

新型半模基片集成波导镜像转接段的研究

刘 冰^{1,2}, 刘 伟¹, 徐暑晨¹, 汤红军², 洪 伟²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016; 2. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文提出了半模基片集成波导的镜像转接段设计, 并对其功率分配方面的应用展开了研究. 首先分析了半模基片集成波导应用于功分器设计的局限性, 然后提出了通过镜像转接方式来实现具有双侧开口面的新型半模基片集成波导镜像转接段. 通过仿真分析和实验测试验证了半模基片集成波导镜像转接段结构及其设计方法的可行性. 最后设计了基于镜像转接段且具有对称结构的半模基片集成波导三路功分器. 该功分器的仿真结果与实验数据表明, 采用镜像连接段的半模基片集成波导器件具有良好的传输性能, 有助于拓宽半模基片集成波导在功率分配网络设计方面的应用.

关键词: 半模基片集成波导; 功率分配器; 基片集成波导

中图分类号: TN821 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 06-1246-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.030

The Design of Image Transition of Novel Half Mode Substrate Integrated Waveguide

LIU Bing^{1,2}, LIU Wei¹, XU Shu-chen¹, TANG Hong-jun², HONG Wei²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: This paper investigates the design of image transition junction of half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) and its potential application in the design of power splitter. Firstly, the limitation of applying HMSIW to design power splitter is revealed and then an image transition of HMSIW (ITHMSIW) is proposed followed by the introduction of the design principle. With simulation and experimental analysis, the feasibility of HMSIW equipped with image transition is validated in comparison with HMSIW. After that, an HMSIW crisscross three-way power splitter with image transition junction is designed and tested. The corresponding results illustrate that the HMSIW image transition proposed has good performance and can effectively extend the application areas for HMSIW in microwave and millimeter-wave power splitter design.

Key words: half mode substrate integrated waveguide; power splitter; substrate integrated waveguide

1 引言

在现代微波毫米波系统设计中, 天线阵列小型化的发展趋势对馈电网络设计提出了很高的要求. 采用传统矩形波导设计的馈电网络在加工精度及尺寸等方面有时难以满足要求. 微带形式馈电网络的出现部分解决了这些问题^[1]. 然而微带馈电网络作为一种开放结构在高频情况下会产生额外的能量辐射, 从而引起电磁兼容性问题. 与微带结构不同, 本世纪初出现的基片集成波导 (SIW) 是一种传播 TE 模式电磁波的封闭平面集成波导结构^[2~4], 因为有效地解决了平面波导结构能量外泄的

问题, 引起了广泛的关注并被应用于功率分配器的设计^[5~8]. 当 SIW 工作在主模状态时, 根据等效磁壁原理将其沿对称面切开, 就获得了尺寸更为紧凑、主模工作带宽更宽的半模基片集成波导 (HMSIW) 结构^[9,10]. 然而 HMSIW 在传播方向上非对称的半开放结构虽然简化了平面漏波天线的设计^[11], 但却为天线阵列的功分结构设计带来了不便. 采用 HMSIW 结构的功分器除非与 SIW 结合使用, 否则只能以非对称的侧馈方式来实现功率分配^[12]. 这种结构上的特点, 限制了 HMSIW 在阵列天线馈电网络设计方面的应用.

本文在现有半模基片集成波导的基础之上, 提出了

半模芯片集成波导镜像连接段 (ITHMSIW) 的设计. 与 HMSIW 相比, ITHMSIW 在传播方向的两侧均有开口面, 这为设计对称形式的功率分配器提供了必要条件. 本文第二节主要介绍了 ITHMSIW 与 HMSIW 在结构设计上的异同, 然后给出了设计 ITHMSIW 的方法. 本文第三节通过仿真分析与实验测试, 对比了 ITHMSIW 与 HMSIW 在性能上的差异, 验证了 ITHMSIW 作为导波结构使用的可行性, 然后设计了具有对称形式的 ITHMSIW 三路功分器. 文章最后总结了 ITHMSIW 的提出有助于拓宽 HMSIW 在天线馈电网络方面的应用.

2 设计原理

与 HMSIW 相比, 本文所提出的 ITHMSIW 在尺寸上没明显的变化, 在加工工艺上同样可以采用标准的单层或多层 PCB 技术来实现, 但是在结构上却存在着一定的差别, 因此有必要对 ITHMSIW 直通结构及 ITHMSIW 十字形镜像转接段及相应功分器结构的设计进行分别说明.

