



·高功率微波技术·

Ka 波段回旋行波管高效率输入耦合器设计^{*}

何友辉^{1,2}, 胡 鹏², 陈洪斌²

(1. 中国工程物理研究院 研究生院, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了实现 Ka 波段回旋行波管高纯度 TE₀₁ 模式输入, 通过在输出口添加滤波结构, 对二级功分 TE₀₁ 输入耦合器进行改进, 改进后杂散模式传输效率由平均 7% 下降至 2%。该结构主体为一个级联的两级 Y 型功分网络, 能高效地实现矩形波导 TE₁₀ 模式到圆波导 TE₀₁ 模式的转换。在基于传输线理论对功分网络的传输性能理论分析的基础上, 借助三维电磁仿真软件进行多次优化迭代, 最终得到了一个在 31 GHz 附近模式转换效率大于 99% 的宽带 TE₀₁ 输入耦合器, 该输入耦合器具有 5 GHz 的 -0.1 dB 插入损耗带宽, 同时有效频带内的平均模式转换效率高达 98.6%, 模式纯度在 99% 以上并且回波损耗小于 -15 dB。采用矢量网络分析仪对该器件进行了背靠背冷测实验, 结果表明, 其带内衰减约为 0.5 dB, 与仿真计算结果偏差较小, 符合工程实际需求。

关键词: 回旋行波管; 功分网络; 输入耦合结构; 高纯度; 滤波结构; 模式转换

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220287

Design of Ka band gyro-TWT high purity input structure

He Youhui^{1,2}, Hu Peng², Chen Hongbin²

(1. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: To realize the high-purity TE₀₁ mode input of the Ka-band cyclotron traveling wave tube, the two-stage power divider TE₀₁ input coupler is improved by adding a filter structure at the output port, and the transmission efficiency of the spurious mode is reduced from the original average of 7% to less than 2%. The main body of the structure is a cascading two-stage Y-type power divider network, which can efficiently realize the conversion of rectangular waveguide TE₁₀ mode to circular waveguide TE₀₁ mode. Based on the theoretical analysis of transmission performance of power divider network based on transmission line theory, and with the help of 3D electromagnetic simulation software, several optimization iterations are carried out, and finally a wideband TE₀₁ input coupler with mode conversion efficiency greater than 99% near the frequency of 31 GHz is obtained, the input coupling structure has a -0.1 dB insertion loss bandwidth of 5 GHz, and the average mode conversion efficiency in the effective frequency band is as high as 98.6%, the mode purity is 99% and the return loss is less than -15 dB. Back-to-back cold test experiments were carried out on the device using vector network analyzer, and the results show that the in-band attenuation is about 0.5 dB, which deviates little from the simulation calculation result, which meets the actual engineering requirements.

Key words: gyro-TWT, power distribution network, input coupling structure, broadband, filter structure, mode conversion

回旋行波管作为一种基于电子回旋谐振脉塞原理的一类新型快波器件^[1], 利用电子在磁场中回旋实现与电磁波的能量交换, 具有高功率、宽频带、高增益等特点, 是为数不多的能在亚毫米波与毫米波段高重复频率甚至连续波输出高功率电磁脉冲^[2-3]的大功率微波源, 在电子对抗、等离子体加热、高能粒子加速器等领域得到了广泛应用, 具有重要的研究价值。

输入耦合器作为一种实现微波源输入信号模式到回旋行波管工作模式变换的关键部件, 通常采取侧馈设计,

* 收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2023-05-04
联系方式: 何友辉, heyuhui20@gscaep.ac.cn。
通信作者: 陈洪斌, ch_hongbin@126.com。

利用多个相同场的对称叠加来实现所需模式的激励,其输出性能对回旋波管束波相互作用效率、增益、带宽等性能^[4]有一定影响。此外,由于输入耦合器件位于电子枪与相互作用波导之间,在实际工程应用中,除了要求其具有相当的带宽与输出模式纯度外,也对其电子流通率、反向微波抑制能力提出了较高要求。对此,国内外学者开展了大量研究,目前主要有如下几种结构:同轴多缝耦合结构^[5-6]、基于功分网络的侧向耦合结构^[7-11]以及同轴扇型渐变结构^[12]。对于同轴结构,徐勇等^[5]人就小缝数目、位置以及尺寸对输入耦合器传输特性的影响进行研究,发现小缝尺寸对传输特性的影响最为显著。优化后,在Ka波段得到了3 dB插损带宽为3 GHz的四缝同轴TE₀₁输入耦合器。对于功分结构,乔益民等^[7]人基于两级Y形功分网络设计了一种四端口侧馈的220 GHz回旋波管输入耦合器,在220 GHz附近实现了99%以上的最大模式转换效率,同时具备4 GHz的-0.2 dB插入损耗带宽。此外,Yu等^[8]人基于类似结构设计输入耦合器,在34 GHz频率附近实现了5.8 GHz的-1 dB插入损耗带宽。

在上述几种结构中,基于功分网络的输入耦合器能够高效激励起对称的TE₀₁模式,相比于同轴结构具有更大的带宽与模式转换效率。为进一步提高回旋管输入耦合器性能,本文基于这种结构进行改良设计,通过在输出端口增加滤波结构,以使得TE₂₁等杂散模式传输效率大幅下降,最终得到高纯度、高效率的宽带输入耦合器。

