

高功率回旋行波管新型宽带输出窗的设计

徐勇, 罗勇, 李宏福, 熊彩东, 王建勋

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:首先利用场匹配理论和传输级联矩阵建立多层介质窗的普遍分析方法,对回旋行波管输出窗进行解析分析,在理论分析和数值计算的基础上得到回旋行波管宽带输出窗的结构和尺寸;然后利用三维高频分析软件 HFSS 进行仿真和验证.通过热分析和优化设计,在 Ka 波段获得了平均功率容量达到 50 kW,反射系数小于 -20 dB 的带宽约为 3.6 GHz 的高性能新型宽带输出窗.冷测实验表明,冷测结果与数值计算结果较为吻合.

关键词:回旋行波管;输出窗;宽带;高功率毫米波

中图分类号:TN129、TN122 **文献标识码:**A

Design of a new type broad-band output window for high power gyro-TWT

XU Yong, LUO Yong, LI Hong-Fu, XIONG Cai-Dong, WANG Jian-Xun

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A sort of universal theoretical analysis method for multilayer dielectric window was presented by using the mode-matching technique to build scattering matrix. The analysis of output window for high power millimeter-wave gyro-TWT was prosecuted. Based on academic analysis and numerical calculations, the primitive structure and geometric parameters of the output window had been obtained. Afterward, HFSS code is used to simulate accurately and revise approximate analysis. Through a large number of thermodynamic analysis and optimization design, the wide-band output windows of Ka-band, with average power capability 50 kW and band width about 3.6 GHz when S_{11} parameters less than -20 dB, were attained. The cold test indicates that the results of design are in agreement with the results of cold test.

Key words: gyro-TWT; output window; wide-band; high power millimeter-wave

PACS: 84.47. + W, 84.40. Fe, 84.40. Az, 41.20. Jb

引言

回旋行波管在毫米波波段与普通行波管相比^[1],具有大功率的特点;与普通速调管、回旋速调管相比^[2-4],具有大功率、宽频带的特点.它在毫米波成像雷达、毫米波通信系统以及电子战等领域有着十分重要的应用前景,因此在国际、国内倍受重视^[5-6].输出窗是回旋行波管的关键部件之一.输出窗设计的好坏往往决定整管研制的成败.如果输出窗的反射过大,在高功率条件下返回到回旋行波管

高频系统的功率增加,过大的反射将会引起工作模式和寄生模式的振荡,从而导致整管注-波互作用效率降低和输出模式纯度变差,甚至使整管不能正常工作.此外,如果输出窗的功率容量设计不足,在传输高平均功率毫米波时,容易造成输出窗因温度过高,热应力过大而损坏^[7-8].因此,有必要对回旋行波管的输出窗进行研究,降低其反射,展宽其输出带宽,提高其功率容量,进而提高回旋行波管的性能.

由于回旋行波管输出窗的尺寸较大,单独利用三维高频分析软件 HFSS 进行仿真设计,将耗费大

收稿日期:2012-06-26,修回日期:2013-01-09

基金项目:国家自然科学基金(61101040)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61101040)

作者简介(Biography):徐勇(1977-),男,汉族,四川崇州人,讲师,博士,主要研究领域为高功率微波毫米波技术、高功率回旋管器件研究. E-mail: xuyong01@uestc.edu.cn

Received date: 2012-06-26, revised date: 2013-01-09

量的时间. 本文首先利用场匹配理论建立传输级联矩阵的方法对多层窗片结构输出窗进行解析分析计算, 几分钟就能完成一种结构尺寸的计算分析. 在完成输出窗的设计后, 再利用三维高频分析软件 HFSS 软件仿真和冷测实验验证, 大大缩短了输出窗的设计周期, 通过优化设计, 完成了一种双层窗片结构低反射宽带输出窗设计方案. 其次对输出窗进行了热分析研究, 给出了一种新型中间风冷的新型双层窗片结构输出窗设计方案, 该结构输出窗不仅能增加输出窗的输出带宽, 而且能够提高输出窗的功率容量.

1 理论分析

1.1 多层窗片结构输出窗的矩阵分析

波导中工作模式在输出窗外场的场分布及反射和透射系数可以用场匹配理论建立传输级联矩阵的办法来分析. 文献[9]对矩形多层窗片结构波导窗进行了理论分析与设计. 本章利用场匹配理论和传输级联矩阵的方法建立多层窗片结构输出窗的普遍理论. 该理论方法不仅可以用来研究矩形多层窗片结构波导窗, 而且可以用来研究多层窗片结构圆波导输出窗, 具有更广泛的适用性.

