

文章编号: 2095-4980(2013)02-0168-04

0.14 THz 折叠波导行波管盒型窗设计与制作

王亚军^{a,b}, 陈樟^{a,b}, 刘俊^a

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 研究用于 0.14 THz 折叠波导行波管的盒型窗结构, 采用三维模拟软件 HFSS 进行计算与优化, 设计出基于蓝宝石窗片的盒型窗结构。分析了结构参数对盒型窗电压驻波比的影响, 主要结构参数在 ± 0.01 mm 范围变化时, 盒型窗电压驻波比仍然低于 1.2, 保证零件加工的可行性。装配完成盒型窗测试结构, 冷测结果显示, 在 0.135 THz~0.145 THz 范围内衰减系数为 0.7 dB 左右, 满足整管要求。

关键词: 0.14 THz; 盒型窗; 蓝宝石; 衰减

中图分类号: TN124

文献标识码: A

Design and fabrication of pill-box window for 0.14 THz folded waveguide traveling wave tubes

WANG Ya-jun^{a,b}, CHEN Zhang^{a,b}, LIU Jun^a

(a.Institute of Electronic Engineering; b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: This paper mainly discusses the pill-box window with sapphire piece for 0.14 THz folded waveguide traveling wave tubes. The dimension of the window is computed and optimized by HFSS. The VSWR is below 1.2 when the main structure parameters range at ± 0.01 mm. Cold-test result shows the attenuation of the window test structure is about 0.7 dB during 0.135 THz–0.145 THz, which meets the practical requirements in 0.14 THz folded waveguide traveling wave tubes.

Key words: 0.14 THz; pill-box window; sapphire; attenuation

盒型窗是微波管中应用最广泛的微波传输窗, 相比于其他类型的输能窗结构, 具有功率容量大, 频带宽, 结构简单, 工艺上相对成熟等优点。它一方面保持器件内部真空工作状态, 另一方面将微波管产生的微波功率顺利输出。它的性能好坏直接影响着微波管的工作性能和寿命。折叠波导行波管是一种极具发展潜力的太赫兹真空电子器件, 能够在太赫兹频段获得较大的输出功率, 从而应用于太赫兹远距离高速通信和太赫兹高分辨率雷达^[1-2]。因此, 对于应用在 THz 无线通信系统中 0.14 THz 折叠波导行波管的研制, 盒型窗的设计是一个非常重要的环节。随着频率上升到 THz 频段, 介质窗片变得非常薄, 这给设计和工艺都会带来很大的挑战。

1 设计与模拟

传统的盒型窗见图 1(a), 它由矩形波导、圆波导和介质窗片组成, 圆波导的直径通常取矩形波导的对角线。对于传统的盒型窗, 可以通过等效电路及矩阵分析方法^[3]进行计算。其中, 矩形和圆形波导连接处的等效电纳可以通过经验公式^[4]确定, 而介质窗片可以等效为并联的电纳或介质填充的圆波导^[5]来计算。

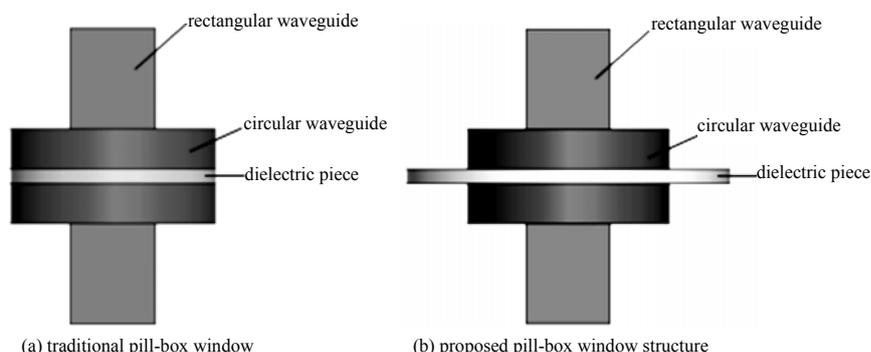


Fig.1 Structure of pill-box window
图1 盒型窗结构

对于传统的盒型窗,它通过介质窗片的侧壁和圆波导壁封接来实现密封。而对于工作在 THz 频段的盒型窗,理论上计算介质窗片的厚度常常在 0.1 mm~0.2 mm 左右,如果仍然采用传统的封接方式,将很难保证气密性。因此在设计中将窗片的直径变大,采用窗片边缘与窗零件进行封接的形式,将很好地保证封接强度和气密性。其次,对于材料的选择,要求具有较高的机械强度、低的介电常数、低的损耗角正切值和高的热传导系数等。在低频段,一般采用氧化铝瓷作为窗片材料。但随着频率的上升,氧化铝陶瓷窗片的损耗变得较大,同时最小的气密性封接厚度很难满足设计要求,限制了其在高频段的使用。蓝宝石窗片由于其具有较小的介质损耗角正切值,高温下放气和漏气都很小,机械强度也很高,因此作为输出窗可以做得很薄,气密性封接的厚度可以小于 0.1 mm,是高频段广泛使用的窗片材料^[6]。这里选择蓝宝石作为窗片材料。

