

一种高功率Ka频段波导密封窗的设计

杨志雄¹ 韩邦杰² 田兵¹

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北 石家庄 050081

2. 空装驻保定地区军事代表室 河北 保定 071000

摘要: 微波电真空器件是各个微波电子系统的核心, 盒形窗是高功率微波真空器件中最常用的一种输出窗形式, 对器件和系统的性能具有重要影响。根据设计目标, 对盒形窗的各参数进行了理论分析和数值计算, 采用99氧化铝陶瓷片, 设计了输入输出为标准矩形波导的Ka波段盒形窗结构, 并利用电磁仿真软件Ansys HFSS对盒形窗的结构尺寸进行了建模与仿真优化, 得到了在工作频段26GHz~40GHz范围内反射优于-20dB, 驻波比优于1.25的新型盒形窗; 对该波导窗进行设计制作和测试, 该波导窗在26~40GHz的插入损耗小于0.3dB, 耐功率拷机试验证明波导窗可以承受输出功率300W, 具有良好的工程实用价值。

关键词: 盒形窗; 陶瓷片; 行波管; Ka波段

引言

高功率微波真空器件, 是高功率微波系统的重要组成部分, 高功率微波输出窗属于微波系统对外输出的一种重要窗口形式。输出窗的性能好坏能够直接影响高功率微波系统的真空密封性能、输出功率容量、使用寿命以及系统的可靠性、稳定性。随着微波高功率技术的不断发展, 为提高微波输出窗的使用效率并不断提高其耐功率容量, 人们开始不断的对微波输出窗的结构以及微波输出窗的制造材料进行深入的研究并在近几年取得了较快的进展。

行波管功放是一种抗干扰能力强、宽频带、中功率、微波真空类放大器, 具有功率处理能力强、重量轻、效率高等优点, 广泛应用于先进雷达和通信卫星发射机等高功率微波发射系统。波导窗作为行波管的重要组成部分, 具有维持行波管功放内部高真空性能, 以及保证微波电磁能量正常传输的作用。而且波导窗很好的真空密封性能还可作用于行波管功放整机内部防止雨水或者其他杂质沿着空气波导进入行波管整机内部, 造成整机设备故障, 影响设备的工作稳定性以及使用年限。为了保证行波管的真空密封性能, 盒形窗是大功率微波管通常使用的一种输出窗结构, 典型的盒型窗是在标准尺寸矩形波导中间插入一段圆波导, 圆波导中间焊接介质片, 形成一个频带宽、功率容量大、结构简单、工艺成熟、匹配性能好的密封窗。此外, 在结构上便于加水套通水冷却, 故近年来盒形窗已成为高功率微波毫米波真空器件中最常用输出窗形式。早期一般使用等效电路法进行盒形窗的设计, 需要用实验进行校正。近年来, 大型三维电磁计算软件被广泛用于分析与设计, 设计的准确性和效率都得到了提高。

针对盒形窗的表面电场弱, 承受功率能力强, 频率宽以及高效的功率输出设计要求, 结合国内的加工工艺和工程实际, 本文对传统的盒形窗结构进行了优化改进, 提出了一种结构简单, 易于实现, 适用于Ka频段的盒形窗。

1 技术指标

盒型窗的主要技术指标要求为:

工作频段: 26GHz~40GHz;

通过功率: $\leq 300\text{W}$;

回波损耗: $< -30\text{dB}$;

插入损耗: $< 0.3\text{dB}$;

驻波比: < 1.5 。

2 理论分析

微波器件是高功率微波系统中的重要组成部分, 对于微波器件的理论研究和参数计算国内国外都有大量分析仿真, 对于输出窗的理论分析之前主要针对的是矩形窗, 同轴窗以及阶梯窗。随着高功率微波的不断发展和广泛应用, 盒型窗的出现极大改善了原有的不足。随之盒型窗的设计方法和理论分析就成为微波器件研究的一个重要方向。之前为提高高功率微波系统的功率容量, 采用对高功率微波系统整体抽真空处理, 但是由于内部空间较大, 密封环节和位置较多, 整体抽真空的难度大且可靠性低。尤其是一些输出端口需要外接出去, 为了提高高功率微波系统的可靠性, 进一步改进和优化高功率微波系统的结构, 在输出部分加入盒型窗, 并在窗的位置进行真空密封。因此, 盒型窗的引入大大提高了高功率微波系统的可靠性, 密封性, 其性能好坏会直接影响系统的性能。

盒形窗典型结构如图1所示，它将一个圆盘型介质片密封在一段TE₁₁单模圆波导中，再通过方圆变换将TE₁₀单模工作矩形波导与圆波导相连。从传输线理论出发，该结构中矩形波导到圆波导的阶跃跳变和圆波导中材料性能的变化都可以等效为传输线中的不连续电容，因此，盒形窗可由如图2所示的等效电路近似表示。图中Z_{c1}为矩形波导TE₁₀模的特性阻抗，Z_{c2}为圆波导TE₁₁模的特性阻抗，x₁为矩形波导与圆波导转换处不连续电容的电纳，x₂为插入圆波导的介质片所引入的等效电纳。

