

采用混合模式传输的新型超宽带盒型窗

郑源*, 王建勋, 罗勇, 徐勇

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要: 在传统的场匹配理论的基础上建立起盒型窗的通用传输参数矩阵, 并提出了一种新型的混合模式传输方法来扩展盒型窗带宽. 在研究结果的基础上, 通过理论分析和数值计算得到了能满足 Q 波段超宽带带状束行波管所需求的新混合模式传输盒型窗的初始结构和尺寸, 利用三维高频分析软件 HFSS 优化并得到了最终结构参数. 通过仿真验证和热分析, 证明了新的混合模式紧凑型盒型窗在 34 ~ 52 GHz 频带内平均功率容量达到 10 kW、反射系数小于 -18 dB、相对带宽超过 40%. 冷测实验结果证实了盒型窗在要求带宽内反射系数均小于 -18 dB, 能满足实际器件的指标要求

关键词: 带状束; 超宽频带; 混合传输模式; 盒型窗

中图分类号: TN129; TN124 **文献标识码:** A

Extremely broad bandwidth hybrid-transmission-mode pill-box output window

ZHENG Yuan*, WANG Jian-Xun, LUO Yong, XU Yong

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

Abstract: Based on field-matching theory, the general transmission matrix of pill-box windows and a new concept of hybrid transmission modes pill-box window were presented to extend the bandwidth of output window. With guidance of the new concept, the primitive structure and parameters of the extremely broad bandwidth pill-box output window, working over 34 ~ 52 GHz, had been obtained. Afterward, HFSS was employed to optimize the parameters of the window and to examine the optimized mode. Through amount of thermodynamic analysis and optimization design, the extremely broad bandwidth pill-box window, with average power capacity 10 kW over 40% bandwidth whose insert loss is less than -18 dB, was attained. The cold test verifies the results of the design.

Key words: sheet beam, extremely broad bandwidth, hybrid transmission mode, pill-box window

PACS: 41. 20. Jb, 84. 40. Dc, 84. 40. Fe

引言

相比于传统的柱状电子注器件而言, 带状电子注器件不仅具有高频、高功率方面的优势, 而且利于器件的集成和小型化. 近年来, 在毫米波和 THz 领域对带状电子注器件的研究逐步加深^[1]. 带状注行波管由于天然具有宽频带的优势, 被广泛地运用于宽频雷达、高数据量通信以及医疗探测系统中. 随着研究地进一步深入, 带状束器件高频回路的有效工作带宽已经可以达到 30% ~ 40%, 而对应的输

入、输出窗的带宽很难超过 30%. 当微波器件工作在较高功率下, 如果输入、输出窗反射过大, 会造成过多的电磁波反射进入高频相互作用系统引起边带振荡等多种问题, 最终会致使整管系统不能正常工作^[2-4]; 此外, 在传输高平均功率电磁波时, 窗片的介电损耗会产生大量的热, 如果功率容量不足往往会致热应力过大, 损坏窗片^[5-7].

盒型窗作为一种常用的输入、输出结构, 已经得到了广泛的应用. 但是, 常见的盒型窗仍然难以满足超宽带的需要; 阶梯波导盒型窗虽然拥有更

收稿日期: 2014-06-05; 修回日期: 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金 (G05010401, 61101040)

Foundation items: Supported by National Nature Science Foundation of China (G05010401, 61101040)

作者简介 (Biography): 郑源 (1968-), 男 (汉族), 重庆人, 电子科技大学在读博士, 主要从事真空电子器件的研究

* 通讯作者 (Corresponding author); Email: 422165229@qq.com

Received date: 2014-06-05, revised date: 2015-01-07

宽的带宽,然而需要增加多级突变段用以匹配,导致输出结构过长,无法应用于小型化器件之中^[8]. 因此,随着带状束器件向着小型化,宽带宽和高功率进一步发展以及研究进程的进一步推进,一种新型的紧凑、超宽带、大功率容量的盒型窗的需求显得日益强烈. 首先根据场匹配理论研究了矩形到圆波导突变的场匹配传输参数矩阵、圆波导中引入介质的透射与反射传输参数矩阵,最终推导出了盒型窗通用传输参数矩阵以确定盒型窗的初始几何尺寸. 但仿真计算得到的结果与理论数值计算结果在高频段并不吻合. 通过仔细地检视计算模型以及场结构,发现高频端 TM_{11} 模式的引入能改善高端传输参数,并扩展可用带宽. 故在此基础上提出了采用混合传输模式来扩展盒型窗带宽的方法;进一步利用数值与仿真计算得到了初步设计尺寸. 然后利用仿真软件 HFSS,对初始参数进行了进一步优化,完成了超宽带混合模式传输盒型窗的设计方案. 在此基础上,利用 Matlab 数值计算对新型盒型窗进行了热分析,并且利用热分析软件 ePhysics 进行了验证. 最后加工出实物进行冷测,结果证明了新型盒型窗的性能可以达到设计要求.

