

迴旋管用蓝宝石窗*

师 绍 明

(中国科学院电子学研究所)

随着迴旋管研制工作的进展,目前在毫米波和亚毫米波段迴旋管输出功率要比普通微波管高1—2个数量级.因此迴旋管对其输出窗提出了更高的要求,即:(1)具有较宽的带宽,以减小对不同模式波的反射,(2)具有高的功率容量,使高频损耗、电子轰击、二次电子倍增效应等都不致导致损坏.蓝宝石作输出窗,其性能远好于氧化铝和氧化铍^[1-3].按文献[4]的公式我们作过粗略计算,在窗结构、工作频率、匹配状态等都相同的情况下,用蓝宝石代替94% Al_2O_3 瓷作输出窗,功率容量可以提高10倍.

下面介绍迴旋管振荡器输出窗的设计和实验结果.设计指标为:(1)工作频率为8mm波段,(2)工作模式为 H_{01} 或 H_{02} , (3)承受的脉冲功率为30—50kW.设计要求为,在所设计的波段具有:(1)较宽的带宽;(2)足够大的功率容量;(3)较高的模式纯度和较低的插入损耗.

本设计汲取了方-圆-方盒型窗功率容量较大、带宽较宽的优点,并结合迴旋管圆波导输出的特点,我们将蓝宝石片封接在直径较大的一段波导 I 中,然后在两端对称地连接上直径较小的波导 II、III,组成圆对圆盒型窗,结构如图1所示.

圆对圆盒型窗与方-圆-方盒型窗相比有以下一些差别.首先是圆对圆盒型窗的工作模式不是圆波导的最低模式 H_{11} 模,而是 H_{01} 或 H_{02} 模,所以它一般具有多模传输的特点.其次是圆对圆盒型窗的等效电路不是一个简单的四端网络,而是一个多模网络.在分析方法上,它不能用简单的阻抗匹配概念来分析,而要用模式匹配的概念来分析.另外由于波导的不连续性沿 φ 方向是均匀的,而入射波又是 $\text{H}_{0n}(n=1, 2, \dots)$ 型波,所以在不连续平面上只激起沿 φ 方向的电流,仅产生 H_{0m} 型波 ($m=1, 2, \dots$).此时窗平面与电力线平行,波导壁上无纵向电流.因此,在相似的几何尺寸下,圆对圆盒型窗的功率容量要比方-圆-方盒型窗大.

设 a, b, l 为输出窗的几何尺寸, δ 为窗片厚度(图1),合理地选择这些尺寸就可以满足上述对输出窗设计的三条要求.

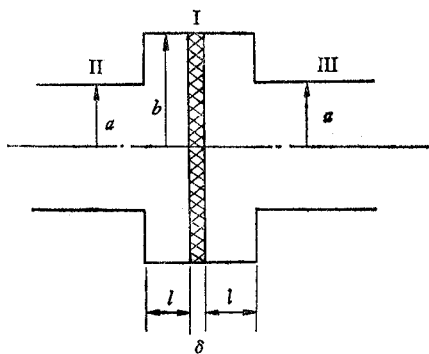


图1 圆对圆盒型窗结构

Fig. 1 The structure of a circular-circular pillbox type sapphire window

* 1981年5月19日收到,
1982年6月18日修改定稿.

1. H_{01} 模输出窗的设计 假定腔的谐振频率为 $f_0 = 35\text{GHz}$, 即 $\lambda_0 = 8.57\text{mm}$

(1) 窗尺寸 a 的选取 传输 H_{01} 模、截止 H_{02} 模的条件为 $0.9a < \lambda_0 < 1.64a$ ^[5]. 考虑到传输波导要有较大的功率容量, 并能在整个 8mm 波段工作, 所以取 $a = 8.6\text{mm}$, 则 $\lambda_0/a = 0.99$.

