

文章编号: 2095-4980(2021)01-0024-03

0.5 THz 波导双定向耦合器设计

李小玲, 赵广峰

(中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555)

摘要: 介绍了 0.5 THz 波导双定向耦合器的原理分析及仿真设计。采用双排多孔等间距不等孔径的方案, 设计了 0.325~0.5 THz 宽带波导双定向耦合器, 并给出了仿真及测试曲线。测试结果显示, 0.5 THz 波导双定向耦合器在 0.325~0.5 THz 全波导带宽内耦合度为 (7.6 ± 1) dB, 方向性大于 18 dB, 输入端口回波损耗大于 16 dB。该耦合器性能优越, 已用于 S 参数测试系统中。

关键词: 太赫兹; 双定向耦合器; 小孔耦合

中图分类号: TN622

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019408

Design of THz waveguide dual directional coupler

LI Xiaoling, ZHAO Guangfeng

(China Electronics Technology Instruments CO.,LTD, Qingdao Shandong 266555, China)

Abstract: The theory and simulation of the 0.5 THz waveguide dual-directional coupler is introduced. By using scheme of double rows, equal spacing, different diameters of multiple holes, the 0.325–0.5 THz broadband waveguide dual-directional coupler is realized, and the simulation and test curves are given. It indicates that, the coupling factor is $7.6 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$, the directivity is greater than 18 dB, and the return loss of the input port is greater than 16 dB. The coupler has excellent performance and has been applied to S -parameter test system.

Keywords: THz; dual-directional coupler; hole coupled

定向耦合器是一种具有方向性的四端口微波元件, 由以耦合结构相联系的两对传输线构成, 常用于功率的分配, 由两路微波传输线相互耦合而成。从主路输入的微波信号按照设计的耦合度耦合到支路, 按照设计的方向性只在一个方向上传播, 在另一个方向上基本不传播。基于这一特性, 定向耦合器常用于矢量网络分析仪中对主线入射波和反射波分别取样, 实现对主线入射波和反射波的测量。太赫兹定向耦合器是实现太赫兹网络参数测试的关键部件。

1 波导定向耦合器理论分析

波导耦合器^[1-2]主要有支线耦合和小孔耦合两种方式, 最常用的是小孔耦合。这种耦合器插损小, 耦合平坦度高, 方向性好。常见的耦合孔有圆孔、方孔、十字孔等, 由于方孔、十字孔等加工工艺复杂, 成本高, 本文所述太赫兹波导定向耦合器选用圆孔。

Bethe 孔波导定向耦合器是一种单孔耦合器, 为获得定向性, 该单孔需开在 2 个矩形波导的公共宽壁上。如图 1 所示, 由小孔耦合理论可知, 小孔可用电和磁偶极矩构成的等效源来代替, 法向电偶极矩和轴向磁偶极矩在副波导中的辐射具有偶对称性, 而横向磁偶极矩的辐射则具有奇对称性。改变耦合孔中心至波导宽边的间距 s , 调节这 2 个等效源的相对振幅, 可以消除在隔离端口方向的辐射, 增强在耦合端口方向的辐射, 从而获得理想的定向性。

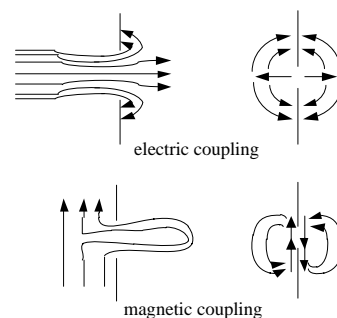


Fig.1 Equivalent electric field and magnetic field of aperture coupling

图 1 小孔耦合及其等效电场和磁场耦合方式

收稿日期: 2019-10-20; 修回日期: 2020-03-29

作者简介: 李小玲(1980-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事微波毫米波无源器件研究。email:quanfy@163.com

单孔耦合器工作频带较窄，可采用图 2 所示的 $N+1$ 个孔等间距多孔耦合的方式实现宽频带应用。设主波导入射波的振幅为 A ，对于小孔耦合情况，可近似认为向端口 2 传输的波振幅仍为 A ，入射场振幅在每个孔处均相同，只是从一个孔到下一个孔的相位发生改变。小孔以不同的振幅激励正向和反向传输波，因此令 F_n 表示第 n 个孔的正向耦合系数， B_n 表示第 n 个孔的反向耦合系数，假定耦合孔均为距波导窄壁为 S 的圆孔，第 n 个孔的半径为 r_n ，由耦合孔分析可知，耦合系数正比于孔的极化率 ae 和 am ，因而正比于 r_n^3 。则正向耦合系数 F_n 和反向耦合系数 B_n 为：