在设计中,传统的等效电路方法已经不能适用,一方面由于气密性封接的要求,介质窗片直径大于圆波导直径,等效的并联电纳很难确定。虽有场匹配的方法来计算,但过程将非常复杂^[7]。另一方面,蓝宝石窗片为各向异性材料,在各个方向上相对介电常数不同,其典型值在 C 轴为 11.58, A 轴为 9.4,不能用各向同性介质片的等效并联电纳来表示。本文采用传统的盒型窗设计方法获得初始结构参数,再通过 HFSS 仿真优化,获得满足带宽要求的盒型窗结构。

对于设计的盒型窗,矩形波导为 WR7 标准波导(1.651 mm×0.826 mm)。对于窗片的厚度,考虑窗片气密性和承受气压的能力,在保证工艺可靠的情况下,尽量降低窗片厚度,以获得较好的驻波性能。在研制中,把窗片材料选择为 0.15 mm。对于圆波导直径的初始值,选择合适的直径使得盒型窗圆波导基模的截止频率与矩形波导基模的截止频率相近。在保持介质窗片半径至少大于圆波导半径 0.5 mm 左右,以保证窗片金属化工工艺的要求,通过优化圆波导直径、盒型窗长度和介质窗片的直径,来获得最佳驻波特性。图 2 是通过 HFSS 仿真优化得到的盒型窗的驻波比特性。从图 2 中可以看出,在 0.135 THz~0.145 THz,电压驻波比基本上都在 1.1 以上,带宽(VSWR<1.2 的情况)在 10 GHz 以上,完全满足折叠波导行波管输能窗的要求。

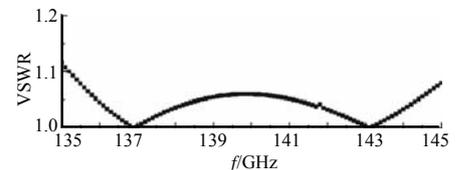


Fig.2 VSWR of the pill-box window
图 2 输能窗驻波比仿真曲线

2 结构参数对性能的影响

由于零件和蓝宝石窗片的加工,不可能完全等于设计尺寸,往往存在加工误差,因此必须分析结构参数对盒型窗性能的影响。通过仿真分析,观察结构参数对盒型窗性能的影响,从而指导确定零件图纸设计时公差范围。对性能影响较大的结构参数,就必须减小加工公差范围,保证加工精确度。

图 3~图 6 是结构参数变化对电压驻波比的影响,可以看出圆波导半径 $r_1 \pm 0.01$ mm,介质窗片半径 $r_2 \pm 0.01$ mm,窗片两边圆波导段的长度 $h_2 \pm 0.02$ mm,介质窗片厚度 $h_3 \pm 0.01$ mm 时,在 0.135 THz~0.145 THz 之间,电压驻波比都小于 1.2。这说明在加工误差 $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内,结构尺寸变化对性能影响不是特别大,不会造成输能窗性能的极度恶化,仍然满足整管对输能窗的要求。