2.1 镜像转接段的设计

如图 1 所示, 与 HMSIW 相比, ITHMSIW 在结构中加入了一个双向镜像连接段. 该连接段由一段上表面金属层嵌入了纵向空气槽的 HMSIW 及其旋转 180 度后所得镜像结构组合而成. 该连接段把 HMSIW 的开口面从传播方向的一侧以镜像的方式移到传播方向的另一侧, 从而得到具有双侧开口面的镜像连接半模芯片集成波导.

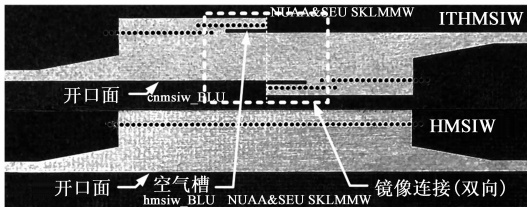


图1 半模芯片集成波导的镜像转接段

在图 2 所示的 ITHMSIW 的电场分布图中, 当电磁波从左侧 HMSIW 的入射端进入后, 沿着 HMSIW 的开口面 (位于下侧) 向前传播, 在进入镜像转接段时, 由于转接段在下侧开口面增加了金属化通孔列, 而在另一侧 (上侧) 取消了原来的金属化通孔列, 这种结构上的变化将迫使穿过镜像转接段的电磁能量转而沿着右侧 HMSIW 的开口面一侧 (上侧) 向前传播. 从图 2 所示的电场分布可以发现, 这种镜像转接的结构设计并没有改变 HMSIW 内部的半模传播特性. 需要指出的是, 这种传播特性的保持是有条件的. 在图 3 所示的 ITHMSIW 结构参数示意图中, 空气槽的尺寸及位置是影响传播特性的关键. 如果空气槽的宽度值 (W_6) 与长度值 ($L_6-L_5-L_4$) 偏高, 则该镜像转接段会变成一根宽度为 W_3

微带线, 而与 HMSIW 阻抗匹配的微带线宽度为 W_2 , 所以这种情况会引起阻抗失配. 另外, 空气槽与 HMSIW 侧壁金属化通孔之间相距 L_4 , 这段结构实际是 HMSIW 与镜像转接段之间的阻抗匹配段. 因此在设计 ITHMSIW 时, 与空气槽的位置相关的参数需要从阻抗匹配的角度进行仔细的分析与优化, 而其它参数的优化则可以按照 HMSIW 设计方法进行^[8]. 图 3 中相关参数的具体数值列于表 1 内.

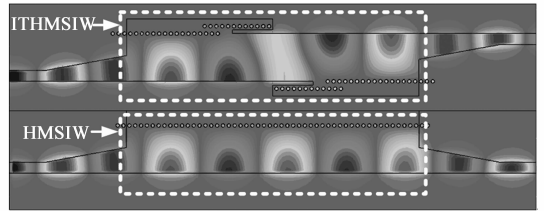


图2 ITHMSIW与HMSIW的电场分布图

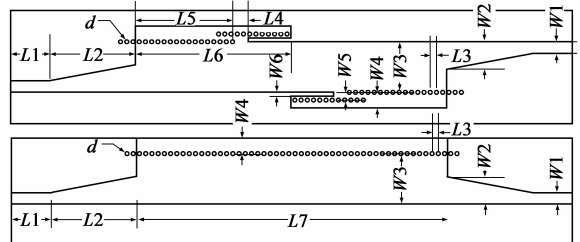


图3 ITHMSIW的结构参数示意图

表 1 ITHMSIW 结构参数 (单位: mm)

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8	L_9	L_{10}
5.0	11.0	0.8	2.0	12.5	20.0	8.0	15.0	1.1	1.5
W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	d	r		
1.5	3.5	6.5	2.0	1.0	0.5	0.5	1.0		

2.2 T 形镜像转接段的设计

按照上面提出的 ITHMSIW 结构, 我们设计过三款 ITHMSIW 的 T 形转接段, 并在其基础之上, 实现了双路功率分配器的设计. 这些 T 形镜像转接段与传统 SIW 的 T 形转接段相比, 在结构上完全采用了 HMSIW, 因此在尺寸上更加紧凑, 性能上也没有明显的变化. 由于具体的设计过程与相关的结构参数以及测试性能可以从文献^[13]中获知, 这里就不重复介绍了.

