

采用圆锥形陶瓷大功率微波输出窗的模拟分析

王瑞敏 张兆传 符春久 丁耀根
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 该文尝试利用一种圆锥形陶瓷盒形输出窗,改善大功率微波输出窗的匹配特性、功率承受性能和热耗散能力。采用Ansoft HFSS三维计算软件分析了此类陶瓷输出窗的基本电气和热耗散性能,对大功率输出窗的工程设计很有意义。

关键词 微波器件,圆锥形陶瓷,盒形输出窗,计算机模拟

中图分类号: TN12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2175-04

The Simulation of the Conical-Shaped-Alumina Ceramic Pill-Box RF-Window

Wang Rui-min Zhang Zhao-chuan Fu Chun-jiu Ding Yao-gen
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract In this paper, a conical-shaped alumina ceramic pill-box windows is investigated to improve the output properties of the RF-window, such as matching characteristic, the maximum power transmission capability and heat dissipation. The basic electrical characteristic and heat dissipation have been analyzed with Ansoft HFSS software, which is helpful to the engineering design of RF-window.

Key words Microwave devices, Conical-shaped alumina ceramic, Pill-box RF-window, Computer simulation

1 引言

输出窗是大功率微波电真空器件、加速器和其他大功率微波电子系统的关键部件,对器件和系统的频带、功率容量、可靠性和寿命具有重要作用。它的作用是将大气和真空隔开,为微波功率提供一个输出窗口。目前使用较普遍的是盒型输出窗,它将一个圆盘平板介质片密封在具有相同截面的圆波导中,再通过圆变方过渡段与矩形波导相接。这种窗具有结构对称简单,工艺成熟等特点,但结构的跳变过渡引起纵向电场并可能形成某些特定频率的谐振。纵向电场将可能引起二次电子倍增效应而导致窗的损坏。特定频率的谐振将干扰器件的正常工作。此外,由于这种窗的圆波导工作于TE₁₁模,电场主要集中于介质窗片的中部,在高脉冲功率工作时相对容易击穿,而高平均功率工作时散热相对困难^[1]。随着科学技术的高速发展,各个领域对微波电子器件输出高峰值和高平均功率的要求不断提高。为此,人们通过改进窗的设计或采用新的高导热率窗片材料来改进输出窗的微波功率输出能力。将方圆的跳变过渡改为渐变过渡可以有效减弱窗片表面的纵向电场强度,改善二次电子倍增的影响,但场强依然集中于窗片的中部。而采用低损高导热率材料(如金刚石)作为窗片,可以明显提高窗的微波功率承受能力,但窗片的价钱非一般微波大功率电真空器件所能承受^[2,3]。本文利用一种圆锥形陶瓷输出窗,改变电场在陶瓷表面的分布和能量穿过陶瓷表面的方向。利用Ansoft HFSS软件的高频和热分析计

算功能,模拟分析这种类型的输出窗在提高微波功率输出能力、降低二次电子倍增效应和改善窗片散热能力等方面的作用,为我国真空微波器件向更高功率电平发展寻求新的输出窗结构。

2 圆锥形陶瓷输出窗模型

图1是本文研究的圆锥形陶瓷输出窗模型。它区别于普

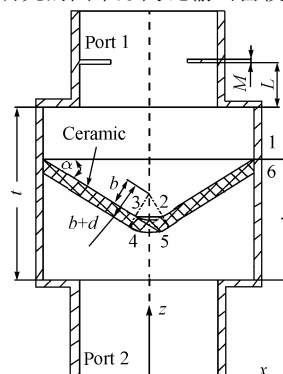


图1 圆锥形陶瓷输出窗模型

Fig.1 The model of the conical-shaped-alumina ceramic pill box window

通盒形输出窗的特点在于陶瓷片呈圆锥形(1—2和5—6段)并且锥台的顶端与球冠(2—3和4—5段)相切连接,而普通盒形窗陶瓷为圆盘状。从窗的端口“1”看,陶瓷的形状是凹形,有利于改变电场在陶瓷表面的分布和匹配情况,通常将其与器件的输出端连接。而从窗的端口“2”看,陶瓷的形状是凸形,它能够提高输出窗片对气压的承受能力。实际使用过程中端口“1”为功率输入口,端口“2”为功率输出口。输入口一侧为