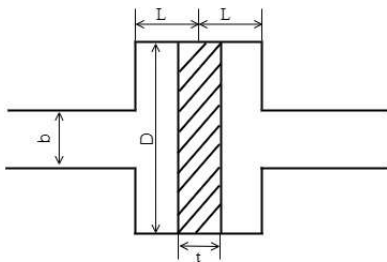


图1 盒形窗 典型结构

Fig1 the basic structure of pillbox

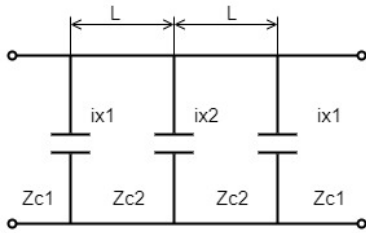


图2 等效电路

Fig2 the equivalent circuit

3 盒形窗参数设计

3.1 介质窗片材料选择

窗片材料作为高功率微波器件腔的关键构件不仅要大气环境进行隔开形成真空，还要能够承受较高的功率以及空气温度带来的热应力、热传导、微波能量的快速变化冲击而不损坏。能够适应高功率微波透波性、高热量快速变化集聚特性的材料选择成了影响该技术发展的瓶颈。

通过对比常规材料和高功率微波材料的不同技术性能要求，应从以下几方面着重考虑材料的特性：（1）柔韧性要比较好能够满足一定的韧度使用要求；（2）热传导率要快能够及时将热量传出去；（3）抗腐蚀、耐高温，能够在恶劣环境下使用；（4）结构密度高不易损坏；（5）能够通过焊接、粘接等金属化处理；（6）介电常数、损耗等指标都要比较低；（7）较高的介电强度系数；（8）驻波系数也要尽可能的好。以上这些特性有

的作为材料选择的基本要求，比如（1）-（3）；有的考虑窗片的安装密封等特性能够更好的应用，如（4）、（5）；而重点影响微波的透波性能、高功率下电磁波的传输损耗、效率等主要微波指标的介电损耗、强度、驻波系数、介电常数、损耗正切角等性能作为重点考虑指标参数。

通过以上分析除了考虑材料的本真特性外，作为高功率微波器件应该重点考虑驻波系数、介电损耗角正切、介电常数三个主要性能指标。

驻波系数作为微波传输的一项基本指标，能够很好反应出电磁波在传输过程中的反射情况。当驻波系数等于1时，表示一点反射都没有，微波阻抗匹配非常良好，传输效率达到最高，达到非常完美的理想状态。实际上在工程实践中驻波系数都会大于1，都会存在一定的反射波，多多少少都会对传输效率进行影响。

介电损耗角正切是指交流信号在传输过程中每个周期内损耗的能量与实际传输能量之比，能够表示出微波传输中消耗的能量多少。一般都是用tanδ表示，正切tanδ值越大表示电磁波在传输过程中消耗的能量也就越多。而消耗的能量最终会转化为热量集聚在窗片上，随着时间的积累如果温度过高到一定程度就会出现炸裂等情况，造成系统损坏无法正常工作。

介电常数ε反映了物质保持电荷的能力，是指同一电容器中用某一物质作为电介质与该电容器在真空中的电容的比值。通常介电常数越大表示该物质保持电荷的能力越强，产生的内电场对外电场的削弱也越严重。材料的介电常数在输入输出阻抗固定的情况下，随着频率f不断提高，介质材料的介电常数ε也要求越小。

介质窗片材料的介电常数与损耗系数对输出窗口的带宽、驻波比、散热特性和热损耗有着较大影响。因此，需根据设计需求充分考虑介质盘的密封强度和应力平衡，进行相应的窗片材料选择^[1]。

目前常用的介质窗片大体上分为陶瓷窗、玻璃窗与宝石窗三类。

陶瓷窗的材料主要是氮化硼陶瓷、氧化铍陶瓷、氧化铝陶瓷等是陶瓷窗片的常见材料。三种陶瓷材料优缺点各异，其中氧化铍陶瓷导热性能最好，但气密性相对较差，且氧化铍的有毒性使得加工更加复杂，使用范围较小。氮化硼瓷具有相对介电常数较低、机械强度适中、导热率高的特点，能够耐受焊接与真空排气时的高温，但成本相对较高，封接较为困难。氧化铝陶瓷导热性能较好，机械强度适中，但较高的相对介电常数使得频带较窄^[2]。

玻璃窗的材料主要就是高强度耐热玻璃,介电常数较低,因而玻璃窗片能够实现宽带宽,但是玻璃的机械强度一般较低,导热性能也比较差,功率容量较低,面对大功率时无法实现长时间连续工作。