2.3 十字形镜像转接段的设计

在上面 T 形镜像转接段的设计的基础之上, 我们进一步设计了一款十字形镜像转接结构 (如图 4 所示), 并用于三路功分器的设计之中. 这种结构是在文献^[13]中提及的第三种 T 形镜像转接段的基础之上进一步创新之后得到的 (如图 5(d) 所示). 虽然设计难度比 T 形转接段更高, 但是比较容易扩展为多路功分结构, 同时也便于检验 ITHMSIW 在对称功分结构设计上的适用性.

从图 4 中可以看出, 该功分器是由四个 HMSIW 支

路与一个四向镜像连接段组合而成,其中端口1为输入端,其余三个端口为输出端.与双向镜像连接段不同,四向镜像连接段中的空气槽呈L形,其目的同样是为了实现良好的阻抗匹配.当电磁波从端口1进入后,沿着 HMSIW 开口面一侧向前传播,在进入十字形镜像转接段时,少部分电磁能量会沿着L形的空气槽向水平方向上的两条 HMSIW 支路(端口2与端口4).当电磁波传播到十字形镜像转接段中心处,会遇到放置在支路3的入口处的两个对称放置的金属化通孔,部分能量被这一对金属化通孔分割后从进入端口3所在的支路,其余能量分别进入水平方向的两条支路(端口2与端口4).这对金属孔位置(L_9, L_{10})的变动,会影响三个输出端口输出功率的幅度平衡度.由于图4中的大部分参数与图3中相同,即具有相同的参数值.所以两图的参数合并列于表1之中.

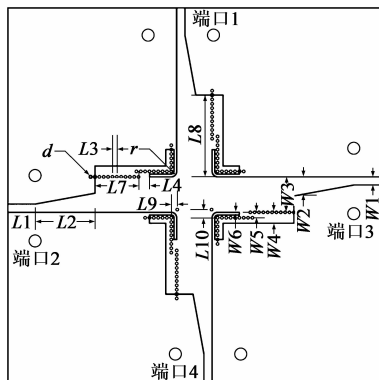


图4 ITHMSIW功分器结构参数示意图

3 仿真与测试

本文所提及的 ITHMSIW 及 HMSIW 结构均在 CST MICROWAVE STUDIO® (MWS)中进行了有耗条件下的仿真分析,并利用标准 PCB 工艺在 0.5mm 厚的单层 Rogers RT/Duroid 5880 介质基板上进行了加工.介质基板相对介电常数为 2.2,损耗正切为 0.0009.测试中使用了安捷仑公司的 E8368B 矢量网络分析仪与配套的 85056D 校准件.

图5所示为实物照片.通过对 ITHMSIW 直通结构(图5(a))与 HMSIW 直通结构(图5(b))在相同条件下进行的仿真与测试,可以获得图6中的 S 参数曲线.从中可以看出:

(1)在 12 ~ 14.7GHz 内,ITHMSIW 直通结构的实测插损在 0.98 ~ 1.11dB,而 HMSIW 对应的数据为 0.76 ~ 0.93dB.通过对图5(c)所示的微带转接段的测试可知,测试中用到的 2.4mm 接头(一对)、阴-阴转接头(一只)与微带转接段(一对)的合计插损约为 0.4dB,因此该 ITHMSIW 直通结构的实际插损约为 0.58 ~ 0.71dB,在 13.8GHz 处的插损为 0.58dB.

(2)对比 ITHMSIW 与 HMSIW 的 S_{21} 测试曲线可以看出,双向镜像连接段的实测插损约为 0.2 ~ 0.3dB,在 13.8GHz 为 0.2dB.相应的仿真数据为 0.22dB.

(3)两种直通结构的测试数据在 11 ~ 14.2GHz 内与仿真数据较为接近,但在 14.2GHz 以上的频段内偏差增大.由于在结构设计时已经考虑到了 PCB 工艺的精度以及介质基板的稳定性,因此这种现象很可能是由测试所用的 2.4mm 接头的性能变化造成的.该接头标称最高工作频率为 18GHz,但实际性能从 14.2GHz 已经开始下降.

(4)由于 HMSIW 与微带之前的转接段结构是基于阻抗匹配思想设计成的一种宽带导波结构,其匹配性能的好坏在一定程度上是会受到频率变化的影响,本文中用到的转接段在较高频率处的匹配性能更好,插入损耗更小,因此频率升高时,仿真结果会显示出 S_{21} 的仿真性能会有所提升.

