

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.03.06

宽带太赫兹非对称十字孔矩形波 导定向耦合器的设计

陈尧, 王凯

(北京航空航天大学 电磁兼容技术研究所 北京, 100191)

摘要: 根据波导定向耦合器原理, 设计了一种太赫兹频段, 采用非对称十字形孔耦合的矩形波导定向耦合器。通过优化波导结构和十字形耦合孔参数, 在 WR4 波导频段内, 实现了稳定的耦合平坦度、良好的方向性和工作带宽。仿真结果表明该型波导定向耦合器耦合度稳定在 $-19.9\text{dB} \sim -22.0\text{dB}$ 之间, 方向性优于 32dB , 相对工作带宽为 40%。

关键词: 波导定向耦合器; 宽频带; 非对称十字孔耦合

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)04-0022-02

A THZ Cross-guide Waveguide Directional Coupler With Unsymmetrical Crossed Slots

CHEN Yao, WANG Kai

(School of Electronics and Information Engineering, BUAA EMC Lab, Beijing 100091, China)

Abstract: A terahertz cross-guide waveguide directional coupler with unsymmetrical crossed slots is proposed in this paper. By adjusting the basic structure of rectangular waveguide and optimizing the parameters of the crossed slots, this waveguide directional coupler realizes a stable coupling flatness, a good directivity and the working bandwidth within WR4 standard waveguide. The simulation results present good coupling flatness value from $-19.9\text{dB} \sim -22.0\text{dB}$, the isolation value is greater than 32dB , and the relative working bandwidth is 40%.

Key words: waveguide directional couple; broad bandwidth; unsymmetrical crossed slot

0 引言

太赫兹波是指频率从 0.1THz 到 10THz 范围的电磁波, 作为介于微波与红外波段之间的重要电磁频谱资源, 太赫兹波近年来逐渐成为通信、雷达、天文、医学成像等研究领域的热点, 太赫兹技术成为重要的、发展极其迅速的交叉学科前沿^[1-2]。为解决太赫兹频段信号的采集和测量问题, 迫切需要研发相应适用的耦合测量装置。

定向耦合器是一种用途广泛、具有良好方向性的功率分配器件^[3]。定向耦合器实质可分为两类, 微带线型以及波导型, 在高频应用中, 插入损耗更低、功率容量更高、工作带宽相对较宽的波导型定向耦合器应用更为普遍。波导定向耦合器的设计方法最早由 Bethe 基于小孔耦合基本理论提出^[4], 后续学者对耦合

器结构进行了研究, 采用了主波导、副波导相交的基本结构, 并对耦合孔的结构和排列进行了优化, 改善了定向耦合器的工作带宽和耦合平坦性^[5], 但要在矩形波导的整个工作带内保持定向耦合器的性能, 仍然较为困难。

本文设计的矩形波导定向耦合器, 通过增加波导阻抗匹配变换段以及优化耦合孔参数, 实现了 40% 的相对工作带宽。该定向耦合器耦合度特性平坦, 非常有利于功率信号的定标测量, 易于加工制造, 具有良好的工程应用价值。

1 定向耦合器设计指标及基本结构

需求的波导定向耦合器核心指标为工作带宽和耦合度, 要求在 WR4 矩形波导的整个工作带内, 能够实现平坦的耦合度 (S_{13}), 同时具备至少 30dB 的端口隔离度 (S_{14})。

设计目标如下:

a) 工作频段 $172\text{GHz} \sim 261\text{GHz}$;

作者简介: 陈尧(1983-), 硕士研究生, 主要研究方向为系统电磁环境效应试验方法、电磁兼容测试系统研发等。王凯(1988-), 硕士研究生, 主要研究方向为电磁兼容与电磁环境效应。

- b) 具备 20dB 耦合度, 带内耦合度变化小于 3dB;
c) 端口隔离度大于 30dB。

采用 Moreno 形式的基本耦合器结构, 主体由主、副两个矩形波导组成, 两个矩形波导以 90° 正交, 在波导的公共宽边上, 设置两个十字形耦合孔, 作为电磁能量从主波导到副波导的耦合通路。按照 Moreno 形式耦合器的经典理论^[6-7], 完成了滤波器的初步设计, 其初始参数为: 波导口面尺寸 $a = 1.1\text{mm}$, $b = 0.55\text{mm}$ (标准 WR4 波导), 十字耦合孔长度 $l = 0.52\text{mm}$ 、宽度 $w = 0.1\text{mm}$, 耦合孔偏离中心距离 $x = 0.3\text{mm}$, $y = 0.3\text{mm}$ 。波导定向耦合器的整体结构示意图见图 1, 中心区域的结构示意图和参数定义见图 2。波导定向耦合器四个端口均为标准 WR4 波导, 采用了阶梯状渐变过渡段逐渐压缩波导高度, 实现整个工作频段的匹配, 通过调整十字形耦合孔的长度、宽度及偏离中心距离等参数, 优化波导定向耦合器性能。本文中波导定向耦合器的建模、仿真和优化均使用 HFSS 全波电磁场仿真软件完成。