1 功分型输入结构设计

1.1 设计原理

选择Ka波段标准矩形波导BJ320作为输入波导,输入微波信号经过两级功分网络通过四端口侧向馈入圆波导,激励起四个对称的TE₁₀模式,这四个TE₁₀模式在圆波导内部合成角向均匀模式TE₀₁输出。按照工程实际要求,中心频率取31 GHz,截止频率取28.5 GHz,功分网络结构如图1所示,由两个Y形功分网络对称级联而成,输入微波经过四个尺寸相同、横向位置相互正交的矩形输入端口在圆波导内激励起TE₀₁模式。设计时,整个功分网络轴向长度统一为 a ,以保证各部分矩形TE₁₀模纵向传输常数 β 和波阻抗 Z_w 一致。最后,在输入波导末端加入半径为 R_c 的截止波导以防止微波传向电子枪。

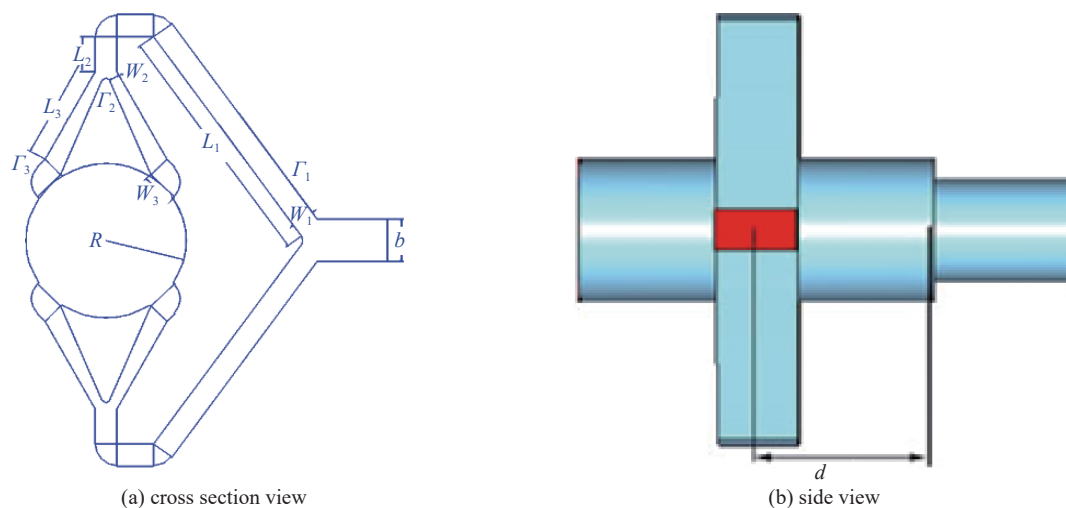


Fig. 1 Schematic diagram of two-stage power divider input coupler

图1 两级功分型输入耦合器结构示意图

为了减少仿真优化时间,这里对功分网络进行传输线模拟,建立功分输入耦合器的传输线模型,结果如图2所示。输入波在传输过程中经过两级功分,每一级功分都可看作是E面T型结,分配过程中电压平分,电流保持一致。各段特性阻抗的差异是引起反射的主要原因。

依据传输线理论可以求出总传输矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_1} \end{bmatrix} * T_1 * \begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix} * T_2 * \begin{bmatrix} m_3 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_3} \end{bmatrix} * T_3 * \begin{bmatrix} m_4 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_4} \end{bmatrix} * T_4 * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{bj}} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} m_5 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_5} \end{bmatrix} \quad (1)$$

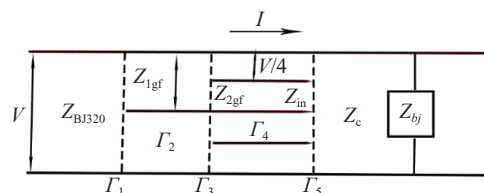


Fig. 2 Schematic of power divider travelling line

图2 功分网络传输线模型示意图

式(1)中传输矩阵 T_n 为

$$T_n = \begin{bmatrix} \cos(\beta L_n) & j\sin(\beta L_n) \\ j\sin(\beta L_n) & \cos(\beta L_n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

各段阻抗变比为

$$\begin{cases} m_1 = \sqrt{\frac{2Z_{1gf}}{Z_{BJ320}}} \\ m_2 = \sqrt{\frac{2Z_{eq_{bd_1}}}{2Z_{1gf}}} \\ m_3 = \sqrt{\frac{4Z_{2gf}}{2 * 2Z_{2gf}}} \\ m_4 = \sqrt{\frac{4Z_{eq_{bd_2}}}{4Z_{2gf}}} \\ m_5 = \sqrt{\frac{Z_c}{4Z_{in}}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $Z_{BJ320} = \frac{b}{a} \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$ ； $Z_{1gf} = \frac{b}{2a} Z_w^r$ ； $Z_{2gf} = \frac{W_2}{a} Z_w^r$ ； $Z_{eq_{bd_1}} = Z_{jbd_1} \frac{1 - \Gamma_{eq}}{1 + \Gamma_{eq}}$ ； Γ_{eq} 为渐变段起始点反射系数； $Z_{in} = \frac{w_3}{a} Z_w^r$ ；

$$Z_c = \frac{k}{\beta} Z_w^c$$

传输参数 S_{21} 为

$$S_{21} = \left| \frac{2}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \right| = 1 \quad (4)$$

