

## 3.7GHz 低杂波传输线系统新陶瓷窗设计

刘亮, 单家芳, 刘甫坤, 匡光力

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 结合陶瓷窗设计相关理论, 采用电磁场仿真软件(CST)和有限元分析软件(Ansys), 仿真计算了低杂波传输线系统新陶瓷窗的电磁和热力学性能。设计的陶瓷窗采用 BeO 陶瓷作为介质窗体, 在中心频率点附近 300MHz 以上的带宽内, 其驻波比小于 1.1, 窗片中心的最大温升为 11.7°C。

**关键词:** 低杂波; 陶瓷窗; 热应力

**中图分类号:** O532<sup>+</sup>.23

**文献标识码:** A

### 1 引言

陶瓷窗是低杂波传输线系统上非常关键的微波器件, 它的作用是让微波能量无反射地通过, 并把超高真空的托卡马克装置与充气状态(或大气)的传输线隔开, 即完成传输线两端的能量传输和气体密封。对陶瓷窗的要求是在一定的工作频带内匹配, 具有最小的反射和插入损耗, 且具备一定的功率容量以满足高功率微波传输的要求。同时陶瓷窗也是低杂波传输线系统上非常脆弱的微波器件, 在以往的 HT-7 实验过程中曾发生因陶瓷窗破损而造成整个实验中断的事故。而造成介质窗体的损坏有以下两个原因<sup>[1]</sup>: 一是介质窗片受到高能电子或离子的轰击引起二次电子倍增效应, 结果是在介质窗片表面出现强烈的辉光放电造成窗片的破损; 二是由于介质窗片吸收的微波能量过多, 导致其自身温升过高, 由热应力而导致窗体损坏。对于将要投入使用的 3.7GHz 低杂波传输系统来说<sup>[2]</sup>, 其传输的峰值功率不是很高而平均功率有 375kW, 防止热应力对窗体的破坏作用是最关键的问题。

### 2 理论分析

传输线上陶瓷窗的形式是多种多样的, 目前比较普遍的是盒形窗、陶瓷阶梯窗、同轴窗和矩形窗。盒形窗功率容量大, 频带宽, 结构简单, 在工艺上也比较成熟。陶瓷阶梯窗适用于工作波长短的传输

系统。同轴窗适用于工作波长长的传输系统, 其频带宽, 工艺简单, 但承受的功率容量不如盒形窗大。矩形窗由于其结构不对称, 容易导致其封接应力不均匀而损坏。综合以上分析, 最终选择盒形窗作为新传输系统的陶瓷窗。其结构是将一个圆盘形介质片密封在截面相同的圆波导中, 两端通过转换和矩形波导相连。这种窗承受的功率容量大, 频带相对较宽, 结构简单, 工艺比较成熟, 且由于陶瓷片是密封在圆波导中的, 因此封接时应力较均匀, 窗片所承受的最大电场强度也减小了。

陶瓷窗介质材料对陶瓷窗性能和可靠性影响较大, 对微波功率的有效传输具有重要意义。陶瓷窗介质材料通常要具有: 低的损耗角正切值, 低的二次电子发射系数, 低的介电常数, 高的介电强度, 高的热传导系数, 高的机械强度, 与封接材料相近的热膨胀系数, 真空出气率低和易于金属化等特性。

采用 BeO 陶瓷作为介质片, 相对于常用的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷, 最突出的优点是有很高的热传导率, 这一点在传输高平均功率微波能量时显得尤为重要。由于有很高的热导率, 可以很快的将沉积在陶瓷片上的热量传导到介质片的边沿上, 继而再由环绕在其周围的冷却水将热量带走, 从而避免陶瓷片上的温升过高, 保证由此产生的热应力处在陶瓷片的承受范围以内, 因而能够显著提高通波能力。