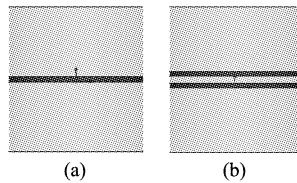


图1 输出窗2维模型 (a)单层, (b)双层

Fig. 1 2D model of the single disk (a) and double disk (b) output window

对 n 层窗片结构的输出窗, 有 $2n$ 个介质交界面. 对于第 p 个填充区域, 其磁导率和介电常数为 μ_p 和 ε_p . 图1为单层和双层窗片结构的输出窗2维模型.

假设入射波为 TE_{mn} 波, 输出窗的半径不变, 且窗片介质是均匀的. 对第 p 区的横向电场 $E_{mnp}(q_1, q_2, z)$ 和横向磁场 $H_{mnp}(q_1, q_2, z)$, q_1 和 q_2 为两个正交的横向坐标.

$$E_{mnp}(q_1, q_2, z) = (a_p e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z} + b_p e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z}) e_{mnp}^{(2)}(q_1, q_2), \quad (1)$$

$$H_{mnp}(q_1, q_2, z) = (a_p e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z} - b_p e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z}) Y_{mnp}^{(2)} \vec{t}_z \times e_{mnp}^{(2)}(q_1, q_2), \quad (2)$$

式中传播常数 $\beta_{mnp}^{(2)} = (\omega^2 \varepsilon_p \mu_p - k_{cmnp}^2)^{1/2}$, k_{cmnp} 为截止

波数, ω 为角频率.

对第 $p+1$ 区的横向电场 $E_{mn(p+1)}$ 和横向磁场 $H_{mn(p+1)}(q_1, q_2, z)$

$$E_{mn(p+1)}(q_1, q_2, z) = (a_{(p+1)} e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z} + b_{(p+1)} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z}) e_{mn(p+1)}^{(2)}(q_1, q_2), \quad (3)$$

$$H_{mn(p+1)}(q_1, q_2, z) = (a_{(p+1)} e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z} - b_{(p+1)} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z}) Y_{mn(p+1)}^{(2)} \vec{t}_z \times e_{mn(p+1)}^{(2)}(q_1, q_2). \quad (4)$$

在第 p 区与第 $p+1$ 区的界面上 ($z = z_p$), 无面电流的情况下, 电场和磁场的切线分量连续, 则有:

$$(a_p e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z_p} + b_p e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z_p}) e_{mnp}^{(2)}(q_1, q_2) = (a_{(p+1)} e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p} + b_{(p+1)} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p}) e_{mn(p+1)}^{(2)}(q_1, q_2), \quad (5)$$

$$(a_p e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z_p} - b_p e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z_p}) Y_{mnp}^{(2)} \vec{t}_z \times e_{mnp}^{(2)}(q_1, q_2) = (a_{(p+1)} e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p} - b_{(p+1)} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p}) Y_{mn(p+1)}^{(2)} \vec{t}_z \times e_{mn(p+1)}^{(2)}(q_1, q_2), \quad (6)$$

式中 $Y_{mnp}^{(2)} = \beta_{mnp}^{(2)} / \omega \mu_p$.

如果各区内填充的是均匀介质, 则有:

$$e_{mnp}^{(2)}(q_1, q_2) = e_{mn(p+1)}^{(2)}(q_1, q_2), \quad (7)$$

$$\text{这是因为: } e_{mnp}^{(2)} = \vec{t}_z \times \nabla_t \psi_{mnp}^{(2)}. \quad (8)$$

而 $\psi_{mnp}^{(2)}$ 满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla_t^2 \psi_{mnp}^{(2)} + k_{cmnp}^2 \psi_{mnp}^{(2)} = 0, \quad (9)$$

式中, $k_{cmnp}^2 = \omega^2 \varepsilon_p \mu_p = \beta_{mnp}^{(2)2}$, k_{cmnp} 决定于边界条件. 由于各区圆波导尺寸相同, 因此 k_{cmnp} 相同, 那么式(9)在各区的解是相同的. 因此, 各区的 $e_{mnp}^{(2)}$ 相同. 但 $\beta_{mnp}^{(2)}$ 不同, $\beta_{mnp}^{(2)} = (\omega^2 \varepsilon_p \mu_p - k_{cmnp}^2)^{1/2}$