$$F_n = K_f r_n^3 \tag{1}$$

$$B_n = K_b r_n^3 \tag{2}$$

式中 K_f 和 K_b 分别是与正向和反向耦合系数与频率有关的常数，且对所有孔都相同，于是多孔耦合器的耦合度 C 和方向性 D 为：

$$C = -20\lg|K_f| - 20\lg\sum_{n=0}^N r_n^3 \tag{3}$$

$$D = -C - 20\lg|K_b| - 20\lg S \tag{4}$$

式中 $S = \left| \sum_{n=0}^N r_n^3 e^{-2j\beta nd} \right|$ ，其中 β 为传播常数 $\gamma (\gamma = \alpha + j\beta)$ 的虚部。

2 双定向耦合器仿真及制作

由多孔耦合理论可知，孔间距决定孔间电磁波的相移，从而影响耦合电磁场的正向叠加和反向相消效应。实际应用中很难同时实现正向叠加和反向相消效应，特别是多个模式需要抑制时，需要采用多组耦合孔。

本文设计的太赫兹波导定向耦合器采用双排多孔等间距、不等耦合强度的方案，每排耦合孔孔间距相等，孔直径符合切比雪夫分布，以实现在 0.325~0.5 THz 工作频带内获得高方向性和要求的耦合系数。在实际设计中，理论的小孔是分布在有实际厚度的耦合片上，耦合片厚度越大，对耦合平坦度的影响也越大。在低频的波导耦合器设计中，小孔尺寸大，相对来说加工比较容易，一般通过小孔位置的微调来补偿耦合片厚度带来的影响。但在太赫兹频段，波导腔窄，小孔尺寸小，微调位置会对加工工艺带来更大的困难，因此需要选择非常薄的耦合片来降低对耦合平坦度的影响。本设计根据实际加工能力，选择厚度为 0.05 mm 的铜片，镀层厚度为 0.01 mm 软金，进行仿真设计。

耦合器设计采用宽边耦合，在三维仿真软件中建立双排孔的 0.5 THz 波导双定向耦合器仿真模型，为达到耦合度并提高耦合平坦度，每排小孔数量多达 23 个，呈对称分布。通过优化各个孔的直径及位置，得到 0.5 THz 波导双定向耦合器曲线，如图 3 所示，耦合度典型值为 5 dB，方向性大于 37 dB。耦合片如图 4 所示

太赫兹双定向耦合器的双向设计^[3]，减少了加工难度以及多零件带来的加工公差和装配公差，摒弃了常用的三层结构，采用 2 个单定向耦合器并列放置共用耦合片的结构，尽可能减小装配误差，以实现仿真结果。

0.5 THz 波导双定向耦合器工作频率高，频带宽，微波传输腔尺寸小，对波导腔、耦合片的加工精确度和耦合器装配工艺要求很高。图 5 为 0.5 THz 波导双定向耦合器耦合片实物，最小孔直径为 0.1 mm，最大孔直径为

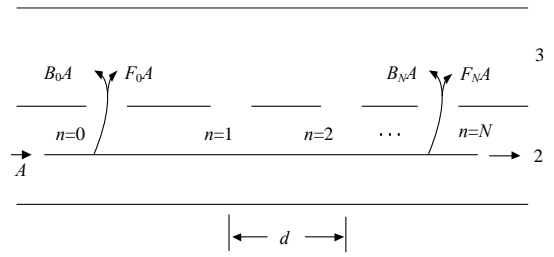


Fig.2 Theory of porous coupled structure
图 2 多孔耦合结构原理

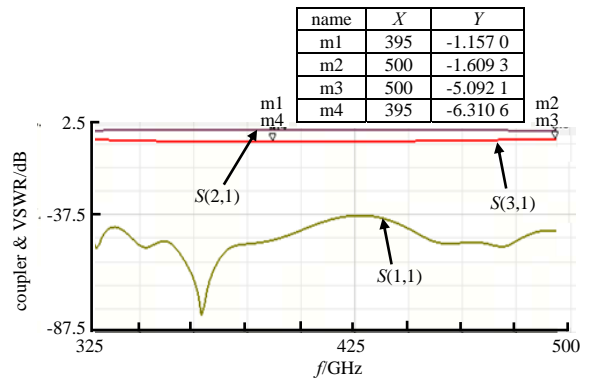


Fig.3 Simulation result for coupling
图 3 耦合器仿真曲线



Fig.4 Sheetmetal for coupling
图 4 耦合片实物

0.23 mm, 相邻小孔之间的距离最小为 0.015 mm, 所有小孔的加工公差为 ± 0.005 mm 以内。精密的加工工艺再辅以镀金工艺及装配工艺, 完美结合才能确保耦合器的可靠性, 提高成品率。