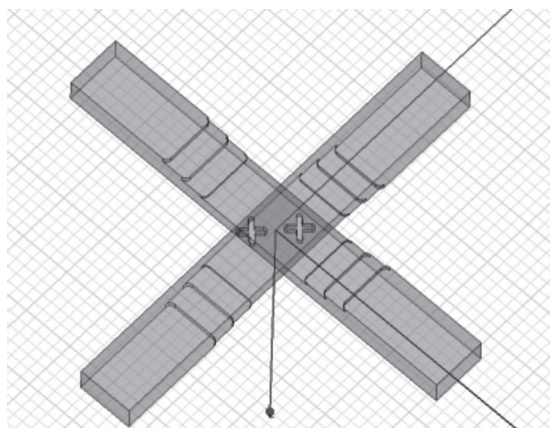


图1 波导定向耦合器结构图

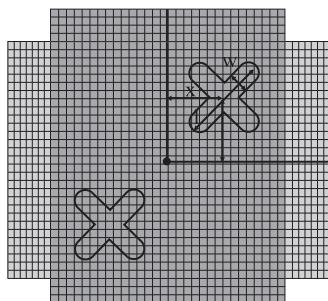


图2 矩形波导中心区域结构示意图

2 仿真及参数优化

首先对矩形波导阻抗匹配变换段进行设计。保持

波导定向耦合器宽度 a 和十字形耦合孔参数固定, 通过设置三段四分之一波长构成的阻抗阶梯, 逐渐降低波导定向耦合器高度 b , 实现阻抗匹配转换。波导定向耦合器高度 b 对波导定向耦合器性能影响 S 参数计算结果见图 3、图 4。

通过调整参数 b , 即压缩波导口面窄边高度, 可获得更好的耦合度和隔离度特性。由仿真结果可知, 随着 b 值不断减小, 耦合度略微减小, 平坦度逐渐增强; 端口隔离度也随之变化。在 $b = 0.35\text{mm}$ 时, 耦合度在 $-20.5\text{dB} \sim -23.1\text{dB}$ 之间, 最大变化量 2.6dB , 端口隔离度大于 40dB 。

相比而言, 初始波导口面窄边高度 $b = 0.55\text{mm}$ 时, 耦合度在中心频率 (217GHz) 附近 3dB 变化区间的频段范围为 $188\text{GHz} \sim 246\text{GHz}$, 相对工作带宽约为 27% 。可见通过阻抗匹配变换段设计, 有效扩展了定向耦合器耦合度平稳段的工作带宽。

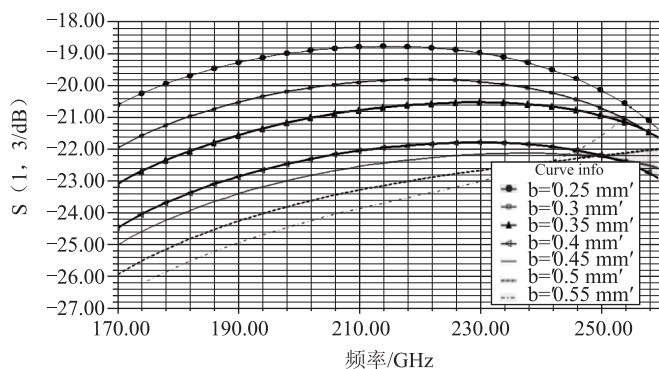


图3 矩形波导高度变化对耦合度的影响

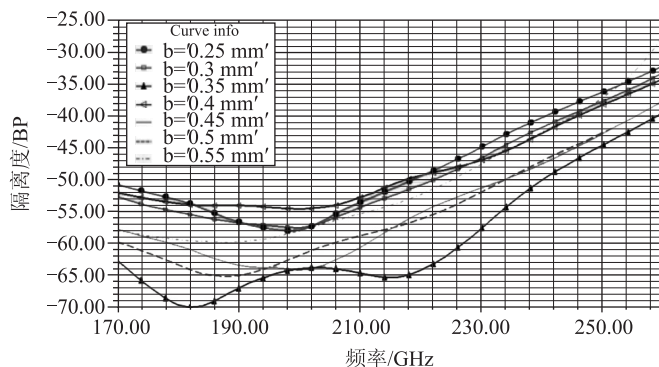


图4 矩形波导高度变化对隔离度的影响

在确定波导口面和阶梯过渡段匹配方案后, 通过调整十字形耦合孔参数, 进一步优化波导定向耦合器性能。调整的十字形耦合孔参数有: 十字耦合孔长度 l 、宽度 w , 偏离中心距离 x , 仿真结果及分析如下:

(下转第 54 页)

6 结束语

(上接第 23 页) 导定向耦合器, 利用电磁场仿真软件 HFSS 完成其主要

3)随着十字耦合孔偏离中心距离 x 增大,耦合度逐渐减小,耦合度平坦性略微恶化;端口隔离度逐渐增大,综合所需性能,确定 $x=0.33\text{mm}$ 。

最终设计完成的矩形波导定向耦合器参数为：波导口面尺寸 $a = 1.1\text{mm}$ ， $b = 0.55\text{mm}$ ，通过阶梯过渡到中心区域处高度 $b_1 = 0.35\text{mm}$ ，十字耦合孔长度 $l = 0.47\text{mm}$ ，宽度 $w = 0.1\text{mm}$ ，偏离中心距离 $x = 0.33\text{mm}$ ， $y = 0.33\text{mm}$ ，S 参数计算结果见图 5。在优化了十字耦合孔的参数后，定向耦合器的耦合度特性更加平稳，耦合度在 $-19.9\text{dB} \sim -22.0\text{dB}$ 之间，最大变化量 2.1dB ，端口隔离度大于 32dB ，技术参数完全满足设计指标要求。

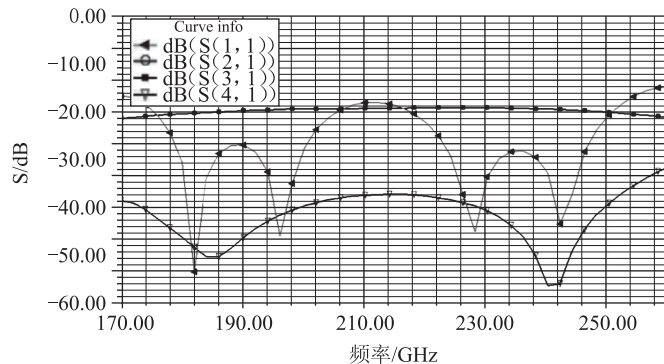


图 5 定向耦合器 S 参数计算结果

3 结论

本文设计了一个工作在 172GHz-261GHz 的矩形波

参考文献

- [1] 国防科工委科技与质量司. 力学计量[M]. 上册. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [2] 国家质量监督与检验总局. JJG 734-2001 力标准机检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2001.

导定向耦合器,利用电磁场仿真软件 HFSS 完成其主要性能的计算。通过矩形波导阻抗匹配设计,使耦合器工作带宽从 27% 扩展到 40%;通过调整十字形耦合孔参数,进一步优化了定向耦合器性能。在定向耦合器工作频段内,具有相当平坦的耦合度特性,耦合度变化为 $-19.9\text{ dB} \sim -22.0\text{ dB}$,非常有利于功率信号测量;隔离度大于 32 dB ,符合设计输入要求。设计完成的耦合器能够工作在整个 WR4 波导频段,具有良好的宽带特性。该矩形波导定向耦合器结构紧凑,性能优异,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] D. L. Woolard. E. R. Brown. M. Pepper. M. Kemp. Terahertz frequency sensing and imaging: A time of reckoning future applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93 (10): 1722-1743.
- [2] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学, 2006, 8(1): 7-12.
- [3] T. Djerafi. W. Ke. Super-compact substrate integrated waveguide cruciform directional coupler[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(11): 757-759.
- [4] H. A. Bethe. Theory of diffraction by small holes[J]. Physics Review, 1944, 66(7): 164-180.
- [5] G. J. Chaturvedi. D. Guha. Analysis and design of a high directivity compact waveguide coupler using 3-hole aperture array [J]. 11th European Microwave Conference, 1981, 5: 724-725.
- [6] W. J. Getsinger. Ridge waveguide field description and application to directional couplers[J]. IRE Trans On Microwave Theory Tech, 1962, 10(1): 41 - 50.
- [7] J. A. Ball. T. M. Sulda. Small aperture crossed waveguide broad-wall directional couplers[J]. In IEEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation, 2000, 147(4): 249-254.