由式(5)、(6)、(7)可得:

$$(a_{(p+1)} e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p} + b_{(p+1)} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p}) = (a_p e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z_p} + b_p e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z_p}), \quad (10)$$

$$(a_{(p+1)} e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p} - b_{(p+1)} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p}) Y_{mn(p+1)}^{(2)} = (a_p e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z_p} - b_p e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z_p}) Y_{mnp}^{(2)}. \quad (11)$$

式(10)、(11)可写成:

$$\begin{bmatrix} a_{p+1} \\ b_{p+1} \end{bmatrix} = M_p \begin{bmatrix} a_p \\ b_p \end{bmatrix}, \quad (12)$$

其中,

$$M_p = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p} & 0 \\ 0 & e^{-j\beta_{mn(p+1)}^{(2)} z_p} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\mu_p}{\mu_{p+1}} + \frac{\beta_{mnp}^{(2)}}{\beta_{mn(p+1)}^{(2)}} & \frac{\mu_p}{\mu_{p+1}} - \frac{\beta_{mnp}^{(2)}}{\beta_{mn(p+1)}^{(2)}} \\ \frac{\mu_p}{\mu_{p+1}} - \frac{\beta_{mnp}^{(2)}}{\beta_{mn(p+1)}^{(2)}} & \frac{\mu_p}{\mu_{p+1}} + \frac{\beta_{mnp}^{(2)}}{\beta_{mn(p+1)}^{(2)}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\beta_{mnp}^{(2)} z_p} & 0 \\ 0 & e^{j\beta_{mnp}^{(2)} z_p} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

由矩阵级联可得总的 n 层窗片的级联矩阵:

$$\begin{bmatrix} a_{2n+1} \\ b_{2n+1} \end{bmatrix} = M_{2n} M_{2n-1} \cdots M_1 \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

在式(14)中,若 $a_1 = 1, b_1 = r, a_{2n+1} = t, b_{2n+1} = 0$ 则可以得到 n 层窗片的幅值的传输和反射系数为:

$$t = \frac{M_{11} M_{22} - M_{12} M_{21}}{M_{22}} \quad (15)$$

$$r_w = \frac{M_{21}}{M_{22}} \quad (16)$$

功率反射系数和传输系数分别为:

$$R = |r_w|^2 = \left| \frac{M_{21}}{M_{22}} \right|^2 \quad (17)$$

$$T = 1 - R = 1 - \left| \frac{M_{21}}{M_{22}} \right|^2 \quad (18)$$

输出窗的 S 参数为:

$$S_{11} = 10 \log(R) \quad (19)$$

$$S_{21} = 10 \log(T) \quad (20)$$

$$\text{输出窗的驻波比为: } \rho = \frac{1 + |R|}{1 - |R|} \quad (21)$$

由式(15)~(21)可计算 n 层窗片结构的宽带输出窗的传输与反射特性.

1.2 输出窗的热分析

1.2.1 热传导方程

由于输出窗片具有损耗特性,当毫米波通过窗片时,窗片就会发热.窗片中的热量传导方式满足热传导方程.在柱坐标系下热传导方程可写为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{H}{k} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (22)$$

由于回旋行波管的输出窗为轴对称型,若场分布为轴对称,则温度分布也为轴对称,热传导方程简写为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \frac{H}{k} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (23)$$

式中: H 是输出窗中单位体积内热量产生速度, T 为温度, $\beta = k/\rho c$, k 是热传导系数, ρ 是质量密度, c 是比热.

$$H = \frac{1}{2} \omega \varepsilon'' \varepsilon_0 |E_w|^2 \quad (24)$$

式中, ω 为角频率, E_w 为介质窗片内某点的总电场, $\varepsilon'' = \varepsilon \tan \delta$ 是介质复介电常数的虚部, $\tan \delta$ 是介质损耗角正切.

1.2.2 边界条件

输出窗片与无氧铜圆波导焊接在一起,无氧铜

有很好的导热性能.假设输出窗片的边缘处的温度等于无氧铜波导壁的温度,则有

$$T(r, t) |_{r=a} = T_0 \quad (25)$$

这就是输出窗片温度的边界条件.