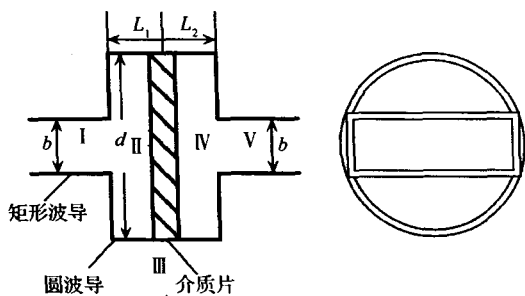


图 1 盒形窗示意图

图 1 为典型盒形窗示意图。圆柱盒的直径  $d$  为 80mm, 长度  $L_1+L_2=32.78\text{mm}$ , 中介质片厚度为 3.82mm, 介质材料是 BeO 陶瓷, 相对介电常数为 6.8, 损耗角正切为 0.0002, 热传导率为  $270\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。对于传输  $\text{TE}_{11}$  圆波导模的陶瓷窗, 最大的电场强度在圆盘表面的中心, 该点的高频场强为:

$$E_0 = \frac{15.8}{d} \sqrt{P_T \frac{\lambda_{g0}}{\lambda}} \quad (1)$$

式中,  $d$  为圆波导直径,  $P_T$  为通过窗表面的总功率流,  $\lambda_{g0}$  为圆波导波长,  $\lambda$  为自由空间波长。对所设计的陶瓷窗计算, 其中心处最大电场强度为  $1.36\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 在理想的条件下, 击穿强度大约是  $25\text{kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 虽然介质片表面状况不是理想的, 但是其最大电场强度还是远小于于击穿强度, 因此不会有击穿的危险。

设计时充分考虑到窗片的尺寸对传输的影响, 窗片的尺寸包括窗的直径和厚度。如果直径过大,

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & c \end{pmatrix}_I \begin{pmatrix} a & b \\ c & c \end{pmatrix}_{II} \begin{pmatrix} a & b \\ c & c \end{pmatrix}_{III} \begin{pmatrix} a & b \\ c & c \end{pmatrix}_{IV} \begin{pmatrix} a & b \\ c & c \end{pmatrix}_V \quad (3)$$

式(3)中,  $A$ 、 $D$  为无量纲量,  $B$  有阻抗量纲,  $C$  有导纳量纲。

对于采用的两边对称型盒形窗, 有:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{g} & 0 \\ jB\sqrt{g} & 1/\sqrt{g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma L & j \sin \gamma L \\ j \sin \gamma L & \cos \gamma L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ jB_c & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \gamma L & j \sin \gamma L \\ j \sin \gamma L & \cos \gamma L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{g} & 0 \\ jB\sqrt{g} & 1/\sqrt{g} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中,  $g$  为圆波导的特性阻抗和两端矩形波导的特性阻抗之比,  $B_c$  为介质片引入的容性电纳,  $B$  为矩形波导与圆波导连接时不连续处所引入的电纳,  $\gamma$  为圆波导中波的传播常数,  $\gamma = 2\pi/\lambda_g^0$ ,  $\lambda_g^0$  为圆波导波长。

则圆波导的直径也相应变大, 高次模不容易截止; 窗的直径过小, 对传输高功率不利, 同时矩形波导与圆波导的连接也不易做到宽带匹配, 一般取圆波导的直径等于矩形波导横截面的对角线:  $D = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。其中,  $D$  为圆波导直径;  $a$ 、 $b$  分别为矩形波导宽边和窄边的尺寸。窗片的尺寸选得是否合适, 可以从窗所能承受的功率容量和当窗片中心处于最大电场强度时有无击穿危险这两方面来考虑。

整个陶瓷窗及波导转换可分为: 矩形波导与圆波导的转换部分 I、V, 圆波导传输线 II、IV, 介质窗片 III 等几个部分。图 2 是图 1 的等效电路示意图。

