慢波带盒形窗的模拟驻波比的计算结果

参考文献:

- [1] HU Yinfu, FENG Jinjun, CAI Jun, et al. A broadband microwave window for W-band TWT[C]// Proceeding of International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey, CA:[s.n.], 2008:376-377.
- [2] 杜英华, 胡银富, 邬显平, 等. W 波段行波管金刚石窗的模拟优化与性能测试[J]. 真空电子技术, 2010(4):81-82. (DU Yinghua, HU Yinfu, WU Xianping, et al. Simulation and Test of W-band TWT diamond window[J]. Vacuum Electronics, 2010(4):81-82.)
- [3] 王亚军, 陈樟, 刘俊. 0.14 THz 折叠波导行波管盒形窗设计与制作[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(4):168-170. (WANG Yajun, CHEN Zhang, LIU Jun. Design and fabrication of pill-box window for 0.14 THz folded waveguide traveling wave tubes[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(4):168-170.)
- [4] 陈樟, 王亚军. 0.14 THz 折叠波导行波管慢波结构设计与加工[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.)
- [5] 电子管设计手册编辑委员会. 大功率速调管设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1979.
- [6] 高源慈, 余国芬, 李恩, 等. D 波段双球镜准光系统测量低耗介质[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(2):446-448. (GAO Yuanci, YU Guofen, LI En, et al. Biconcave quasi-optical resonator system for low loss dielectric measurements at millimeter wave D band[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(2):446-448.)
- [7] Heidinger R. Dielectric measurement on sapphire for electron cyclotron systems[J]. Journal of Nuclear Material, 1994, 212-215(B):1101-1106.
- [8] Thumm M. Development of output windows for high-power long-pulse gyrotrons and EC wave application[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998, 19(1):3-14.
- [9] 高陇桥. Mo 粉与陶瓷金属化技术[J]. 真空电子技术, 2012(4):1-5. (GAO Longqiao. Molybdenum powder and ceramic metalizing technology[J]. Vacuum Electronics, 2012(4):1-5.)

作者简介:



雷文强(1972-), 男, 重庆市人, 博士, 副研究员, 主要从事真空电子学和太赫兹技术的相关研究, email:leton@163.com.

蒋 艺(1983-), 男, 成都市人, 硕士, 研究实习员, 主要从事大功率太赫兹器件的设计工作.

胡林林(1979-), 男, 湖北省荆州市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率微波器件、大功率 THz 电真空器件及信号测量方面的研究.

阎 磊(1984-), 男, 西安市人, 研究实习员, 主要从事毫米波器件、大功率太赫兹真空器件的输能器件及磁聚焦系统的设计研究.

马国武(1981-), 男, 四川省凉山州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件的研究.

陈洪斌(1971-), 男, 重庆市人, 博士, 研究员, 主要从事毫米波和太赫兹波器件研究.