采用中电科仪器仪表有限公司生产的 3672 型网络分析仪主机、3640 控制机以及 3649B 型太赫兹 S 参数扩频模块组成 0.325~0.5 THz 矢量网络测试系统, 测得波导定向耦合器直通插入损耗、隔离度、输入端口回波损耗和直通插入损耗指标如图 6~图 9 所示。测试结果显示, 在 0.325~0.5 THz 全频段内波导双定向耦合器耦合度典型值为 $7.6 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$, 方向性大于 18 dB, 输入端回波损耗大于 16 dB, 直通插损小于 4 dB, 较好地实现了耦合器的功能要求。



Fig.5 Directional coupler
图 5 定向耦合器



Fig.6 Coupling factor vs. frequency
图 6 耦合度测试曲线

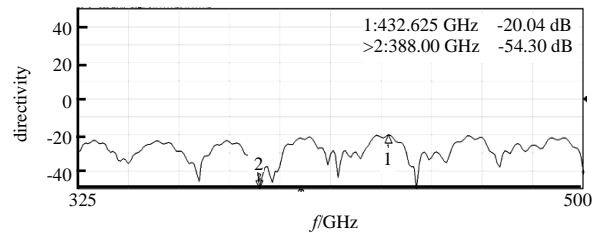


Fig.7 Directivity vs. frequency
图 7 方向性测试曲线

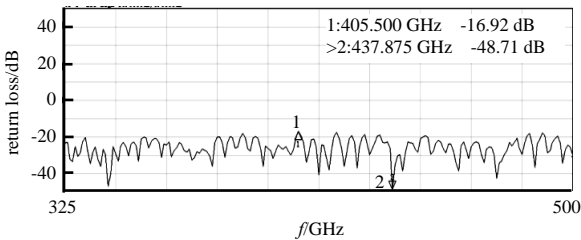


Fig.8 Return loss vs. frequency
图 8 输入端口回波损耗测试曲线

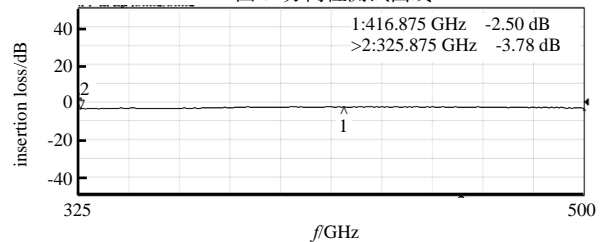


Fig.9 Insertion loss vs. frequency
图 9 直通插入损耗测试曲线

耦合器的实际测试结果与仿真结果相比, 耦合强度稍弱, 因为耦合孔中心间距 0.245 mm, 与小孔的直径差太小, 为避免相邻小孔间金属带形变, 小孔直径加工采用负公差, 一定程度上减小了耦合强度, 导致实际耦合器的耦合度绝对值偏大, 这也是高频耦合器加工与仿真结果不完全一致的通病。另外在隔离度仿真中采用理想的吸收材料^[4], 实际使用的材料吸收性能并不理想, 导致隔离度指标偏离仿真值。若是将来有工作于太赫兹波段性能更好的吸收材料, 方向性指标将有显著提高。

3 结论

本文采用多孔耦合结构和电磁场全波分析法, 实现了 0.325~0.5 THz 波段全频段定向耦合器设计, 成功研制并给出了耦合片实物照片和耦合器测试结果。测试结果表明, 该波导双定向耦合器在 0.325~0.5 THz 全波导带宽内耦合度为 $7.6 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$, 方向性大于 18 dB, 输入端口回波损耗大于 16 dB, 技术指标、稳定性和可靠性满足系统要求, 该定向耦合器已用于 0.325~0.5 THz 频段 S 参数测试系统。

参考文献:

- [1] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994. (LIAO Chengen. Fundamentals of microwave technology[M]. Xi'an, China: Publishing House of Xidian University, 1994.)
- [2] ZHANG Y, WANG Q, DING J. A cross-guide waveguide directional coupler with high directivity and broad bandwidth[J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2013, 23(11): 581-583.
- [3] ORAZI Homayoon. Optimum design of multihole directional couplers with arbitrary aperture spacing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1998, 46(4): 331-345.
- [4] 张也弛. 太赫兹吸收结构设计与研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (ZHANG Yechi. Simulation and design of absorption structure for terahertz range[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)