1.2 仿真结果

借助三维电磁软件仿真优化后，功分输入耦合器的传输特性示意于图3(a)中：插入损耗 S_{21} 的-1 dB带宽为6.4 GHz，覆盖在28.7~35.1 GHz之间；-0.5 dB带宽为5.8 GHz，覆盖在28.9~34.7 GHz频段，-0.1 dB带宽为3.2 GHz，覆盖在29.8~33 GHz频段。有效传输带宽(1 dB插损)约为20%。模式转换效率在30.4 GHz与32.8 GHz处达到极大，约为99.9%。对应回波损耗 S_{11} 在30.5 GHz与32.7 GHz处达到极小，约为-40 dB，其-10 dB带宽为5.2 GHz，从28.9 GHz覆盖到了34.1 GHz，在约20%的相对带宽内实现了良好的阻抗匹配。与HFSS计算结果相比，后者频带略有右移且带宽略大，反射也略高，但二者输出效率整体比较接近。

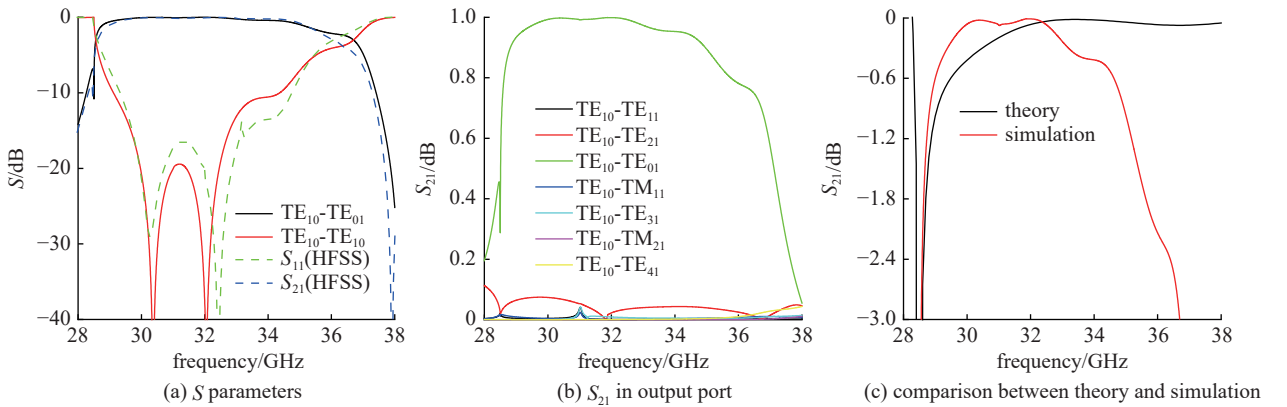


Fig. 3 Transmission performance and deviation analysis of the Ka band gyro-TWT power divider input structure

图3 Ka 波段回旋行波管功分输入结构传输性能及其偏差分析

此时，功分输入耦合器的1 dB插损带内平均传输效率 η 为97.6%，平均模式纯度 α 为95.5%。主要杂散模式为输出波导边缘处的TE₂₁模式，该模式在部分频点处传输效率达到10%，对输出有一定影响，可以考虑采取在圆波导输出口加载滤波抑制结构来减小杂散模式的影响，上述结果示意于图3(b)中。

另外, 图 3(c) 给出了理论计算结果与仿真计算结果的对比。可以看到, 二者在中低频段吻合较好, 但在高频段出现一定偏离, 分析可能是理论模型中未计及波导弯头电感效应所致。

对该功分输入耦合器电场分布进行计算, 结果如图 4 所示: 标准波导输入的矩形 TE₁₀ 模式经过两级功率分配网络分配为四个相位相同、幅值相等的 TE₁₀ 信号侧向馈入圆波导, 最终在圆波导内合成圆模 TE₀₁ 输出, 上述过程示意于图 4(a) 中。功分网络部分场强要大于圆波导区域, 存在更明显反射回波, 对整个输入耦合器传输效能有一定影响。