(2) 窗尺寸 b 的选择 为了选取 b , 我们先看表 1^[6]. 该表列出的是当 $\lambda_0/a = 0.99$ 时, H_{01} 模从波导 II 入射到波导 I 的反射系数 S_{11} ; 透射系数 S_{12} ; H_{01} 模从波导 II 入射到波导 I, 在波导 I 中激励起 H_{02} 模的波型变换系数 S_{13} ; H_{01} 模从波导 I 入射到波导 II 的反射系数 S_{22} ; H_{01} 模从波导 I 入射到波导 II 时在波导 I 中激励起 H_{02} 模的波型变换系数 S_{23} ; H_{02} 模从波导 I 入射到波导 II 的反射系数 S_{33} .

从表 1 可见, 如要 H_{01} 模顺利通过输出窗, 引起较小的反射和模式变换, 则需 S_{11} 、 S_{13} 、 S_{22} 、 S_{23} 较小, 而 S_{12} 、 S_{33} 较大.

表 1

Tab. 1

| a/b | S_{11} | S_{12} | S_{13} | S_{22} | S_{23} | S_{33} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.75 | 0.008 | 0.8875 | 0.46 | 0.21 | 0.41 | 0.76 |
| 0.80 | 0.01 | 0.933 | 0.36 | 0.15 | 0.34 | 0.87 |
| 0.85 | 0.015 | 0.966 | 0.26 | 0.008 | 0.24 | 0.98 |
| 0.90 | 很小 | ~1 | 较小 | 很小 | 较小 | ~1 |
| 0.95 | 很小 | ~1 | 较小 | 很小 | 较小 | ~1 |

从模式纯度和插入损耗的角度看, a/b 接近于 1 有利. 但 a/b 接近于 1 时, 带宽不易做宽. 在 a 确定后, a/b 稍小于 1 时, 对提高窗的功率容量和带宽有利. 再考虑到 H_{01} 模能传输而 H_{02} 模被截止时 a 较小, 所以为了适当提高窗功率容量、增加带宽, 我们取: $a/b = 0.75$, 则 $b = 11.5\text{mm}$.

如果要提高窗的模式纯度和降低插入损耗则 a/b 值要适当增大.

(3) 蓝宝石窗片尺寸的选取 窗片半径为 b 已定. 厚度 δ 取接近半波长, 这样引起的电压反射系数最小. 同时也考虑了窗片太薄封接会有困难.

根据文献[5]给出的有关公式

$$\lambda_B = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{KP}}\right)^2}},$$

计算得 $\lambda_B = 2.9\text{mm}$ (这里 λ_B 为介质波长, λ_0 为自由空间波长, λ_{KP} 为临界波长, 对 H_{01} 模 $\lambda_{KP} = 1.64a$, $\varepsilon = 8.6$ 为蓝宝石的介电常数). 据此, 取 $\delta = 1.5\text{mm}$.

(4) 窗尺寸 l 的确定 在 a , b , δ 确定后, 由冷测实验确定 l , 本设计得到 $l = 4.4\text{mm}$.

在上面设计的 H_{01} 模盒型窗中, 波导 II III 中只有 H_{01} 模传输; 波导 I 中只激励起 H_{02} 模; 蓝宝石片可看成是一段特性导纳较大的传输线, 它虽然会引起波的反射, 但不会激起高次模. 这种窗结构的理论分析和计算见文献[6].

图 2 是 H_{01} 模输出窗的冷测方框图. 图 3 是 H_{01} 模蓝宝石窗的驻波特性曲线.

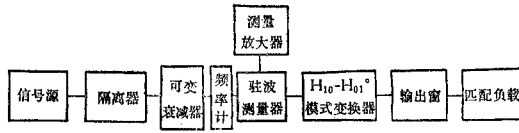


图 2 H_{01} 模输出窗冷测方框图

Fig.2 The block diagram for testing the performance the H_{01} mode sapphire window