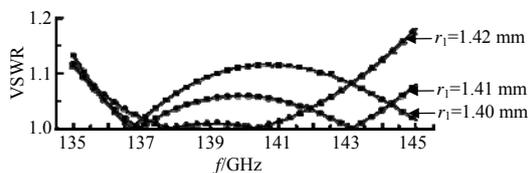


Fig.3 Variation of VSWR with r_1
图 3 圆波导半径对驻波比的影响

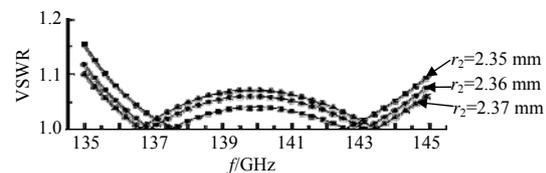


Fig.4 Variation of VSWR with r_2
图 4 窗片半径对驻波比的影响

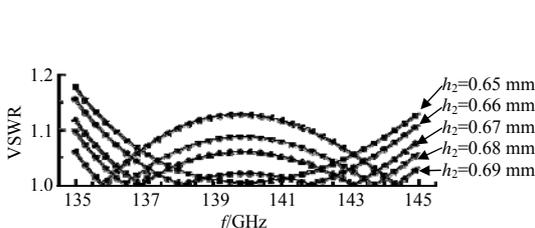


Fig.5 Variation of VSWR with h_2
图 5 窗片两边圆波导段长度对驻波比的影响

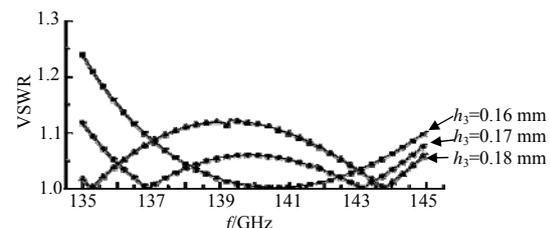


Fig.6 Variation of VSWR with h_3
图 6 窗片厚度对驻波比的影响

图 7~图 8 是介电常数对输能窗驻波比的影响。由于蓝宝石窗片的介电常数是在低频段(大约 10 GHz)进行测试的,在 0.14 THz 左右并没有进行相关的测试。因此有必要分析介电常数变化对驻波比的影响。从图 7~图 8 可以看出,在径向方向,介电常数在 ± 0.5 范围内变化时,在 0.135 THz~0.145 THz 之间,驻波比都小于 1.2,影响较小;在法向方向,介电常数在 ± 0.5 范围内变化时,整体上驻波比的变化相对径向还要小一些,但在某些频点会发生谐振,出现谐振峰,这可能是在输能窗中引入了“鬼模”,这是需要避免的。特别是在大功率速调管中,“鬼模”振荡会造成窗片介质的局部温度升高,使温度梯度超过能承受的最大值,从而造成窗片损坏。这就要求必须对蓝宝石窗片在高频段的介电常数进行测试,代入软件仿真优化,避免出现“鬼模”振荡。

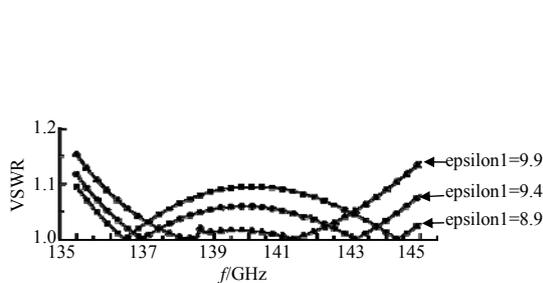


Fig.7 Variation of VSWR with radial dielectric constant
图 7 径向介电常数对驻波比的影响

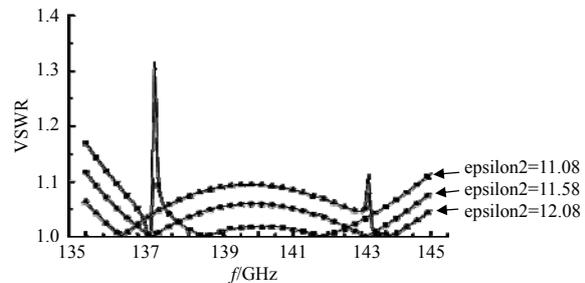


Fig.8 Variation of VSWR with normal dielectric constant
图 8 法向介电常数对驻波比的影响

3 性能测试

根据模拟计算结果,加工蓝宝石窗片及盒型窗零件。由于窗片尺寸较小,窗片金属化时采用夹具辅助手工涂覆。盒型窗中的上、下窗框采用精密机械加工完成,同时保证加工误差在设计允许范围内,装配时采用零件本身和夹具来保证同心度和矩形波导方向的一致性,从而完成盒型窗的装配。图 9 是加工的盒型窗的衰减测试曲线,可以看到在 0.13 THz~0.15 THz 之间衰减大致为 0.7 dB。由于夹具设计不是很好,导致装配后上下窗框的同心度较差,从而造成盒型窗的衰减较大。目前已完成夹具的优化设计和上、下窗框零件尺寸和结构的优化设计,正进行第 2 轮盒型窗的装配。

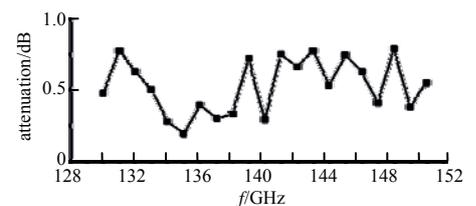


Fig.9 Experiment result of pill-box window
图 9 盒型窗的衰减测试结果

4 结论

本文主要讨论了用于 0.14 THz 折叠波导行波管的盒型窗的设计,利用三维模拟软件 HFSS 进行模拟计算,优化设计盒型窗的结构,分析结构参数和介电常数对盒型窗性能的影响。在加工误差范围内,结构参数的变化不会恶化盒型窗的性能,保证了盒型窗零件的可加工性。同时通过精密机械加工,完成了盒型窗零件的加工和装配。冷测结果表明,在 0.135 THz~0.145 THz 之间衰减大致为 0.7 dB。

参考文献:

- [1] 张芳,董焯,董志伟,等. 微电真空折叠波导行波管放大器的电子枪设计[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):320-324. (ZHANG Fang,DONG Ye,DONG Zhiwei,et al. Design of electron gun for vacuum microelectronic FWG-TWT amplifier[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):320-324.)
- [2] 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]. 信息与电子工程, 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]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):299-302.)
- [3] 潘桂魁. 盒形窗频率特性的计算[J]. 电子管技术, 1985(1):50-52. (PAN Guikui. The calculation of frequency characteristics of pill-box windows[J]. Electron Tube Technology, 1985(1):50-52.)
- [4] 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. (Electronic Tube Design Handbook Editorial Committee. High Power Klystron Design Handbook[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1979.)