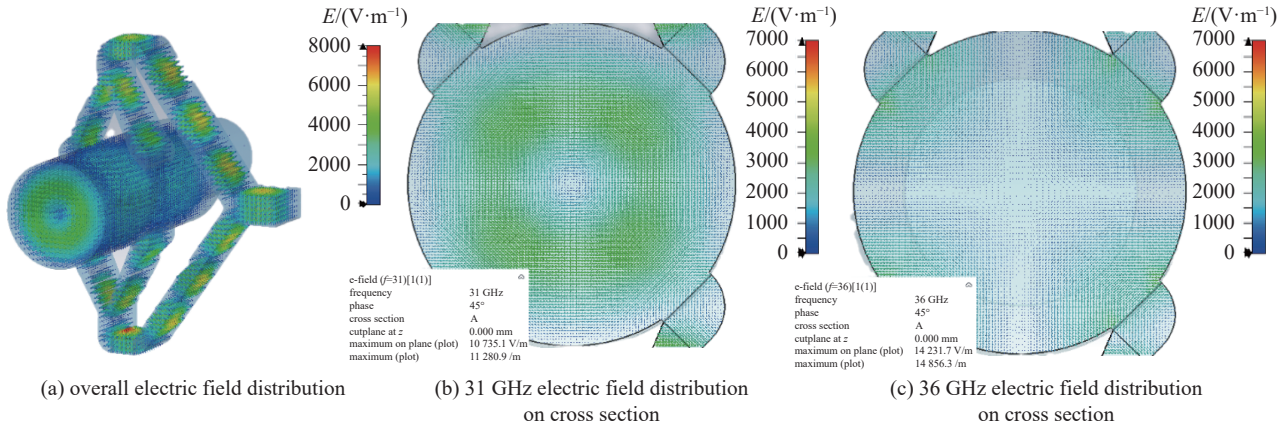


Fig. 4 Electric field distribution of the input coupler

图 4 功分输入耦合器电场分布

针对高频段性能有所下降的问题, 对耦合面处传输场进行计算, 结果如图 4(b) 和图 4(c) 所示: 图 4(b) 给出了频率为 31 GHz 的耦合面处电场分布。此时电场分布十分均匀, 并未发生明显畸变, 四个均匀的矩形 TE₁₀ 模在圆波导内合成圆波导角向均匀模式 TE₀₁。而在图 4(c) 中, 可以看到: 在 36 GHz 处, 波导边缘处的耦合面处电场发生一定畸变, 部分转变为高阶 TE₄₁ 模式。

如图 1 所示, 影响传输性能的结构参数可以分为三类: 功分网络横向尺寸, 如 W_1 、 W_2 、 W_3 ; 纵向长度参量, 如 L_1 、 L_2 、 L_3 以及馈入口到截止波导的距离 d 。图 5 和图 6 分别给出了上述结构参量对传输性能的影响: 在三个宽度参量当中, 输入口窄边宽度 W_3 对传输性能影响最大, 随着 W_3 从 2.03 mm 增大至 3.10 mm, 整个输入耦合器高频段传输效能提升了 1 dB, 同时 3 dB 插损带宽增加了约 1 GHz。在另外两个参数中, 随着 W_1 从 1.42 mm 增加至 2.13 mm, 3 dB 插损带宽增加了约 1 GHz; W_2 对传输性能影响效果与 W_1 相反。初步分析是: W_1 、 W_2 对功分网络各级支路的特征阻抗有较大影响, 当其偏离最佳值时, 使得各级支路阻抗失配, 最终使得功分网络反射增加, 传输效能下降, 上述结果示意于图 5 中。

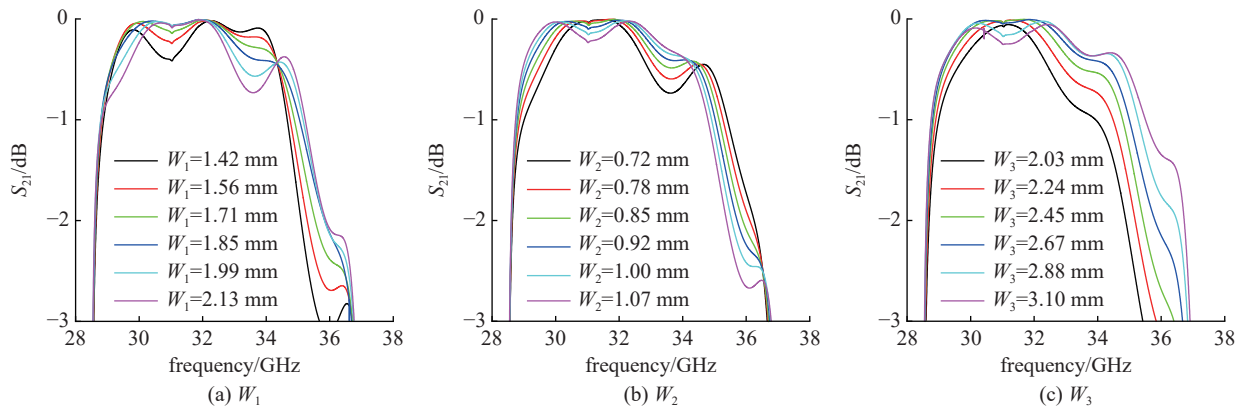


Fig. 5 Influence of width parameters on transmission performance of the power divider input coupler

图 5 宽度参量对功分输入耦合器传输性能影响

长度参量对传输性能影响示意于图 6 中: L_3 的影响最为显著, L_2 对性能影响最小。当 L_3 从 6.54 mm 增加至 9.78 mm 时, 最大传输效率增加了 0.5 dB, 而随着 L_3 进一步增加至 12.19 mm, 高频段传输效率有所下降, 在 $L_3=9.8$ mm 时传输性能最佳。另外, 随着截止波导到输入口中心的距离 d 从 3.56 mm 增加至 7.56 mm, 3 dB 插损带宽