1 理论分析

1.1 盒型窗的场匹配理论推导传输参数

图 1 给出了常见的盒型窗结构示意图: 其由矩形波导、圆波导以及介质窗片组成. 波导中工作模式、盒型窗两侧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^[9-11]. 同时图 1 也给出了盒型窗通用的场匹配模型. 模型中,利用模式函数的正交性和突变处电场和磁场的连续性,求得各个耦合模式的幅值. 本文利用场匹配理论推导出盒型窗级联 S 系数矩阵为:

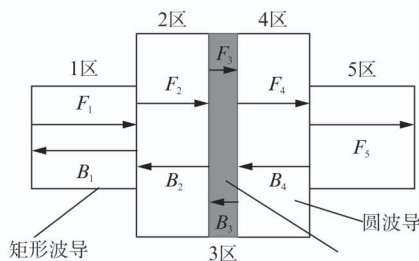


图 1 盒型窗结构以及场匹配理论示意图
Fig. 1 The structure and conceptual drawing of field matching theory of pill-box window

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{44} & S_{45} \\ S_{54} & S_{55} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_T & 0 \\ 0 & S'_T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{33} & S_{34} \\ S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} s_T & 0 \\ 0 & s'_T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{22} & S_{23} \\ S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_T & 0 \\ 0 & S'_T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中, S_{ij} 代表第 i 区与第 j 区连接处的相关 S 参数, S_T 与 s_T 分别代表波在圆波导与窗片中传输引入的相移. 而 S_1 就是所要关注的整个系统的反射系数, 通过上述矩阵, 我们可以得到对应模式 S_1 的具体表达式, 由此就可以确定各结构参数对盒型窗的特性参数的影响, 也因此确定初始的结构参数. 这种利用场匹配理论和传输级联矩阵来求得盒型窗特性参数的普遍分析理论. 该理论方法不仅可以用来分析普通的盒型窗、阶梯突变盒型窗, 而且可以用来研究变形结构的新型盒型窗, 因此具有广泛的适用性.

1.2 盒型窗的热分析

电磁波通过窗片时的损耗是盒型窗中主要的热量来源. 根据电磁波理论, 当电磁波无反射地通过窗片时, 介质片中产生的平均功率损耗的公式为:

$$q(r, \varphi) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2, \quad (2)$$

其中 $\epsilon_r'' = \epsilon_r \tan \sigma$, r 与 φ 是圆柱坐标系中两坐标, ω 是角频率, ϵ_r 是介质的相对介电常数, $\tan \sigma$ 是损耗正切, E 代表电场在这一坐标点的幅值大小. 场分布的不同使得窗片的各个部分的热产生速率不同, 而热产生速率不均导致局部温度过高, 窗片上的温差又会产生热应力, 过大的热应力很容易损坏窗片. 要计算出窗片上的温度分布, 除了要计算出热产生功率, 还要考虑到介质片的热传导满足:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{q}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3)$$

其中, T 是坐标系某点的温度, q 是前面提到的热产生速率, k 是介质的热传导系数, ρ 是介质材料的密度, c 是比热. 在求解上述温度泊松方程时, 还需要边界条件. 由于我们使用水冷, 在水流量足够大的情况下, 边界上可以视作恒定温度:

$$T(r, t) |_{r=a} = T_0, \quad (4)$$

其中, T_0 是冷却水的温度, a 是圆波导的半径. 由于, 窗片向真空和空气中辐射散热的热量远远小于采用水冷方式的盒型窗热传导散热的热, 为了简化计算, 理论计算中不考虑热辐射带来的影响.