假设输出窗片的初始温度为 T_1 ,则有

$$T(r, t) |_{t=0} = T_1 \quad (26)$$

这就是输出窗片温度的初始条件.

在输出窗和真空交界面以辐射方式传热

$$Q = \tilde{\sigma} \varepsilon (T^4 - T_w^4) \quad (27)$$

式中, $\tilde{\sigma}$ 是玻尔兹曼常数, $\tilde{\sigma} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, ε 是黑体灰度, T_w 为输出窗外部环境温度.

在输出窗和大气的交界面上,除了辐射传热方式外,还以对流的方式对外散发热量.

$$Q = h(T - T_f) \quad (28)$$

h 是换热系数($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$), T_f 为输出窗真空侧环境温度.

2 数值计算与仿真

在理论分析的基础上,编制了多层窗片结构输出窗的参数设计与热分析计算程序,对双窗片输出窗进行了数值计算与仿真.设计参数见表1.

表1 Ka波段双层窗片结构输出窗的设计参数

Table 1 The design parameters for Ka-band double disks output window

波段	介质材料	介电常数	窗片厚度/ mm	窗片半径/ mm	窗片之间 距离/mm
Ka	蓝宝石	9.2	1.46	16.00	2.10

图2为 TE_{01} 模双层窗片结构输出窗的场分布,由图可见该输出窗的模式纯度较高,输入输出场强基本一致.

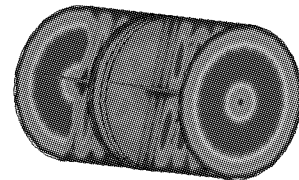


图2 双窗片输出窗的场分布

Fig. 2 The distribution of field in the double disk output window

图3为双层窗片结构输出窗 HFSS 仿真计算和理论计算的 S_{21} 参数,图4为双层窗片结构输出窗 HFSS 仿真计算和理论计算的 S_{11} 参数.由图3和图4可以看出双层窗片结构输出窗能在低反射的情况下

有效地展宽输出带宽. 一般情况下, 单窗片结构输出窗的 S_{21} 参数大于 -0.1 dB 的带宽小于 2 GHz, 而双层窗片结构输出窗的 S_{21} 参数大于 -0.1 dB 的带宽大于 4 GHz. 由图 2 和图 3 看出理论计算结果与 HFSS 仿真结果吻合得较好.

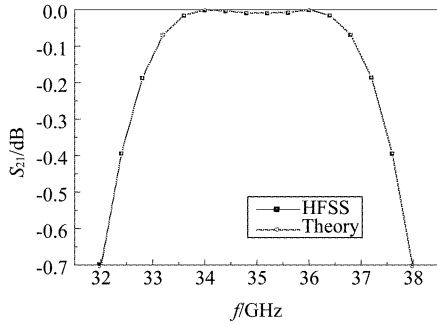


图 3 双窗片输出窗仿真和理论计算所得的 S_{21} 参数
Fig. 3 S_{21} parameters attained by HFSS and theory for the double disk output window

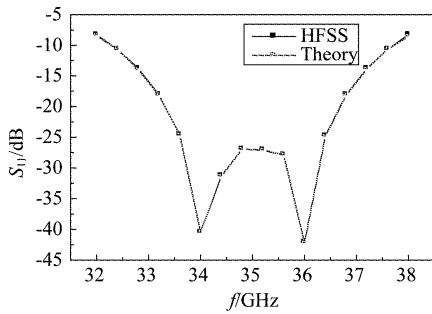


图 4 双窗片输出窗仿真和理论计算所得的 S_{11} 参数
Fig. 4 S_{11} parameters attained by HFSS and theory for the double disk output window

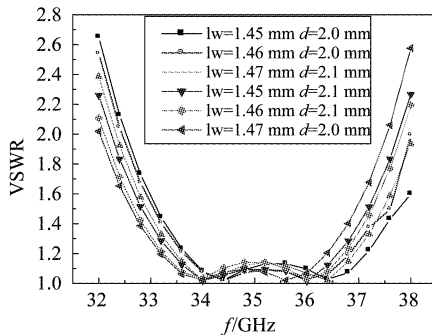


图 5 双窗片输出窗几何尺寸变化时理论计算的驻波比
Fig. 5 The SWR attained by theory for the double disk output window with geometry dimension transformation

图 5 为双层窗片结构输出窗几种尺寸条件下驻波比的变化. 由图可知, 当输出窗片厚度在设计值

1.46 mm 附近变化 ± 0.01 mm, 窗片间距在设计值 2.1 mm 附近变化 ± 0.1 mm 时, 输出窗的输出带宽变化不大. 制造输出窗时, 窗片厚度公差控制在 ± 0.01 mm; 窗片间距公差控制在 ± 0.02 mm, 远远小于 0.1 mm. 可见, 制作输出窗时, 只要输出窗的几何尺寸参数控制在公差之内, 输出窗的性能就不会有大的变化.