真空, 输出口一侧是空气或处于较高压力的充气状态。在高功率工作时, 窗的输出端通常充气以提高传输系统的功率容量和电场击穿强度, 这种拱形结构比平面结构能承受更大的气体压力。我们假定窗片的锥台与 xy 平面的夹角为 α , 窗片的厚度为 d , 与锥台相切连接的球冠的内半径为 b , 外半径为 $b+d$, 从 $z=0$ 到陶瓷片的“1”点的距离为 h , 圆波导的半径为 R , 高度为 t , 输入和输出波导是S波段BJ32标准波导, 电感膜片的厚度 M , 它离圆波导的距离 L 。

通常输出窗是作为一个单模传输系统, 可以把它看成一个线性双端口网络。于是图1所示的圆锥陶瓷微波输出窗可以看成是一个两端口网络, 只要反射参数 S_{11} 和传输参数 S_{21} 被确定, 输出窗的外部特性就可以完全确定。Ansoft HFSS软件是适用于射频、无线通信、封装及光电子设计的任意形状三维电磁场仿真的软件, 非常适合输出窗S参数的模拟计算。基于这一软件, 通过选择窗框和陶瓷片的几何结构和物理特性参数, 在S波段作了大量的数值模拟和优化, 寻求这种输出窗在改善高功率输出能力方面的优势, 同时将这些结果与相同结构参量的圆盘形输出窗模拟结果进行比较分析。

3 圆锥形陶瓷输出窗的模拟结果和分析

3.1 圆锥形陶瓷输出窗结构参数对电性能的影响

为了让器件的输出端与输出窗匹配, 在输出窗的输入口“1”离圆波导 L 处加一厚度为 M 的金属调谐膜片, 调整膜片的宽度改善线路匹配使中心频率落在在工作频率范围内。通过调整窗片的圆锥角度、圆弧半径、窗片的位置和厚度以及调谐膜片的位置和厚度, 利用Ansoft HFSS软件进行了大量的选择和优化计算。结果表明, 在 $0^\circ < \alpha < 32^\circ$ 区间随着 α 变大, 驻波比最小点往高频端移动, 并且驻波比小于1.1的频带展宽; 在 $32^\circ < \alpha < 45^\circ$ 区间随着 α 变大, 驻波比最小点仍然往高频端移动, 但是驻波比小于1.1的频带变窄; $\alpha = 32^\circ$ 时获得较为理想的频带。当窗片圆弧半径 $b < 15.12\text{mm}$, 且逐渐变大时, 驻波比小于1.1的频带变宽, 驻波比最小点频率几乎不变; 当 $15.12\text{mm} < b < 20\text{mm}$ 且逐渐变大时, 驻波比小于1.1的频带变窄, 驻波比最小点变化不显著; $\alpha = 32^\circ$, $b = 15.12\text{mm}$ 时频带较好。圆锥陶瓷片的厚度 d 影响输出窗的中心频率, 而它在圆波导段中的相对位置则影响驻波比小于1.1的频带宽度。当 $h < 31.05\text{mm}$ 且随着 h 变大, 驻波比最小点往低频端移动, 驻波比小于1.1的频带变宽; 当 $31.05\text{mm} < h < 45\text{mm}$ 且随着 h 变大, 驻波比最小点往高频端移动, 驻波比小于1.1的频带变窄; 当 $\alpha = 32^\circ$, $b = 15.12\text{mm}$, $h = 31.05\text{mm}$ 时有较好的频带和驻波。当 $0 < M < 2\text{mm}$ 时, 随着 M 变大, 驻波比最小点往高端移动, 驻波比小于1.1的频带逐渐变宽; 当 $M > 2$ 时, 随着 M 变大, 驻波比小于1.1的频带逐渐变窄, 驻波比最小点移动不显著; 当 $\alpha = 32^\circ$, $b = 15.12\text{mm}$, $h = 31.05\text{mm}$, $M = 2\text{mm}$ 时取得最好的频带。此外, 膜片离圆波导段的距离 L 变大, 驻波比最小点往低频端移动; 当 $L < 22.41\text{mm}$ 时, 随着 L 变大, 驻