2 混合模式传输的盒型窗以及改进

由于矩形波导中输入、输出的模式均为 TE_{10} 波, 所以在编制 Matlab 数值计算程序时, 为了方便

初始几何参数的寻找,我们只采用了有限个数的 TE 模式场叠加来近似圆波导中的总的场分布,经过计算程序的寻找我们得到结果如图 2 中黑色方点所示反射参数结果的对应盒型窗的相应几何参数;但是,利用编程得到的几何参数建立 HFSS 模型进行仿真验证却得到如图 2(a) 红色圆点所示的反射参数结果.

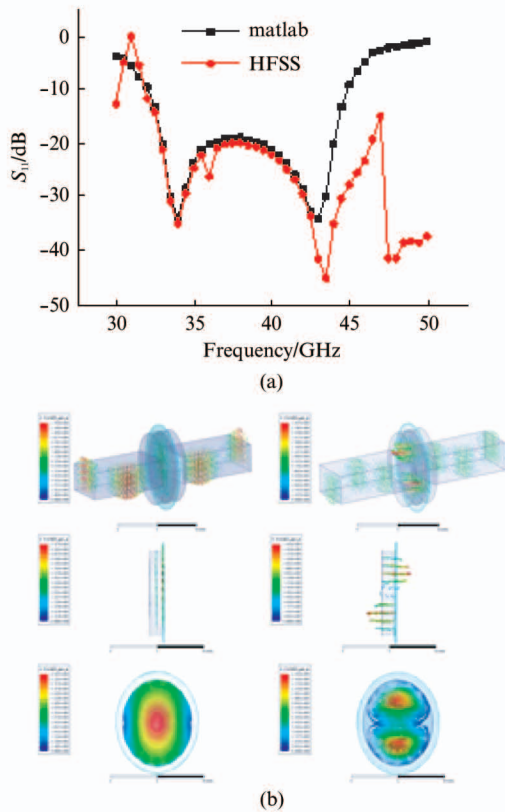


图 2 (a) 初始几何参数盒型窗的 Matlab 数值计算与 HFSS 仿真计算的结果, (b) 不同工作频率时盒型窗内的场分布

Fig.2 (a) The Matlab results and the HFSS results of the initial design pill-box window, (b) The field distribution of the pill-box window at different frequency

由图可以看出,在高频段两种方法得到的结果差距很大,为了找到造成这种差异的原因,我们检视了处于不同工作频率点圆波导中的电场分布,如图 2(b) 所示,发现盒型窗工作频率较高时,圆波导段已处于过模工作状态,因此 TE_{10} 模式往往更容易耦合出非 TE 的 TM 模. Matlab 程序没有考虑到矩形波导中的 TE_{10} 模式耦合出圆波导中的 TM 模式,是造成了图 2 中两条曲线之间的差异的主要原因. 如果仍然要盒型窗采用传统的矩形波导 TE_{10} 到圆波导 TE_{11} 单模传输的工作方式,虽然可以通过缩小窗片、圆波导半径尺寸等方式抑制高频段其他模式的产

生,但这样会限制盒型窗的功率容量;其次由于采用单模传输,实际加工出的传统盒型窗结构的有效工作带宽很难超过 30%. 虽然,近年来阶梯矩形波导盒型窗的出现,扩展了传统盒型窗的带宽;但是为了实现宽频带匹配,它需要在传统的盒型窗矩形波导与圆波导之间增加一节或者多节过渡矩形波导,大大增加了盒型窗的纵向几何尺寸,使得其不适用于小型化器件. 如果在传统盒型窗的传输频带高端使 TE_{10} 耦合出 TM_{11} 传输模式,完成电磁波在盒型窗圆波导段的传输,不仅拓展了盒型窗的带宽;也使得盒型窗保留较大的横向几何尺寸,使盒型窗能承受更大的功率容量. 而且,这种混合模式的传输不需要增加过渡波导,相比于阶梯突变盒型窗,在小型化带状束器件的应用中具有很大的优势.