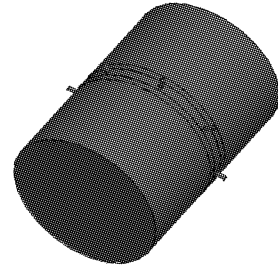


图 6 新型中间冷却双窗片输出窗的 3D 模型
Fig. 6 The 3D model of the new type double disk output window with wind cooling

图 6 为新型中间冷却双层窗片结构 TE_{01} 模蓝宝石输出窗的 HFSS 仿真 3D 模型. 通过在两个窗片之间的波导壁上开多个小孔, 通过小孔加注干燥四氟化硫等低电磁损耗的消弧气体或低电磁损耗冷却油对输出窗进行冷却.

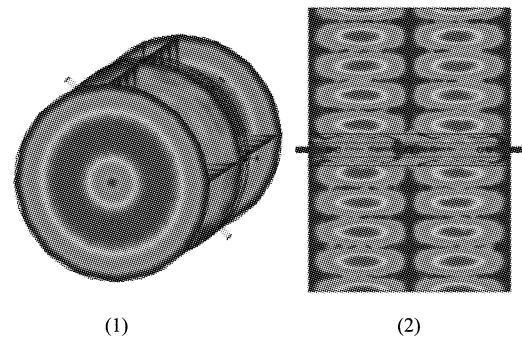


图 7 仿真所得新型中间冷却输出窗的场分布
Fig. 7 The distribution of field in the new type double disk output window with wind cooling

图 7 为 HFSS 仿真所得新型中间风冷双层窗片结构 TE_{01} 模蓝宝石输出窗的场分布, 小孔半径为 0.5 mm. 图 8 为 HFSS 仿真所得 Ka 波段 TE_{01} 模新型中间风冷结构与一般结构双窗片蓝宝石输出窗的反射参数. 由图 7 可知, 输出窗的输出模式纯度较高, 没有产生大的模式变形, 冷却小孔内也未见较高的场强. 由图 8 可知, 新型中间风冷双层窗片结构输出窗的传输特性与一般双层窗片结构输出窗的反射特

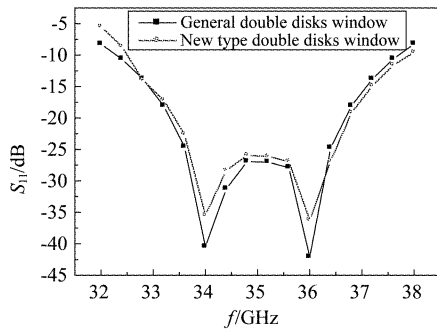


图8 新型风冷与一般结构双窗片输出窗的 S_{11} 参数
Fig.8 S_{11} parameters for the new type window with wind cooling and the commonly double disk window

性相比没有大的变化,只是上升了 2 dB,这是由通风孔所引起的.其 S_{11} 参数小于 -20 dB 的带宽约为 3.6 GHz,其反射特性远好于单窗片结构蓝宝石输出窗.

图9为 ANSYS 仿真与理论计算所得中间风冷新型双层窗片结构 TE_{01} 模蓝宝石输出窗温度分布曲线的比较图.计算和仿真时,除了考虑窗片径向的热传导外,对输出窗的输入端(向真空高频端)和输出端(向水负载端)同单窗片结构输出窗类似,只考虑轴向的热辐射,对两窗片之间的部分,由于采用风冷的措施,则考虑空气自然对流散热,对流换热系数 $h = 15(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K})$.由图9可知,ANSYS 仿真与理论计算所得温度分布基本一致,窗片中心的温度 70.5°C 左右,边沿的温度为 36°C .