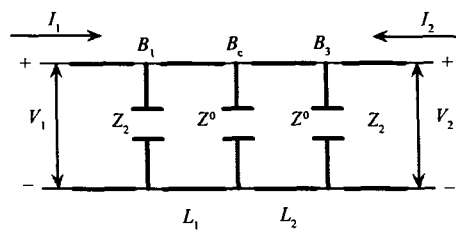


图 2 盒形窗等效电路示意图

把整个盒形窗看成一个无耗二端网络, 用输出端的电压和电流的负值表示出入口的电压和电流, 其输入和输出的关系可表示为<sup>[3]</sup>:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,

设窗的入射功率与通过功率分别为  $P_1$  和  $P_2$ , 则二者之比为:

$$\left| \frac{P_1}{P_2} \right| = 1 + \frac{1}{4}(A-D)^2 + \frac{1}{4}(B-C)^2 \quad (5)$$

我们要求通过窗的功率尽量大, 即  $P_1 \rightarrow P_2$ 。由

窗的等效二端网络对称性, 得  $A=D$ 。由  $P_1=P_2 \Rightarrow B=C$ , 由式(4)得:

$$\tan \gamma L = X/Y \pm \sqrt{X^2/Y^2 - Z/Y} \quad (6)$$

其中,

$$X = g - 1/g + BB_c + B^2 g \quad (7)$$

$$Y = gB_c + B^2 B_c g - 2B \quad (8)$$

$$Z = 2B + B_c/g \quad (9)$$

要使  $L$  有解, 必须使  $X^2/Y^2 - Z/Y > 0$ 。

我们把矩形波导与圆波导相连的情况等效为两矩形波导仅在  $E$  平面内截面变化, 因为圆波导的直径被选为等于矩形波导的对角线。由于波导由方变圆而造成的宽边尺寸变化所引入的感性电抗远比窄边尺寸变化引入的容性电抗要小, 故突变点电抗部分是容性的, 归一化电纳  $B$  为:

$$B = \frac{b}{\lambda g} \left[ 2 \ln \frac{d^2 - b^2}{4bd} + \left( \frac{b}{d} + \frac{d}{b} \right) \ln \frac{d+b}{d-b} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(n\varphi)}{n^3 \varphi^2} \delta_{2n} \right] \quad (10)$$

其中,

$$\delta_{2n} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{kd}{2n\pi} \right)^2}} - 1 \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{\pi b}{d} \quad (12)$$

由 BJ-32 波导的宽边  $a=72.14\text{mm}$  和窄边尺寸  $b=34.04\text{mm}$ , 可求得  $g$  为 2.179, 再把陶瓷窗参数和波导参数带入式(2)~(10), 分别求得  $B$  为 0.641,  $B_c$  为 2.134。代入得  $X^2/Y^2 - Z/Y = 0.141$ , 由式(6)得,  $L=13.61\text{mm}$ 。

### 3 电磁特性仿真

利用高频电磁场仿真软件 CST 建立陶瓷窗模型如图 3 所示, 经过仿真和优化, 最终确定陶瓷窗的圆柱段(包括圆波导和圆形介质窗体)长度为 32.78mm, 其中圆形介质窗体的厚度为 3.82mm。图 4、图 5 为  $S$  参数和驻波比仿真图, 仿真结果显示: 在 3.70GHz 处  $S_{11}$  达到最小, 约为 -70dB; 在中心频率点附近有超过 300MHz 的带宽, 其驻波比小于 1.1, 陶瓷窗的带宽已经能够满足使用要求。