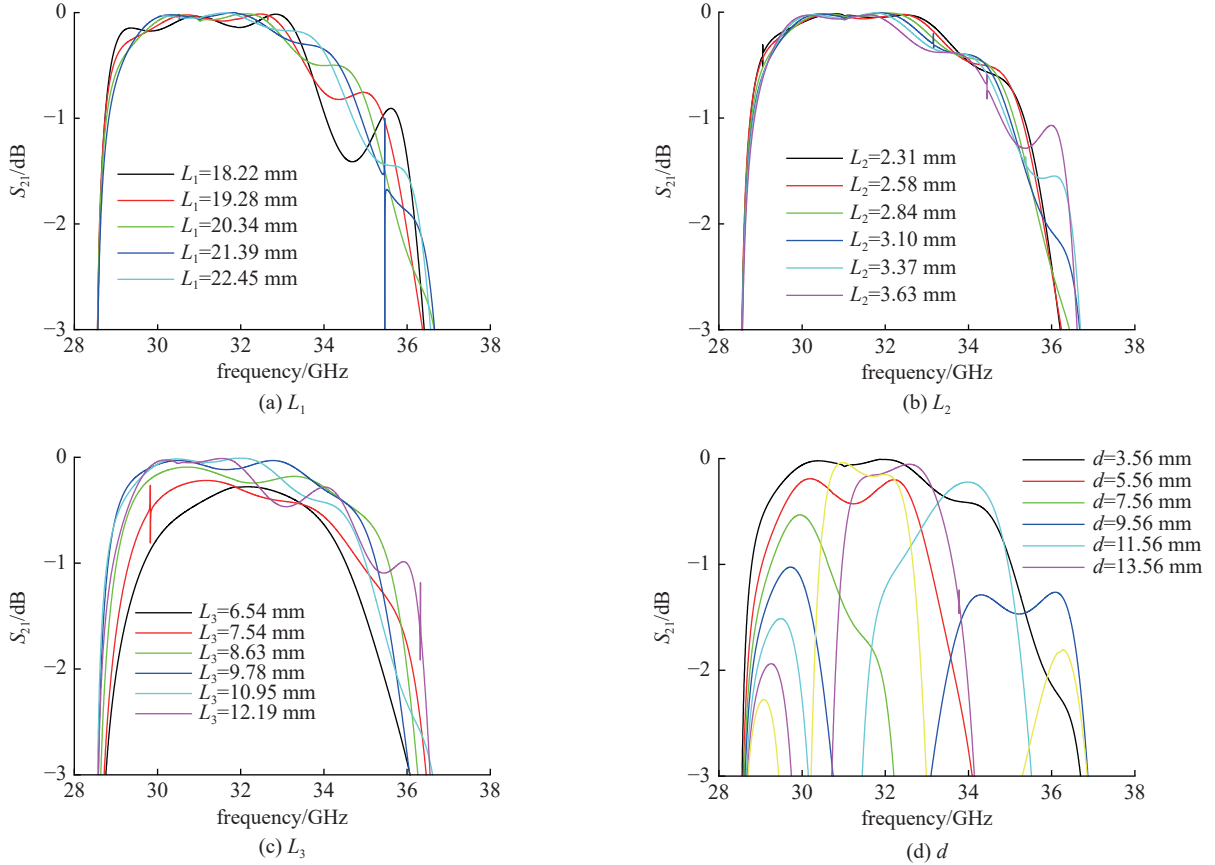


Fig. 6 Influence of length parameters on transmission performance of the power divider input structure

图 6 长度参量对功分输入结构传输性能影响

由 28.5~37.5 GHz 缩窄至 28.5~32.5 GHz, 减少了约 5 GHz。这里额外引入的波导长度起到了短路短截线的作用, 给原先传输线引入了不必要的阻抗, 致使功分网络输入阻抗与圆波导阻抗失配, 导致反射增加、传输性能大幅下降。

2 输出口添加滤波结构改进

为了抑制杂散模式, 尝试在圆波导侧壁加载四个大小相同的金属片进行滤波处理。通过使金属片与 TE₂₁ 模横向电场方向平行来抑制频带内 TE₂₁ 模式传输。

金属片高度 H 可以通过将金属片之间 TEM 传输模与圆波导主模 TE₀₁ 进行波阻抗匹配确定

$$\tan(kh) - \frac{k}{\beta} = 0, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

这里解得金属片高 H 为 2.24 mm, 金属片长度 L 与宽度 w 可以通过仿真优化确定。通过对金属片尺寸进行多轮迭代优化, 并对原有功率分配网络做细微调整以实现更好的阻抗匹配, 最终结构参数如表 1 所示。

表 1 功分输入结构的最终结构参数

Table 1 Final structure parameter of power divider input structure

a/mm	b/mm	R/mm	R_c/mm	W_1/mm	W_2/mm	W_3/mm	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	d/mm	sheet metal size
7.112	3.556	6.41	4.57	1.78	0.90	3.0	22.9	3.00	12.1	3.556	2.24 mm×7.38 mm×0.5 mm

其输出口各个模式传输效率展示于图 7 中, 插入损耗 S_{21} 的 -0.1 dB 插入损耗带宽为 5.0 GHz, 覆盖范围为 29.5~34.5 GHz 频带, 相较于初始结构的 3.2 GHz 有明显提升。此时, -1 dB 插损带宽为 6.4 GHz, 带内平均模式转换效率高达 98.6% 且带内回波损耗小于 -15 dB。