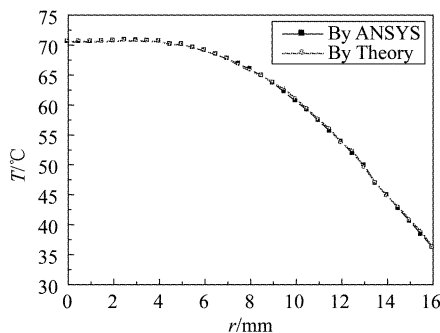


图9 仿真与理论计算所得新型中间风冷双窗片输出窗温度分布的比较
Fig.9 The distribution of temperature attained by ANSYS and theory for the new type window with wind cooling

图10为 ANSYS 仿真所得 TE_{01} 模单窗片结构以及一般双窗片结构蓝宝石输出窗与中间风冷新型双层窗片结构蓝宝石输出窗温度分布曲线的比较,由图可知,单窗片与一般双窗片结构蓝宝石输出窗在

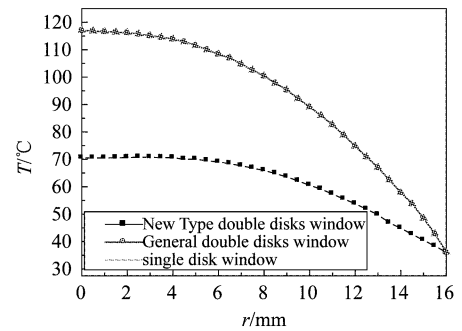


图10 单窗片以及一般双窗片结构输出窗与新型中间风冷双窗片输出窗温度分布的比较
Fig.10 The distribution of temperature attained by theory for the single disk, commonly double disk window and the new type output window with wind cooling

稳态下的温度分布相差不大.对于新型中间风冷双层窗片结构输出窗,它在稳态下的温度分布也呈准抛物线分布,窗片中心温度最高为 70.5°C .窗片中心到窗片边沿的温度差为 34°C 左右.与单窗片结构以及一般双窗片结构蓝宝石输出窗在稳态下的温度分布相比,窗片中心到窗片边缘的温度差大大降低,相应的窗片中心到窗片边缘的温度梯度减小,进而热应力大大减小,大幅度提高了输出窗的功率容量.经文献[10]研究蓝宝石窗片中心点与边沿的温差的最大容限约为 107°C .作保守设计,假设蓝宝石窗片中心点与边沿的温差的最大容限为 50°C ,新型中间风冷双层窗片结构蓝宝石输出窗也可以传输 50 kW 的平均功率.

3 冷测实验研究

根据以上优化设计的结果,加工、焊接了一个新型中间风冷双窗片输出窗,该窗已成功应用到我们研制的回旋行波管的样管中,图11为新型中间风冷双窗片输出窗的实物照片.同时,对其进行了冷测实验,输出窗的冷测实验原理见图12.图13为冷测实验所得 S_{11} 参数.可见 S_{11} 参数小于 -20 dB 的输出带宽大于 3.3 GHz,相对带宽大于 9%,比单窗片结构输出窗的带宽有大幅度提高,单窗片结构输出窗的 S_{11} 参数小于 -20 dB 的输出带宽一般为 3% 左右.由图8和图13比较可知仿真计算结果与冷测结果较吻合.

4 结论

通过理论分析、数值计算和仿真实验,给出了 Ka 波段双层窗片结构输出窗的设计方案.在 Ka 波段设计出 S_{21} 参数大于 -0.1 dB 的带宽大于 4 GHz, S_{11}