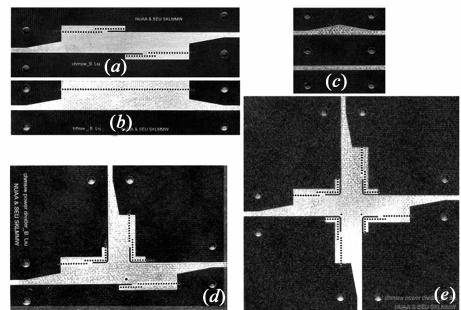


图5 ITHMSIW实物照片

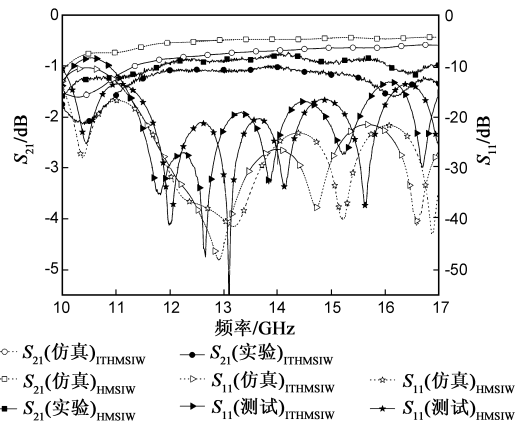


图6 ITHMSIW与HMSIW性能对比

图5(e)所示为采用十字形镜像转接段的功率分配器,其对应的 S 参数测试及仿真数据如图7所示,输出端相位的测试结果如图8所示.

从图7与图8中可以看出:

(1)在 14.2GHz ~ 16.0GHz 频段内,三个输出端口的功率平衡度(测试值)为: 6.55 ± 0.5 dB,等功分点 ($S_{21} = S_{31} = S_{41}$ 处)在 14.6GHz.考虑到测试接头及微带转接段的插入损耗为 0.4dB,因此该功分器的插入损耗约为 1.4dB.

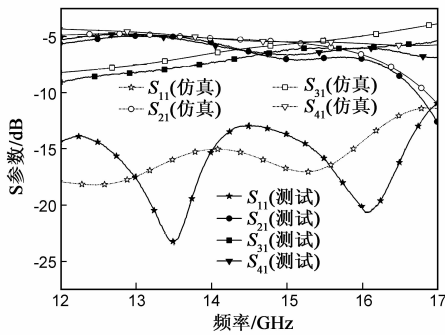


图7 ITHMSIW功分器的实验与仿真数据

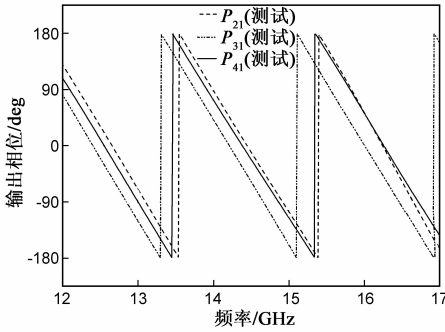


图8 ITHMSIW功分器输出端相位实验数据

(2)比较测试结果与仿真数据可以发现,等功分点从 15.2GHz 向低频方向漂移至 14.6GHz. 由于测试时,端口 1 与一个输出端口分别与 E8368B 的测试电缆相连,剩下两个输出端口分别与匹配负载和吸波材料相连接,而吸波材料的吸波效果与工作频率和材料的摆放位置密切相关,因此这种偏移现象有可能是吸波材料的使用引起的.

(3)三个输出端口的相位并不相等.在等功分点处端口 2 与端口 4 的相位差为 11 度.端口 3 与端口 2、4 之间的相位差分别为 48 度和 37 度.因此这是一个非同相功分器结构.

(4)需要指出的是,与其它基于 SIW 的功分器一样^[5-7],由于结构上的局限,图 4 中所介绍的这种功分器结构输出端口之间的隔离度性能也比较一般.

4 结论

本文根据现有半模基片集成波导的结构特点,提出了具有双侧开口面的半模基片集成波导镜像连接段,研究了该镜像转接段对于 HMSIW 在功率分配结构中的应用.仿真结果与实验数据的对比分析表明,采用镜像转接段的半模基片集成波导不仅继承了半模基片集成波导原有的传输特性,还能可以用于对称结构的功分器设计,对于拓宽半模基片集成波导在阵列馈电网络中的应用有所帮助.