由以上理论计算和仿真可见, 通过公式所得的

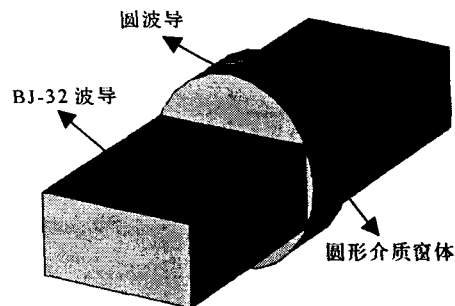


图 3 陶瓷窗结构示意图

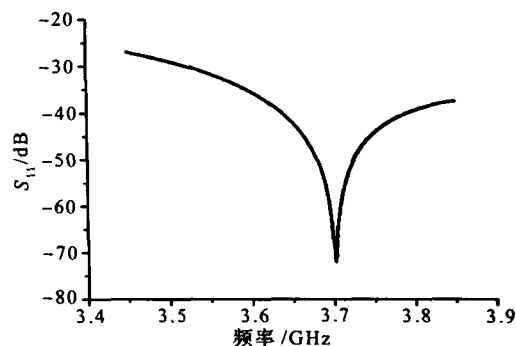


图 4  $S_{11}$  参数与频率关系曲线

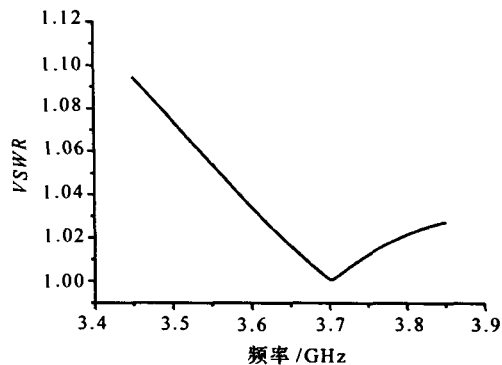


图 5 VSWR 与频率关系曲线

圆波导长度与软件仿真结果之间有 17% 左右的误差, 造成这一误差的原因是多方面的, 主要是对波导内的一些不连续性进行了等效处理。特别是在矩-圆过渡引入的电纳  $B$  的计算过程中, 将矩-圆过渡等效为矩形波导在  $E$  面的变化带来的一定误差;

其次,软件本身有限的仿真时间造成的数字截断误差,以及有限的网格分辨率造成的误差。

#### 4 热应力仿真

窗上的应力有机械应力和热应力两种,由于封接不合理或窗和外部波导系统连接时配合不好而产生的机械应力,可以通过合理的封接和小心的连接来避免。对于传输高平均功率的陶瓷窗来说,主要的问题是热应力,当窗中心到边缘的温度梯度造成的张应力超过介质的机械强度时,陶瓷窗片就会开裂。窗体上产生的热除了由介质损耗产生的外,另一个主要因素就是二次电子倍增效应,为了降低后者的不利影响,采用在窗片表面镀上一层低二次发射系数的物质,选用的是 TiN 薄膜,它能够显著减弱二次电子倍增效应,在现有的 2.45GHz 传输线系统上起着很好的作用。窗片吸热是因为窗片材料有一定的损耗角,或者说其介电常数的虚部不为零引起的,因此选择低吸热材料能降低由介质损耗产生的热应力,此外热应力与频率和输出功率成正比,并与工作模式、窗片厚度、窗片半径和材料的介电常数实部有关。图 6 为陶瓷片上热产生速度沿半径  $r$  方向的相对分布图。

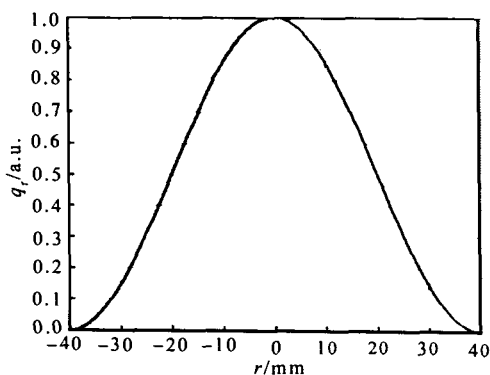


图 6 陶瓷片上热产生速度沿半径  $r$  方向的相对强弱分布

介质吸收微波产生的热可由公式  $P = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r''E^2f$  计算<sup>[4]</sup>。在这里假设从传输线上馈入陶瓷窗的功率约为 375kW,对陶瓷窗上沉积的微波功率进行积分  $P = \frac{1}{2}f\epsilon_0\epsilon_r''\iiint |E|^2 r dr d\phi dz = 49.6W$ 。即当传输 375kW 的微波功率时,在陶瓷窗上沉积的功率约有 50W。使用有限元分析软件