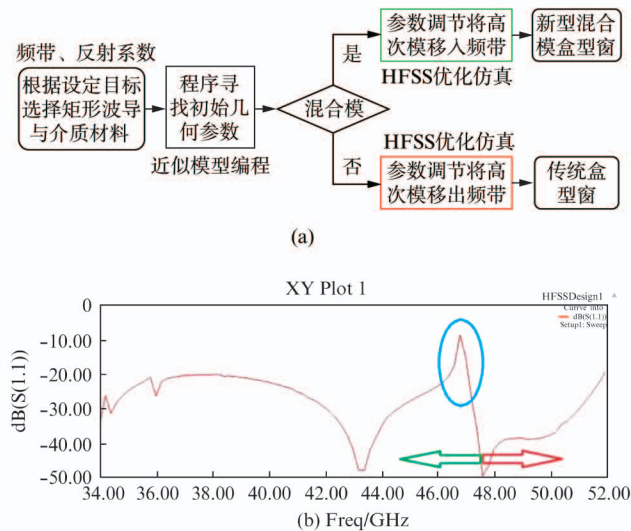


图 3 (a) 盒型窗设计流程图以及, (b) 本文中 TM 模移入、移出频带示意图

Fig.3 (a) The flow chart of a pill-box window design and (b) the demonstration of manipulating the TM mode

在前面数据分析结果以及混合传输思路的指导下,设计出一种新型的超宽带盒型窗,期望能有效地在超过 40% 的相对带宽内传输 5 kW 的电磁波. 为了方便连接和提高设计的通用性,我们使用标准的 BJ400 矩形波导作为盒型窗的矩形连接段,选用蓝宝石作为窗片材料. 在圆波导连接段与介质窗片的设计过程中,首先利用的 S 参数计算程序按照传统盒型窗的设计步骤找到最初的盒型窗几何参数;再根据此基础参数建立仿真模型利用 HFSS 对得到的参数进行优化寻找,通过压缩圆波导长度、调整圆波导半径等方式在传输频段的高端引入 TM_{11} 作为圆波导中的传输模式,分别让 TE_{11} 与 TM_{11} 作为圆波导

中低端频率和高端频率传输的主模. 传统盒型窗与新型混合模式盒型窗的设计流程对比以及对应的 TM_{11} 模式调整方向示意由图 3 给出, 按照新型盒型窗设计流程我们的混合模式传输盒型窗的初始设计参数如下:

表 1 超宽带盒型窗初始参数设计

Table 1 The initial parameters of the hybrid transmission pill-box window

频段/GHz	材料	窗片尺寸		圆波导尺寸	
		R/mm	L/mm	R/mm	L/mm
34 ~ 52	蓝宝石	4.1	0.2	3.2	1.1

初始参数设计的盒型窗, 虽然按照预想在高频率段引入了 TM_{11} . 但是, 同时也引入了其他更高次杂模, 如图 4(b) 所示, 这些高次模式的出现. 对电磁波的传输没有益处, 反而在窗片中形成振荡, 造成 S 参数的恶化.

为了消除不希望的高次杂模, 新型盒型窗采用了变形的圆波导连接蓝宝石介质片和矩形波导. 如图 4(c) 所示, 通过部分圆波导的切除, 大大抑制了高次杂模、显著地提升了 TE_{11} 模的纯度; 由于切除部分几乎没有干扰 TE_{11} 和 TM_{11} 模式的场分布, 所以对 TE_{11} 和 TM_{11} 模式的传输特性没有影响.

3 仿真优化结果

随着计算技术的发展, 计算机仿真广泛地应用在微波设计领域. 我们使用 HFSS 电磁计算软件对理论计算得到的盒型窗进行仿真优化. 最终得到的采用混合模式传输的超宽带盒型的模式分布、反射系数 (S_{11}) 曲线以及注波系数 (VSWR) 分布分别如图 5 所示:

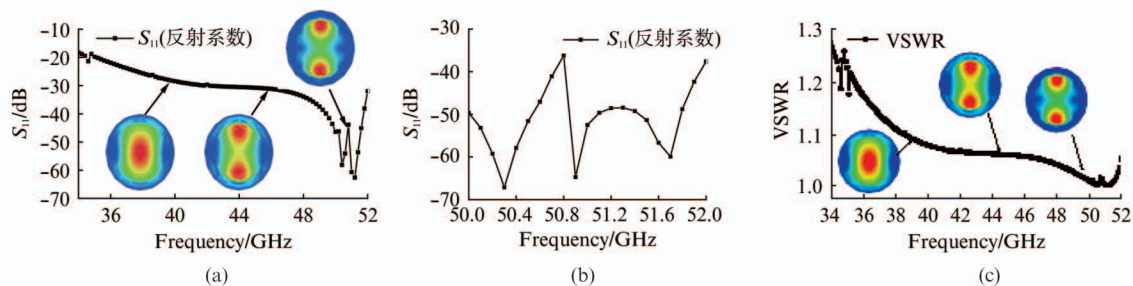


图 5 (a) 新型超宽带盒型窗反射系数以及窗片中的主要工作模式在频带的低、中和高段分别为: TE_{11} 模、 TE_{11} 和 TM_{11} 混合模和 TM_{11} 模的示意图, (b) 细扫频点 50 ~ 52 GHz 频段反射系数示意图, (c) 新型超宽带盒型窗的注波系数以及窗片中的主要工作模式在频带的低、中和高段分别为: TE_{11} 模、 TE_{11} 和 TM_{11} 混合模和 TM_{11} 模的示意图

Fig. 5 (a) The reflection characteristic and main transmission mode frequency spectra is TE_{11} mode, hybrid mode and TM_{11} mode from HFSS simulation, (b) the high resolution of the reflection characteristics over 50 ~ 52 GHz, (c) The VSWR and main transmission mode frequency spectra is TE_{11} mode, hybrid mode and TM_{11} mode from HFSS simulation

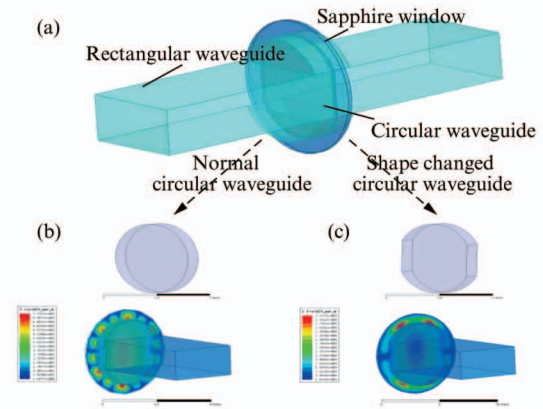


图 4 (a) 盒型窗的 3D 模型, (b) 初始设计盒型窗的连接圆波导以及场分布示意图, (c) 改进后盒型窗的连接变形圆波导以及场分布示意图

Fig. 4 (a) The 3D mode of pill-box window, (b) the shape of circular waveguide and its distribution of field, (c) the shape of changed circular waveguide and its field distribution

经过对计算结果的分析发现混合模式传输盒型窗的变形圆波导中在 34 ~ 42 GHz 频段主要以 TE_{11} 模式为主; 42 ~ 48 GHz 为 TE_{11} 和 TM_{11} 混合模; 在 48 ~ 52 GHz 由 TM_{11} 构成场的主要组成成分, 相关信息可以由图 5 清楚地看到. 新型盒型窗在 34 ~ 52 GHz 频带内反射系数小于 -18 dB, VSWR 在 1.3 以下, 但是在图 5(a) 中显示在 50 ~ 52 GHz, 反射参数 (S_{11}) 的曲线出现了有毛刺, 所以图 5(b) 给出了细扫频点的计算结果, 证明毛刺现象不是传输奇点而是由于多种模式混合杂合以及 HFSS 本身网格是根据中心频点来划分造成的. 故仿真结果证明在超过 18 GHz 带宽内, 盒型窗的反射系数在此频带范围内不会大于 -18 dB, 新型混合模式盒型窗能有效地传输电磁波.

实际应用中,采用精细打磨技术,窗片厚度会有不会超过 ± 0.01 mm 的误差;其半径误差不会超过 ± 0.1 mm. 图 6 给出了超宽带混合模盒型窗的窗片厚度与半径变化下各个频点 VSWR 与 S_{11} 的曲线:

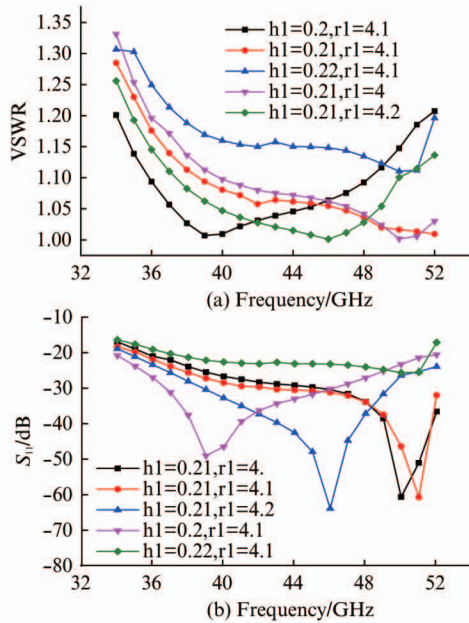


图 6 新型盒型窗的窗片几何尺寸变化时的注波系数曲线与反射参数 S_{11} 曲线

Fig. 6 (a) VSWR and (b) reflection characteristic spectra of window thickness (h_1) and radius (r_1) within ± 0.01 mm and ± 0.1 mm tolerance

由图 6 可以看出,随着窗片厚度 h_1 减小,曲线变化幅度很大,传输曲线的凹坑会明显向低频段漂移;窗片半径 r_1 变化也会对传输曲线造成一定的影响,但没有 h_1 的变化对 S_{11} 造成的影响剧烈. 盒型窗的其余参数变化也会对盒型窗的传输性能造成影响,但是它们不是传输参数的决定性因素,因此不再一一列出. 根据一系列分析显示在加工容差的范围内变化时,混合传输模式盒型窗的输出性能基本都能满足规定带宽内 VSWR 的要求 ($VSWR < 1.3$). 表明新型的盒型窗能够被实际的加工出来,而不仅仅存在于仿真计算之中.

4 热分析以及击穿分析

在实际加工之前,为了检验超宽带混合模式盒型窗是否具有传输平均功率为 5 kW 的电磁波的可能性,需要对其进行热分析. 考虑到给加工制造留出足够误差余量,我们采用 10 kW 的电磁波进行分析. 根据热传导理论,我们编写了 Matlab 程序分析了盒型窗片在连续波 10 kW 平均输出功率工作时

的温度分布情况. 由于,在不同频率下,混合模式的超宽带盒型窗的主要传输模式不同,而不同的模式的场分布会产生不同的温度分布,因此需要分为: TE_{11} 工作模式、 TE_{11} 和 TM_{11} 混合工作模式、 TM_{11} 工作模式来分析.

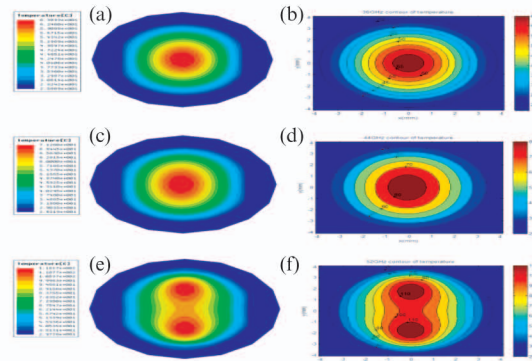


图 7 ePhysics 计算得到 (a) TE_{11} 模式、(c) 混合模式、(e) TM_{11} 模式工作状态下 10 kW 平均传输功率窗片温度分布图; Matlab 计算得到 (b) TE_{11} 模式; (d) 混合模式; (f) TM_{11} 模式工作状态下 10 kW 平均传输功率窗片温度分布图

Fig. 7 The field distribution and the thermal distribution on the sapphire window with transmission mode (a) TE_{11} , (c) hybrid mode and (e) TE_{11} employing ePhysics, and (b) TE_{11} , (d) hybrid mode and (f) TM_{11} using HFSS

ePhysics, 一种能与 HFSS 关联的热仿真的软件,被用来验证我们得到的理论分析结果. 三种工作模式下的热仿真结果放在图 7 中与我们使用 Matlab 计算得到的结果进行对比. 两种计算方法均采用 25 度的水对新型盒型窗进行冷却、设定盒型窗传输 10 kW 的连续电磁波,但 Matlab 编写的程序忽略了热辐射带来的热量耗散. 采用与 Matlab 计算方法求得三种状态下窗片的最高温度分别为: 64 度、71 度和 116 度与 ePhysics 计算得到的 65 度、77 度和 114 度的最高温度具有一些差异;不过温度分布趋势吻合非常好,且存在的计算误差对高功率微波产生的热量是否会造成窗片破裂的定性分析没有影响. 根据前人的研究以及实际经验证明半径与厚度比为 20:1 的窗片边缘与中心最高温度的温差不超过 105 度时,窗片基本都不会因为热应力而破碎.