相比于初始功分输入耦合器, 改进后的器件带内 (1 dB 插损频带) 平均传输效率 η 提升至 98.6%, 增加了 1%; 带内模式纯度 α 提升至 99.3%, 增加了 4%。杂散模式传输效率由最高 7% 下降至最高 2%, 平均值由改进前的 5% 下降

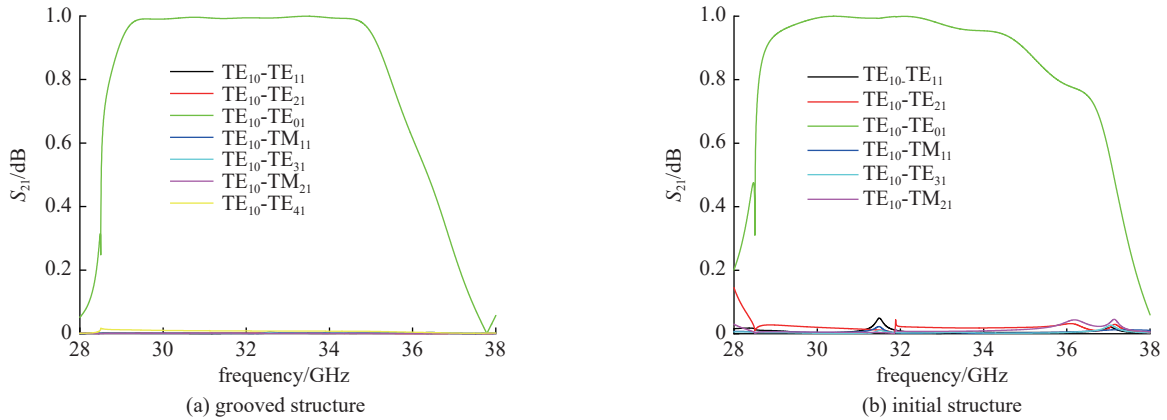


Fig. 7 Transmission performance comparison between grooved and ungrooved structure

图 7 加载金属片前后输出传输性能

至约为 1%。输出口模式纯度得到了一定程度的提高。

改进后的输入耦合器仿真模型及其电场分布分别如图 8 和图 9 所示。此时,器件内最大场强为 $7 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$, 出现在二级功分拐角处,符合高功率微波应用要求。改进前后输出口传输场并未发生明显改变,输出口滤波并不会影响主模 TE_{10} 输出。

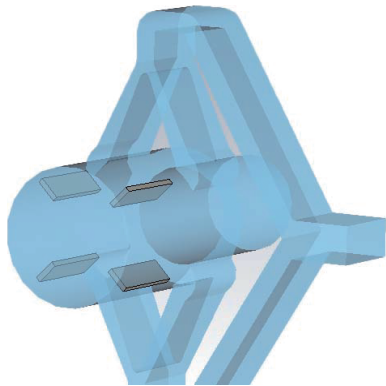


Fig. 8 Power divider input structure with groove filter

图 8 加载金属片滤波的功分输入结构

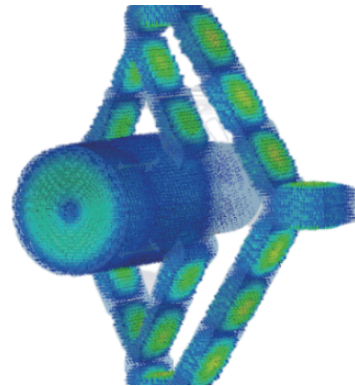


Fig. 9 Electric field distribution of the power divider input structure with groove filter

图 9 加载金属片滤波的功分输入结构传输场

与同类型结构相比,该输入耦合器在模式纯度、最大传输效率以及带宽上均有明显优势,如表 2 所示。

表 2 功分输入结构性能对比

Table 2 Comparison of power divider input structure performance

structure	plug loss relative bandwidth/%	maximum mode conversion efficiency/%	mode purity/%
Qiao Yiming ^[7] . 220 GHz TE_{10} - TE_{01} sidewall coupled mode converter.	1.0 dB bandwidth 6.8	99.0	-
Yu C F ^[8] . High-performance circular TE_{01} -mode converter.	1.0 dB bandwidth 18.2	98.5	99.0
Zhang Qiang ^[10] . Circular waveguide TE_{01} mode converter design.	0.1 dB bandwidth 6.6	99.9	-
Sun Hao ^[9] . W-band cyclotron broad band low-loss input coupler design.	0.1 dB bandwidth 10.5	99.8	96.8
structure of this work.	0.1 dB bandwidth 14.5	100.0	99.3

对金属片尺寸进行结构容差分析后发现:增加金属片长度 L 与深度 H 对杂散模式 TE_{21} 的抑制有明显效果,其中以金属片长度 L 的影响最为显著,而金属片厚度的影响最为微弱,上述结果示意于图 10 中。可以考虑进一步增加金属片长度 L 以提高杂模抑制效果。

3 冷测实验

将两个加载有滤波结构的改进型功分型输入结构以纯铜为基底加工成型,得到实物如图 11 所示,测试时将两个输入结构背靠背连接到矢量网络分析仪的端口 1 与端口 2。使用端口 1 输出微波信号,经过同轴转换器转换为