波比小于1.1的频带宽度逐渐变宽; 当 $L > 22.41\text{mm}$ 时, 随着 L 变大, 驻波比小于1.1的频带宽度变窄; $\alpha = 32^\circ$, $b = 15.12\text{mm}$, $h = 31.05\text{mm}$, $M = 2\text{mm}$, $L = 22.41\text{mm}$ 时为最好。在综合考虑驻波系数和频带宽度的基础上, 窗片为97%氧化铝陶瓷, 在圆波导的半径 $R = 44\text{mm}$, 高度 $t = 45\text{mm}$, $\alpha = 32^\circ$, $b = 15.12\text{mm}$, $d = 3\text{mm}$, $h = 31.05\text{mm}$, $L = 22.41\text{mm}$, $M = 2.0\text{mm}$ 时, 获得了这种输出窗驻波比和考虑陶瓷窗片的损耗时的传输参数 S_{21} 随频率变化的优化结果(图2和图3)。从图2和图3可以看出, 在 $3.275\text{GHz} \leq f \leq 3.31\text{GHz}$ 范围内, 驻波比 ≤ 1.12 ; 在 $3.27\text{GHz} \leq f \leq 3.315\text{GHz}$ 范围内, 驻波比 ≤ 1.2 ; 在计算结果中 $3.24\text{GHz} \leq f \leq 3.34\text{GHz}$ 时, 驻波比 ≤ 1.5 。

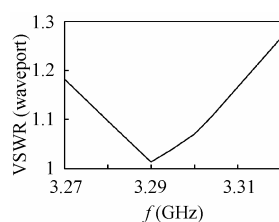


图2 输出窗的驻波比
Fig.2 VSWR of the optimized window

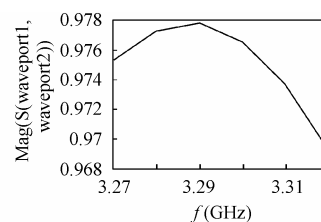


图3 输出窗的传输参数 S_{21}
Fig.3 The transmission parameter S_{21}

3.2 圆锥形陶瓷表面的电场分布

图4是圆锥形陶瓷输出窗基于3.1节优化匹配模拟结构和电参数计算的窗片表面电场分布图。与圆盘形陶瓷输出窗窗片表面的电场分布(图5)相比较。圆盘形和圆锥形陶瓷输出窗的工作模式都近似为 TE_{11}^0 模。由于输出窗的方圆波导连接处的不连续造成了电场在该处畸变, 圆锥形陶瓷窗片的形状能够较好适应电场的畸变, 使表面的电场方向很接近陶瓷表面的切线方向, 有利于输出窗电性能的匹配。对于圆盘形窗片, 这种畸变产生了远比圆锥形窗片更强的垂直于陶瓷表面的电场强度。于是采用圆锥形窗片能够有效降低输出窗中二次电子倍增轰击窗片的风险。从另一个角度, 圆锥形窗片在改善电场分布的同时, 由于陶瓷的表面积增大使得介质内部电场强度的幅值减小并且分布更为均匀, 这将减弱介质中心

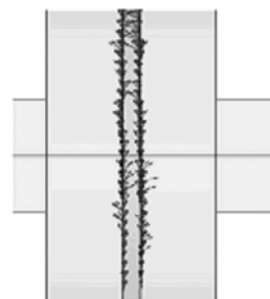
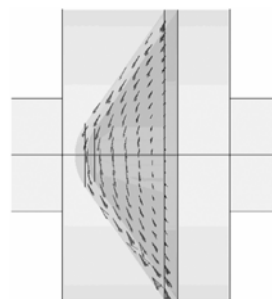