除了分析窗片的是否会损坏以外,检验盒型窗的是否具有 10 kW 功率容量还需要分析盒型窗内电场是不是会造成击穿,加之本文所提出的新型盒型窗采用混合模式进行传输,因此电场击穿分析显得更加重要: 图 8 是在各个频点上盒型窗中电场最

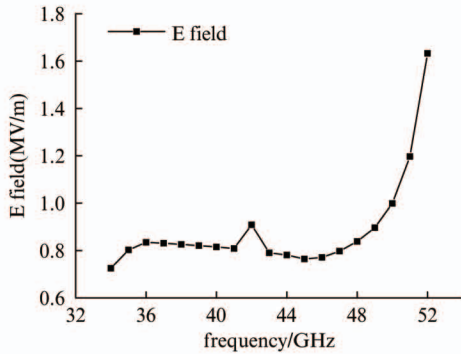


图8 新型混合模式传输盒型窗各个频率点的最大电场值示意图

Fig. 8 The maximum field of the hybrid transmission modes pill-box window over 33GHz-52 GHz

大值曲线图,由图可以看出盒型窗内圆波导段的电场最大幅值为:1.7 MV/m 远小于经验击穿电压 3 MV/m. 由包含加工精度的功率容量估算公式:

$$P_{br} = 0.5 * 0.6 * ab * \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} (MW) \quad (5)$$

可以估算出设计采用的标准 BJ400 矩形波导的混合模式传输盒型窗的功率容量在仿真结果中可达到 12.5 kW 以上. 所以,窗片的功率容量能满足设计需求.

5 冷测实验研究

依据上述优化设计以及验证结果,我们加工出新型混合模式水冷盒型窗,通过冷测对其性能进行验证后成功地将该窗应用到研制的带状束行波管的实验管中,图9和图10(a)给出了新型混合模式盒型窗的测试实物以及它的S参数的测试结果.冷测结果已经能够证明新型的混合模式盒型窗在相对带宽达到近40%的工作频带内的反射系数均小于-18 dB,带宽相比于普通盒型窗带宽有大幅度提高;而且又兼顾了结构紧凑的优点,非常适合于宽带小型化带状束器件.但冷测结果连接成的曲线(如图10(b)中黑色曲线)与仿真设计得到的结果描成曲线(如图10(b)中红色曲线)的差距较大,因此需要对实测盒型窗进行加工参数误差分析.在前文冗余度分析的基础上,研究了窗片传输性能主要决定因素—窗片厚度 h_1 .结果显示窗片厚度 h_1 为0.19 mm时仿真曲线(如图10(b)中粉色曲线)与测试曲线趋势吻合得较好.虽然测试结果与设计预期结果相差较大,但是,考虑到加工误差、窗片边缘金属化带来的影响以及冷测时各个零件之间的装配误

差等等因素带来的影响.实际窗片与设计窗片之间具有等效0.02 mm厚度的误差是十分合理的.

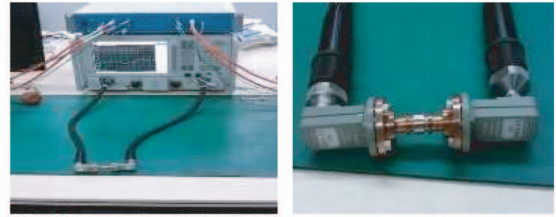


图9 新型混合模式传输盒型窗的测试系统以及测试实物示意图

Fig. 9 The picture of cold test system and test sample of the novel hybrid transmission mode window

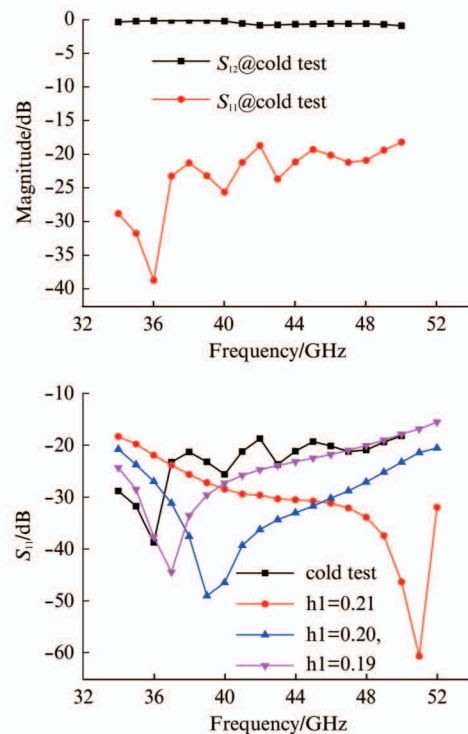


图10 (a)新型混合模式传输盒型窗的S参数的冷测结果(b)反射系数冷测结果与仿真结果对比图

Fig. 10 (a) The reflection characteristic cold test data and (b) the results of HFSS simulation of the hybrid transmission mode