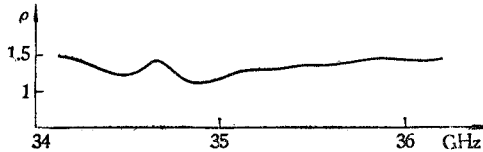
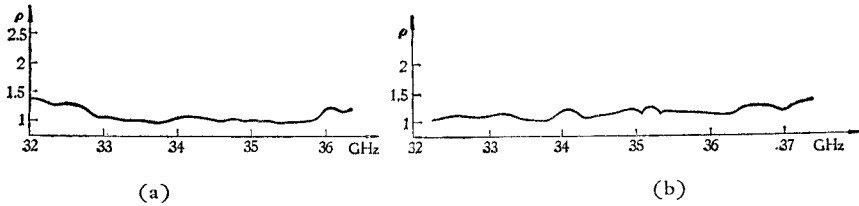


图 3 H_{01} 模蓝宝石窗的驻波特性

Fig. 3 VSWR of the H_{01} mode sapphire window

2. H_{02} 模输出窗的设计 H_{02} 模输出窗在传输波导 II、III 中同时存在 H_{01} 和 H_{02} 模，所以情况较 H_{01} 模输出窗复杂。设计时更须注意模式变换引起的损耗和输出的模式纯度。为此，我们注意选取 a, b 的大小，使 H_{03} 模在波导 I、II、III 中都截止。并选取 a/b 较接近于 1，以降低插入损耗。其他设计与 H_{01} 模输出窗同。图 4(a), (b) 为两个尺寸不同的 H_{02} 模蓝宝石窗的驻波特性曲线。



$b = 11.5\text{mm}, a/b = 0.975, \delta = 1.41\text{mm}, l = 4.49\text{mm}, b = 12.5\text{mm}, a/b = 0.88, \delta = 1.42\text{mm}, l = 4.1\text{mm}$

图 4 H_{02} 模蓝宝石输出窗的驻波特性

Fig. 4 VSWR of the H_{02} mode sapphire window

可见，以上两个 H_{02} 模蓝宝石输出窗的带宽较宽，输出的模式纯度较高，冷测所得的

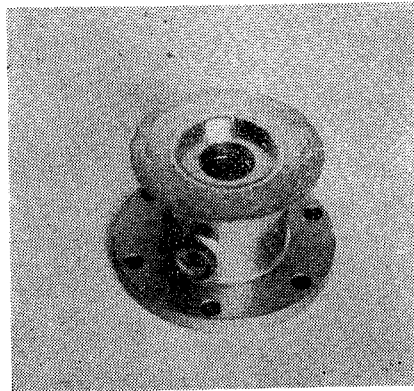


图 5 迴旋管用蓝宝石窗实物照片

Fig. 5 A sapphire window for gyrotron

插入损耗较小.

3. 初步实验结果 图 4 (a), (b) 所示特性的蓝宝石输出窗已成功用于 8mm 波段 H_{02} 模工作的迴旋管振荡器中, 承受了 75kW 的脉冲输出功率. 实验结果表明真空密封和耐热冲击性能良好. 带宽特性也良好; 在远离设计频率 20 GHz 时, 输出数十瓦的脉冲功率, 输出窗也能正常工作. 图 5 是蓝宝石输出窗实物照片.

本项工作得到郭和忠, 张世昌同志的指导, 芦玉华, 李金鳌, 陆鑫宝, 秦文珍, 金如良同志的帮助, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- [1] AD 024907, 1976.
- [2] Fred Rosebury, *Handbook of electron tube and vacuum techniques*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1965, p. 466.
- [3] 刘联宝主编, 电真空器件的钎焊与陶瓷金属封接, 国防工业出版社, 1978 年, 第 8—10 页.
- [4] 电子管手册编委会, 速调管设计手册, 国防工业出版社, 1979 年, 第 165 页.
- [5] 列别捷夫著, 刘盛纲译, 超高频技术和器件(上册), 上海科学技术出版社, 1961 年.
- [6] 朱敏, 吴鸿适, 电子科学, 1980 年, 第 1 期, 第 26 页.

THE SAPPHIRE WINDOW FOR GYROTRON

Shi Shao-ming

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

In this paper, a circular-circular pillbox type sapphire window used in circular waveguide transmitting system which consists of 8 mm band gyrotron oscillator is described.