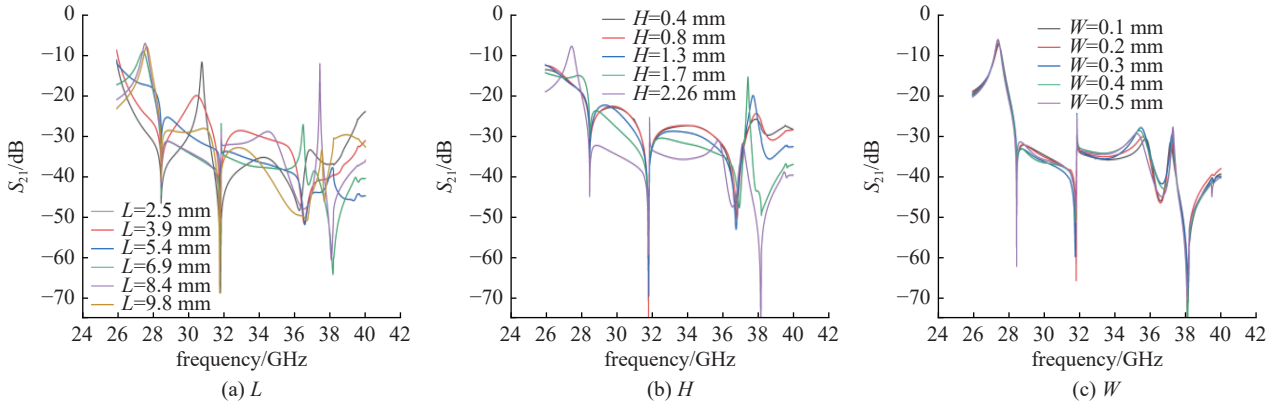


Fig. 10 Influence of metal sheet structure parameters on transmission performance of TE₂₁ mode

图 10 金属片结构参数对 TE₂₁ 模式传输性能影响

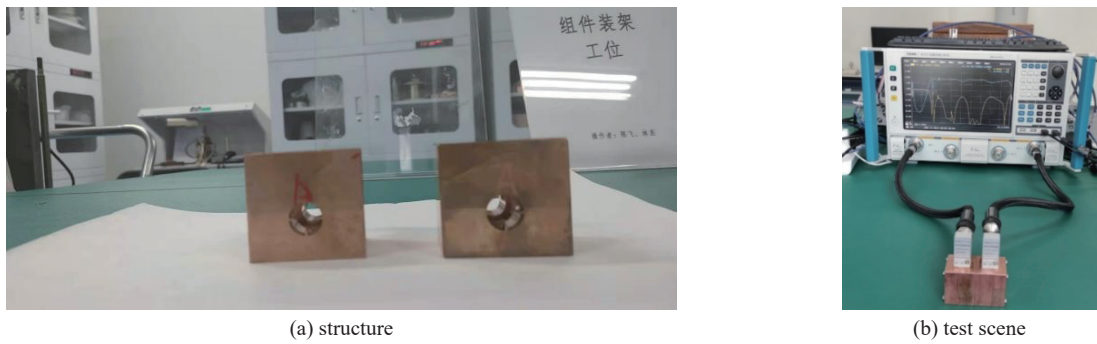


Fig. 11 Back to back cold test experiment of power division input coupler

图 11 功分输入耦合器冷测实验现场

矩形波导基模 TE₁₀ 模式，端口 2 采取同样的设置，输出的矩形 TE₁₀ 模式经过同轴接头转换为 TEM 模式回馈给端口 2。测试前，仔细清洗器件，整个测试在超净间完成。将同轴接头进行归零校准后，固定好器件，在 27~36 GHz 的频带内展开测试，一共扫描 401 个频率点。

经过多次测量后，背靠背的带内 S₁₁ 最大为 -8 dB，整体反射性能对比如图 12 所示。实验结果的整体带宽相较仿真结果稍窄，-8 dB 的反射损耗带宽覆盖在 28.5~34 GHz 的频带，相对带宽为 18%。另外其 -1 dB 的插入损耗带宽约为 5 GHz，覆盖在 29~34 GHz 频段，相较仿真结果的 6 GHz 稍有缩窄，但整体而言吻合得较好。初步分析可能是加工精度误差所致。