宝石窗采用宝石作为原料,具有介电损耗小、机械结构应力强,并且能够经受高温焊接以及在焊接过程中真空排气产生高压、高温的恶劣环境。但是由于介电常数相对过高,对比氧化铝瓷和氮化硼瓷等介质材料的导热率更低一些的不足特点,在功率要求不是很高的微波器件中常选用宝石窗片作为首选材料。

通过研究调研发现目前对微波窗的设计探索大部分集中在对其电特性的设计仿真,对应力、热传导、高温、高压等外在环境的一体设计较少。随着使用要求的不断提高,结合本次设计任务需求以及对不同窗片材料的性能对比分析。随着计算机软硬件技术的不断发展与进步,通过反复不断的模拟仿真,最终采用介电常数为9.9的99氧化铝陶瓷片作为盒形窗的介质窗片,更好的将热、力、电协同一体能够更加精细加工,同时也能够满足高功率微波的要求^[3]。

3.2 参数计算

根据本次设计中盒形窗的单模工作频率范围,采用标准的BJ320波导作为窗两端所接的矩形波导,宽、窄边分别为7.12mm与3.56mm。陶瓷窗片的直径对盒形窗性能有着严重影响,陶瓷片的半径过大会影响圆波导的散热且不利于圆波导的焊接,半径过小则会造成矩形波导与圆波导的连接不易实现宽带匹配且不利于传输高功率。本次设计中,初步将矩形波导的对角线长度设定为圆波导与陶瓷片的直径, $D = \sqrt{a^2 + b^2} = 5.44\text{mm}$ 。陶瓷窗片的厚度对匹配功率和封接强度有着重要影响,窗片越薄越有利于匹配,但会制约功率的传输,降低机械性能与真空气密性;窗片过厚则会导致无法匹配,增大反射损耗,降低传输效率。根据理论分析中的式(5),可求出在工作频率为30GHz时陶瓷窗片的临界厚度0.82mm,这是可实现匹配的最大窗片厚度。初步选定窗片厚度后,再次利用式(5)可求得对称单边圆波导段长度 $L = 1\text{mm}$ 。

3.3 建模与仿真优化

利用电磁仿真软件Ansys HFSS建立盒形窗的模型,将上述参数设计中得到的结果作为HFSS建模仿真的初步参量。利用HFSS对盒形窗结构中圆波导半径与长度、氧化铝陶瓷片半径与厚度进行仿真优化,并对盒形窗结构中的矩形波导进行内倒角等结构尺寸微调。仿真结果表明:该盒形窗在工作频段26~40GHz范围内,回波损耗

优于-20dB,插入损耗优于-0.06dB,驻波比优于1.22,在整个工作频段内,满足了设计指标。该盒型窗具有更低的窗片表面电场,耗散在窗片上的热量更低,在热、应力与形变等方面也具有一定优势,说明了这种结构的微波窗具有能承受较高的峰值和平均功率、散热良好的特点,表明该结构的盒型窗是一种较好的高功率应用下的微波窗结构,适用于高功率的应用。

4 测试

在常规设计基础上通过仿真设计制作的新型集成波导合成窗的体积约为19 mm × 19 mm × 10mm,输入输出端口均采用BJ 320波导端口。用Agilent 8722 ES 矢量网络分析仪,采用双端口校准方式校准网络分析仪。对波导窗进行了无源测试,整个波导窗的插入损耗在整个26~40GHz的传输损耗小于0.2dB,驻波小于-15dB。为了验证波导窗耐功率特性,将波导窗连接在功放的输出端,进行了连续波耐功率拷机实验,拷机功率300W,拷机时间4小时,经过4小时的功率拷机,对波导窗的性能重新进行无源测试和显微镜下观察,无源测试结果和显微镜下观察对照拷机前,波导窗指标无变化,耐功率拷机试验证明波导窗可以承受输出功率300W。

结束语

本文综述了高功率微波窗材料的选择及其透波性能的研究进展,从材料的选择、介电性能、驻波系数等方面进行分析。首先,列举了国内外常用的微波窗材料,并比较分析了它们的物理性能,特别是透波性能的差异。最后对Ka频段盒形波导窗的参数进行了理论分析和数值计算,利用Ansys HFSS进行了大量的建模仿真与优化,确定了盒形窗的结构及尺寸,设计了一款新型ka波段盒形窗,并对该波导密封窗进行了无源测试和功率测试,无源测试和功率测试结果符合设计要求,该盒形窗在26~40GHz频率范围内具有低回波损耗、低插入损耗及低电压驻波比。该盒形窗结构在微波毫米波电真空系统和固态整机设计中具有较大的应用价值,随着高功率微波技术的不断发展,微波窗也可应用到其他相关领域。

参考文献

- [1]张雪,王勇,范俊杰,朱方,张瑞.金属壁与介质窗之间次级电子倍增效应的研究[J].物理学报,014,63(16):401-409.
- [2]张巨先.低介电损耗、细晶Al₂O₃陶瓷材料应用性能研究[J].真空电子技术,2013(04):19-22.
- [3]詹为宇.特种模块封装工艺研究[C].成都:电子科技大学工程硕士论文 2007.