6 结论

为了设计出适用于小型化、宽带宽的带状束行波器件的盒型窗,通过对匹配理论分析,提出了基于混合传输模式以扩展带宽的新型盒型窗方法.加以数值计算与仿真优化,给出了能工作于34~52 GHz的高性能超宽频带混合传输盒型窗的设计方案.仿

真结果显示其在设计频段内 S_{11} 参数小于 -20 dB 的输出带宽大于 18 GHz, 相对带宽近 42%。其次, 研究了尺寸参数小范围变化对盒型窗传输特性的影响, 保证了在实际的加工误差下新型盒型窗仍然具有良好的传输特性。再次, 对盒型窗进行了热分析研究, 给出了水冷条件下, 该结构的盒型窗工作在 10 kW 功率下的温度分布的计算结果。确保盒型窗能稳定地传输较大功率的电磁波。最后, 加工了新型超宽带混合模式盒型窗的样品, 并对其进行了冷测实验, 实验结果证明了新型盒型窗在设计带宽内的传输参数满足设计要求。新型的盒型窗不但可以用于输出结构还能应用于输入结构。本文的工作为超宽带带状束行波管的研究提供了技术支持。

References

- [1] BOOSKE J H, DOBBS R J, "Vacuum electronic high power terahertz sources[J]," IEEE Trans. On Terahertz Science and Technology, 2011, **1**: 54 - 75.
- [2] XU Yong, LUO Yong, LI Hong-Fu, *et al.* Design of a new type broad-band output window for high power gyro-TWT [J], *J. Infrared Millim. Waves* (徐勇, 罗勇, 李宏福, 等. 高功率回旋行波管新型宽带输出窗的设计, *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(2): 187 - 192.
- [3] GONG Yu-Bin, LU Zhi-Gang, WANG Guan-Jun, *et al.* Study on mm-wave rectangular grating traveling wave tube with sheet beam [J], *J. Infrared Millim. Waves* (宫玉彬, 路志月, 王冠军, 等. 带状束矩形栅毫米波行波管的研究, *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 173 - 178.
- [4] 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], *J. Infrared Millim. Waves* (路志刚, 宫玉彬, 魏彦玉, 等. 任意槽矩形波导栅行波管注-波相互作用线性理论研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(5): 370 - 373.
- [5] ZHANG Xin-Ren. High Frequency window of 3 mm band gyrotron [D], (张新仁, "3 mm 波段回旋管高频窗的研究". 成都: 电子科技大学), 2008.
- [6] John Douglas Wade, Robert H. Macphie, Scattering at Circular-to-Rectangular Waveguide Junctions [J], *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, 1986, **MTT-34** (11).
- [7] LIN Fu-Min, DING Yao-Gen, SHEN Bin, *et al.* Research on passing CW power capacity of cylindrical box type window [J], *High Power Laser and Particle Beam* (林福民, 丁耀根, 沈斌, 等. 圆柱盒型窗的连续波功率容限问题的研究, *强激光与粒子束*), 2003, **15**(11): 1111 - 1116.
- [8] Prokofiev B. Broadband Pillbox-Type Windows for the Microwave Tubes [C], IVEC 2002. Third IEEE International, 2002: 222 - 223.
- [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] WANG Jian-Xun. The research of Ka-band high power millimeter wave Gyro-amplifiers and W-band sheet beam electron optics [D], (王建勋. Ka 波段回旋放大器和 W 波段带状束电子光学系统的研究 成都: 电子科技大学), 2007.
- [11] ZHAO Wei. Analysis of un-attenuation waveguide employing mode match theory [D], (赵伟, 波导不连续性的模式匹配法分析 西安: 西安电子科技大学), 2008.