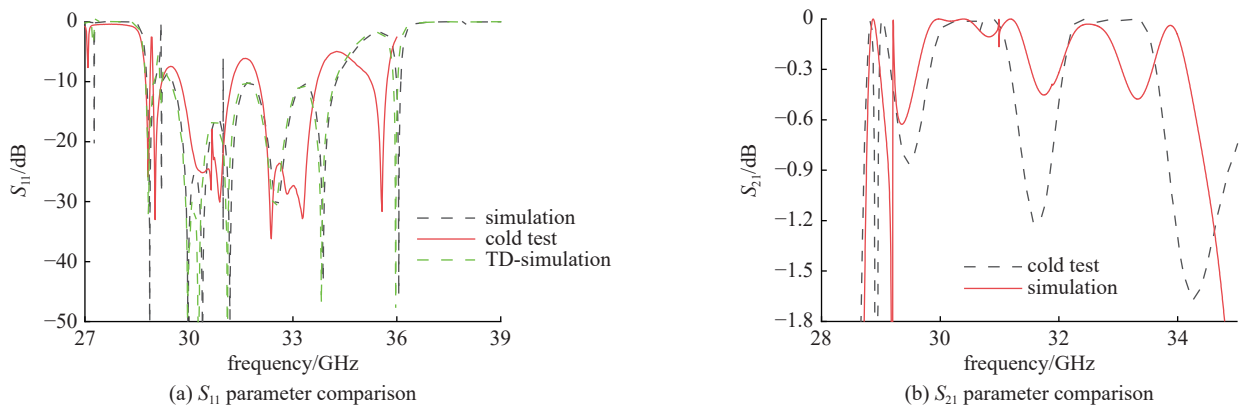


Fig. 12 Comparison between simulation and cold test

图 12 仿真结果与冷测结果对比

4 结论

本文出于 Ka 波段回旋行波管实际需要，基于两级功分网络设计了一种紧凑的高效率输入耦合器。仿真结果表明，该结构具有优良的传输效率，能够在 29.0~35.1 GHz 频带内实现 -0.5 dB 左右的插入损耗，相对带宽大约为

20%。并且在 29.5~34.5 GHz 频带内,能够实现 99% 以上的矩形 TE_{10} 模-圆模 TE_{01} 模式转换效率且带内回波损耗保持在 -20 dB 以下,此时器件内部最大场强为 $7 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$,满足高功率微波应用要求。相较 Yu 等人的 Ka 波段设计方案,0.5 dB 插入损耗带宽增加了约 1 GHz;相比于乔伊民等人设计方案,本方案的 0.5 dB 插损带宽约为其 4 倍。背靠背冷测实验表明:回波损耗 S_{11} 与仿真结果相比最大有 -3 dB 的偏差。在 1 dB 插入损耗带宽上,相较于仿真计算结果缩窄了约 1 GHz。应该是加工误差导致,整体结果良好。本研究为设计高效率的回旋行波管输入耦合器提供了一种有效可行的方案。

参考文献:

- [1] 刘盛纲. 电子回旋脉塞和回旋管的进展[M]. 成都: 四川教育出版社, 1988. (Liu Shenggang. Progress of electronic cyclotron maser and cyclotron[M]. Chengdu: Sichuan Education Press, 1988)
- [2] 王丽, 鄢然, 蒲友雷, 等. 高功率毫米波回旋器件的需求及发展[J]. 真空电子技术, 2010(2): 21-26. (Wang Li, Yan Ran, Pu Youlei, et al. Requirement and development of high power millimeter-wave gyrotron device[J]. Vacuum Electronics, 2010(2): 21-26)
- [3] Chu K R, Barnett L R, Lau W K, et al. A wide-band millimeter-wave gyrotron traveling-wave amplifier experiment[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1990, 37(2): 1557-1560.
- [4] 鄢然. 磁控注入电子枪低频振荡分析及Ka波段回旋行波管研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010. (Yan Ran. The analysis of the low frequency oscillation in magnetic injection gun and research on Ka band gyrotron traveling wave tube[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010)
- [5] 徐勇, 熊彩东, 罗勇, 等. Ka波段 TE_{01} 模回旋行波管宽带输入耦合器的设计[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(3): 208-213. (Xu Yong, Xiong Caidong, Luo Yong, et al. Design of broad-band input coupler of Ka-band TE_{01} mode gyro-TWT[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(3): 208-213)
- [6] 徐寿喜, 刘濮鲲, 张世昌. Ka波段二次谐波回旋速调管放大器输入耦合器的分析与模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16: 477-480. (Xu Shouxi, Liu Pukun, Zhang Shichang. Analysis and simulation of an input coupler for a Ka-band second harmonic gyrokystron amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16: 477-480)
- [7] 乔益民, 兰峰. 220GHz TE_{10} - TE_{01} 侧壁耦合模式转换器的研究[J]. 大众科技, 2013, 15(2): 1-3. (Qiao Yimin, Lan Feng. Investigation of 220GHz TE_{10} - TE_{01} sidewall coupling mode converter[J]. Popular Science & Technology, 2013, 15(2): 1-3)
- [8] Yu C F, Chang T H. High-performance circular TE_{01} -mode converter[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(12): 3794-3798.
- [9] 孙昊, 李浩, 王峨锋, 等. W波段回旋管宽带低损耗输入耦合系统[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 053004. (Sun Hao, Li Hao, Wang Efung, et al. Broad band low loss input coupling system in W-band gyrotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 053004)
- [10] 张强, 袁成卫, 陈俊, 等. 圆波导 TE_{01} 模激励器设计及实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 063033. (Zhang Qiang, Yuan Chengwei, Chen Jun, et al. Investigations on TE_{01} circular waveguide mode transducer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 063033)
- [11] Wu Zewei, Liao Xiaoyi, Wang Keqiang, et al. A circular TE_{02} mode generator with high purity for gyro-TWT study[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(2): 137-140.
- [12] 朱敏, 罗积润, 栾远涛, 等. 采用矩形到同轴扇形渐变 TE_{10}° → TE_{01}° 模式变换器带宽特性的研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1508-1510. (Zhu Min, Luo Jirun, Luan Yuantao, et al. Bandwidth property of the converter with sector taper from a rectangular guide TE_{10}° mode to a coaxial guide TE_{01}° mode[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1508-1510)