图4 圆锥形输出窗电场分布图 图5 平面陶瓷输出窗电场分布图
Fig.4 The electric field distribution of the conical-shaped-alumina ceramic pill box window Fig.5 The electric field distribution of the disk ceramic pill box window

的电场强度, 降低电场击穿的可能性, 提高了输出窗高脉冲功率的承受能力。为了能够给出定量的比较, 我们取圆盘

形输出窗的圆波导尺寸、矩形波导尺寸、窗片的材料与锥形陶瓷输出窗均相同，分别计算了圆锥形和圆盘形输出窗在窗片表面沿电场最强方向电场幅值的分布情况(图6和图7)。从图6和图7可以看出，圆锥形陶瓷输出窗的峰值电场比圆盘形陶瓷输出窗的更小，并且在陶瓷表面的分布远比圆盘形陶瓷输出窗更加均匀，这对改善输出窗散热能力很有意义。

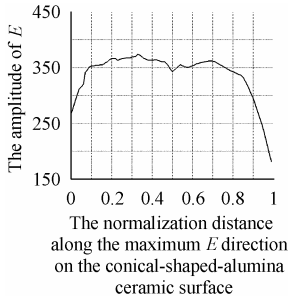


图6 圆锥形陶瓷表面沿电场最强方向瞬时电场幅值分布
Fig.6 The amplitude E on the conical-shaped-alumina ceramic

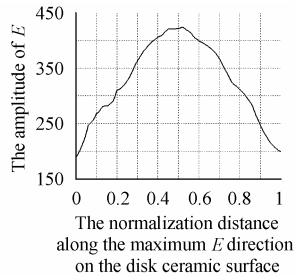


图7 圆盘形陶瓷表面沿电场最强方向瞬时电场幅值分布
Fig.7 The amplitude of E on the disk ceramic

3.3 圆锥形陶瓷窗表面的功率流

从3.2节我们已经看到，圆锥形陶瓷输出窗能够适应因方圆波导跳变引起的电场畸变，使电场近似平行于窗片的表面。同时它也使得磁场近似平行于窗片的表面。利用3.1节优化匹配模拟结构和电参数计算穿过圆锥形陶瓷输出窗的功率流，即Poynting矢量 $S = E \times H^*$ ，能流将沿着垂直于圆锥形窗片的表面穿过陶瓷窗片(图8)，这不仅使能量穿过介质的路径最短、损耗最小，而且为适应场和能流的变化和传输，窗片中心球冠的能流密度将大大减弱，同时在圆锥面上能流的分布会更均匀，能够提高输出窗脉冲和平均功率的输出能力。对于圆盘形陶瓷输出窗，由于窗片表面纵向电场的出现，能流穿过窗片时不垂直于窗片表面(图9)，能量损耗增加，并且更为集中于窗片的中心，不利于高平均和高脉冲功率的传输。

3.4 圆锥形陶瓷输出窗片上的热量分布

从功率的反射和传输、场强分布和电磁能流分布的分析

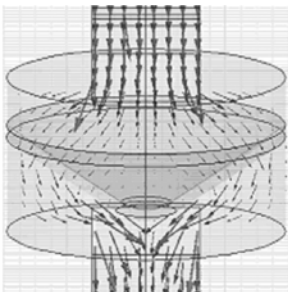


图8 圆锥形陶瓷输出窗 Poynting 矢量
Fig.8 Poynting vector through the conical-shaped-alumina ceramic