参考文献

[1] H Wang, DG Fang, XG Chen. A compact single layer

monopulse microstrip antenna array [J]. IEEE Trans, 2006, AP-(54): 503 - 509.

[2] 李皓,华光,陈继新,洪伟,崔铁军,吴柯.基片集成波导和微带转换器的理论与实验研究[J].电子学报,2003,31(12A):2002 - 2004.

LI Hao, HUA Guang, CHEN Jin-xin, HONG Wei, CUI Tie-jun, WU Ke. Theoretical and experimental investigation on the transition between the substrate integrated waveguide(SIW) and microstrip[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 2002 - 2004. (in Chinese)

[3] 赵晖,崔铁军.基片集成波导的混合左右手结构及其应用[J].电子学报,2007,35(6A):108 - 111.

ZHAO Hui, CUI Tie-jun. Composite right/left handed structure realized by substrate integrated waveguide and its applications [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6A): 108 - 111. (in Chinese)

[4] 朱红兵,洪伟,汤红军,陈继新.紧凑型基片集成波导功率合成放大器研制[J].电子学报,2010,38(9):2158 - 2161.

ZHU Hong-bing, HONG Wei, TANG Hong-jun, CHEN Ji-xin. Development of compact power combining amplifiers based on substrate integrated waveguide technology[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2158 - 2161. (in Chinese)

[5] S Germain, D Deslandes and K Wu, Development of substrate integrated waveguide power dividers[A]. Electrical and Computer Engineering Proceedings [C]. New York: IEEE, 2003. 1921 - 1924.

[6] ZC Hao, W Hong, JX Chen, XP Chen, K Wu. A novel feeding technique for antipodal linearly tapered slot antenna array[A]. Microwave Symposium Digest [C]. New York: IEEE, 2005. 1641 - 1643.

[7] 刘冰,洪伟,郝张成,陈继新.基片集成波导梳状交替相位功分器[J].电子学报,2007,35(6):1061 - 1064.

LIU Bing, HONG Wei, HAO Zhang-cheng, CHEN Ji-xin. Alternate phase substrate integrated waveguide (SIW) power divider[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1061 - 1064. (in Chinese)

[8] B Liu, W Hong, ZQ Kuai, XX Yin, GQ Luo, JX Chen, HJ Tang, K Wu. Substrate integrated waveguide (SIW) monopulse slot antenna array[J]. IEEE Trans, 2009, AP-(57): 275 - 279.

[9] W Hong, B Liu, YQ Wang, QH Lai and K Wu. Half mode substrate integrated waveguide: a new guided wave structure for microwave and millimeter wave application[A]. Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics Proceedings[C]. Shanghai: IEEE, 2006. 219 - 219.

[10] 翟国华,洪伟,吴柯,韦婧.集成宽带折叠半模基片集成波导带通滤波器[J].电子学报,2010,38(4):825 - 829.

ZHAI Guo-hua, HONG Wei, WU Ke, WEI Jing. Compact wideband folded half mode substrate integrated waveguide bandpass filters[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 825

- 829. (in Chinese)

- [11] JF Xu, W Hong, HJ Tang, ZQ Kuai, K Wu. Half-mode substrate integrated waveguide (HMSIW) leaky-wave antenna for millimeter-wave applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, (7): 85 - 88.
- [12] B Liu, W Hong, L Tian, HB Zhu, W Jiang, K Wu. Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) multi-way power [A]. Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings [C]. Yokohama: IEEE, 2006. 917 - 920.
- [13] B Liu, B Tian, ZS Xie, SC Xu P Chen. A novel image transition in half mode substrate integrated waveguide power divider design [A]. Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference Proceedings [C]. Harbin: Microwave and EMC Lab, Harbin Institute of Technology, 2011. 621 - 625.

作者简介



刘冰男, 1976年10月出生. 南京航空航天大学电子信息工程学院副教授, 硕士生导师. 研究方向为: 微波平面集成电路, 天线与毫米波系统, 无线通信中射频技术.

E-mail: doctice@hotmail.com



刘伟男, 1987年1月出生, 南京航空航天大学电子信息工程学院硕士研究生. 主要从事微波平面集成电路方面的研究.

E-mail: lw_nuaa@yahoo.cn