ANSYS 分析陶瓷片上的温度分布和应力分布,同时考虑到冷却水对陶瓷片的冷却作用,经过计算后从图 7、图 8 可以看出陶瓷片上温度最高的区域在其中心,它与边缘的温差只有 11.7°C,这么小的温差主要归功于 BeO 材料的高热导率,其应力最大值为  $9.3 \times 10^6$  Pa,远小于厂家规定的最大承受应力,因此其在通过满功率微波能量时,不会因热应力过大而损坏。

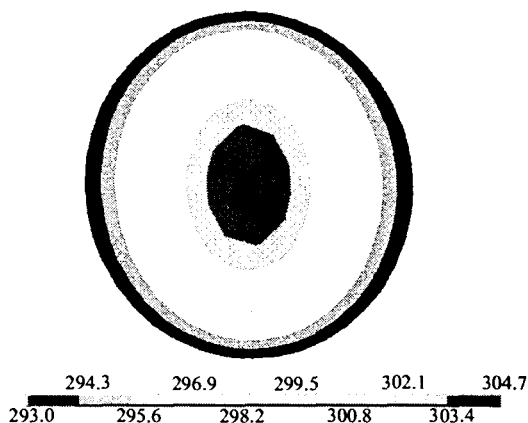


图 7 陶瓷片上的温度分布

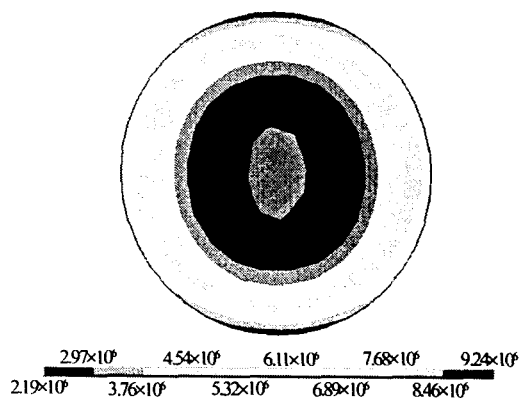


图 8 陶瓷片上的热应力分布

#### 5 结论

对新陶瓷窗的理论分析和软件仿真都已经完成,所得驻波比在超过 300MHz 带宽内小于 1.1;在高平均功率通过时,由于微波功率的沉积而造成的热应力也在安全范围内,满足新传输线系统的要求。下一步将进入工程制造阶段,等到窗体装配完

成后,将在新的 3.7GHz 测试台上进行测试。

#### 参考文献:

- [1] Robert J Barker, Edl Schamiloglu. 高功率微波源与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] Guangli Kuang, Jiafang Shan. Lower hybrid current drive (LHCD) system [R]. IPP, CAS, 1997.
- [3] 大功率速调管设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979. 9.
- [4] Raymond G J, Bray T. Application of commercial microwave ovens to organic synthesis [J]. Tetrahedron Lett., 1986, 27:4945.

## Design of a new ceramic window in 3.7GHz LHCD transmission system

LIU Liang, SHAN Jia-fang, LIU Fu-kun, KUANG Guang-li

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** According to the theory of ceramic window design, using electromagnetic field simulator, CST, and finite element method analysis software, ANSYS, the electromagnetic and thermal performances of LHCD new ceramic window have been calculated and simulated. BeO is used as windows body material for its high conductivity. Within the bandwidth of more than 300MHz, the stationary wave ratio is below 1.1, and the maximum temperature rising is 11.7°C on the center of the ceramic window.

**Key words:** LHCD; Ceramic window; Thermal stress