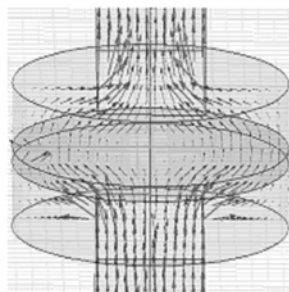


图9 圆盘形陶瓷输出窗 Poynting 矢量
Fig.9 Poynting vector through the ceramic

均表明圆锥形陶瓷输出窗有利于提高脉冲和平均功率的输出能力。不过，输出窗中能量分布和传输与热量分布和耗散还有一定的差别，为此，我们利用Ansoft HFSS软件的分析功能，分析比较了圆锥形和圆盘形陶瓷输出窗片上的热量分布。图10是圆锥形输出窗中窗片介质损耗热量分布图。图11给出了圆波导半径相同、窗片材料相同的圆锥形和圆盘形陶瓷输出窗片表面沿电场最强方向的介质损耗相对热量分布曲线。图11中实线为圆锥形窗片结果，虚线为圆盘形窗片结果。由图10可以发现沿着波导的窄边方向窗片有两个热量损耗较高的区域，这在图11中对应的曲线也表明了这一点。从图11中可以看到，圆锥形输出窗片表面的热量损耗在窗的中心球冠顶部最低，而后随着离该中心点的距离增加而升高，并在离中心距离约2/3圆波导半径处达到最大；但圆盘形输出窗片上的热量损耗最高点只有一个，且在圆盘的中心。圆锥形窗片上的最高热量分布约为圆盘形窗片的2/3，并且靠近圆波导壁。由此可见，当穿过输出窗的微波功率增加时，在圆盘形窗片上产生的热应力将远比圆锥形窗片的大且集中于窗片的中心，易于导致窗片破裂。在圆锥形窗片上温度的分布远比圆盘形窗片上更均匀，并且最高热量分布靠近圆波导的金属边界，有利于热量向外扩散和强迫冷却，因此可以承受更高的功率耗散。

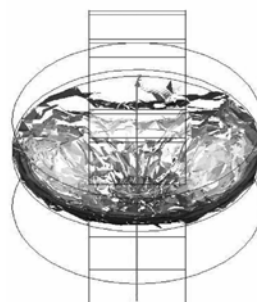


图10 圆锥形输出窗热量分布
Fig.10 The heat dissipation on the conical-shaped-alumina ceramic

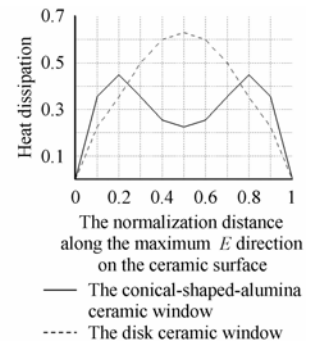


图11 输出窗表面沿电场最强方向的热量分布
Fig.11 The heat dissipation on the ceramic

4 结束语

Ansoft HFSS软件模拟优化表明，相对圆盘形陶瓷输出窗而言，圆锥形陶瓷输出窗能够使窗片上电场的分布更均匀且垂直窗片表面的电场大为降低，电磁能流垂直于窗片表面流出，耗散在窗片上的热量分布更均匀且更有利于冷却。因此这种输出窗能够有效地抑制二次电子发射、降低微波功率损耗、提高散热能力和承受更高的脉冲和平均功率，是大功率微波电真空器件向更高平均和脉冲功率发展可以选用的一种较为理想和实用的输出窗结构。

致谢 感谢罗积润研究员在该项工作中的耐心帮助和大力支持。

参 考 文 献

- [1] Michizono S, Saito Y, Matsumoto T, *et al.* RF-windows used at the KEKB linac. *Applied Surface Science*, 2001, 72(3): 1869-1875.
- [2] Manfred.thumm. State-of-the-art of high power Gro-devices and free electron masers update 2003. *Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6708*, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, February 2003: 22-24.
- [3] Neuber A A, Laurent L, Lau Y Y, Krompholz H. Windows and RF breakdown, *High-Power Microwave Sources and Technologies*, edited by R.J. Barker and E. Schamiloglu, IEEE, New York, 2001: 325.
- 王瑞敏: 女, 1978年生, 工程师, 专业为物理电子学.
张兆传: 男, 1965年生, 研究员, 专业为物理电子学.
符春久: 男, 1939年生, 研究员, 专业为微波电子学.
丁耀根: 男, 1942年生, 研究员, 博士生导师, 专业为物理电子学.