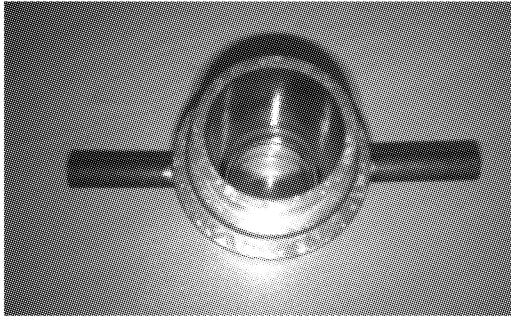


图 11 新型中间风冷双窗片输出窗的实物照片
Fig. 11 The photograph of output window with wind cooling

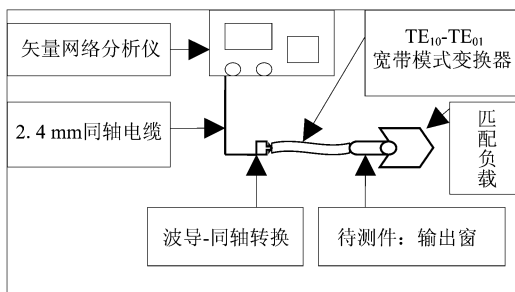


图 12 冷测实验原理图
Fig. 12 The principle of cold test

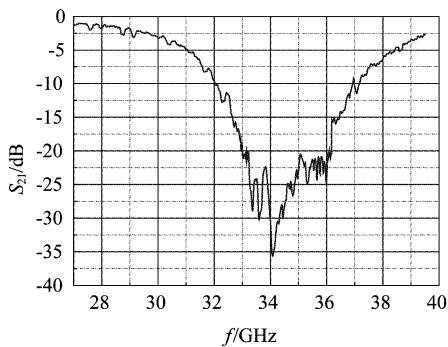


图 13 冷测实验所得 S_{11} 参数
Fig. 13 S_{11} parameters attained by cold test

参数小于 -20 dB 的输出带宽大于 3.6 GHz, 相对带宽大于 9% 的高性能双层窗片结构输出窗; 同时研究了输出窗尺寸参数小范围变化对输出窗传输特性的影响; 其次, 对输出窗进行了热分析研究, 给出了一种新型中间风冷的双层窗片结构输出窗设计方

案, 该结构输出窗不仅能提高输出窗传输特性, 而且能够有效提高输出窗的功率容量; 最后加工了新型中间风冷的双层窗片结构输出窗的样品, 并对其进行了冷测实验, 理论计算结果与实验结果吻合较好。以上的计算分析与仿真为回旋行波管输出窗的设计提供了理论和技术支撑。

REFERENCES

- [1] LU Zhi-Gang, GONG Yu-Bin, WEI Yan-Yu, *et al.* Linear theory of beam-wave interaction in arbitrary groove rectangular waveguide grating traveling wave tube [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (路志刚, 宫玉彬, 魏彦玉等. 任意槽矩形波导栅行波管注-波互作用线性理论研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(5): 370 - 373.
- [2] WANG Shu-Zhong, MA Jing, WANG Yong, *et al.* Design on Ka-band filter loaded three-gap coupled output cavities [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王树忠, 马菁, 王勇, 等. Ka 波段滤波器加载三间隙耦合输出腔的设计. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(2): 105 - 131.
- [3] WANG Jian-Xun, LUO Yong, XU Yong, *et al.* Study on high frequency circuit of a high-power Ka-band gyrokystron [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王建勋, 罗勇, 徐勇, 等. Ka 波段高功率基波回旋速调管高频系统研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(4): 290 - 294.
- [4] XUYong, LUO Yong, XIONG Cai-Dong, *et al.* Design and experiment of a Ka-band TE₀₁ mode fundamental wave gyrokystron amplifier [J]. *Acta Physica Sinica* (徐勇, 罗勇, 熊彩东, 等. Ka 波段 TE₀₁ 模基波回旋速调放大器的设计与实验. *物理学报*), 2011, **60**(4): 048403-1-048403-8.
- [5] DU Chao-Hai¹, LIU Pu-Kun¹, XUE Qian-Zhong, *et al.* Modal Mapping Between Periodic Lossy Dielectric-loaded Waveguide and Uniform Circular Waveguide [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (贾云峰, 来国军, 刘濮鲲, 等. 周期损耗介质加载波导与均匀圆波导间的模式映射 [J]. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(4): 273 - 277.
- [6] Garven M, Calame J P, Danly B G, *et al.* A gyrotron traveling wave tube amplifier experiment with a ceramic loaded interaction region [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, **30**(3): 885 - 893.
- [7] Roland H, Gunter D, Andreas M, *et al.* CVD diamond windows studied with low and high-power millimeter waves [J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2002, **30**(3): 800 - 807.
- [8] Marc E H, Richard S C, David H W. High power vacuum window in WR10 [J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(5): 994 - 995.
- [9] Yang X, Wagner D. Analysis of transmission characteristics for single and double disk windows [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter waves*, 2003, **24**: 619 - 628.
- [10] Muehe C E. Thermal cracking of waveguide windows [R], *M. I. T. Lincoln Laboratory Report No. AF*, 1966, **19**(628): 5167.