

基板集成波导和微带转换器的理论与实验研究

李 皓¹, 华 光¹, 陈继新¹, 洪 伟¹, 崔铁军¹, 吴 柯^{1,2}

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 加拿大蒙特利尔大学工学院电子及计算机系, 蒙特利尔, 加拿大)

摘 要: 基板集成波导 (SIW) 技术中非常重要的问题之一是该类波导与其它形式传输线的过渡问题. 最近已有文章探讨了 SIW 与微带线过渡的一种锥形结构, 在本文中对此类结构进行了全面的拓展, 分析了直接过渡、凸型过渡和凹型过渡几种情况, 并实验验证了 C 波段的微带-SIW 转换器. 实验结果表明, 在 4.1 ~ 5.5 GHz 的频段内, 驻波比小于 1.2, 插损优于 0.5 dB.

关键词: 转换器; 波导; SIW; 混合电路

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-2002-03

Theoretical and Experimental Investigation on the Transition between the Substrate Integrated Waveguide (SIW) and Microstrip

LI Hao¹, HUA Guang¹, CHEN Jin-xin¹, HONG Wei¹, CUI Tie-jun¹, WU Ke^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Poly-Grames Research Center, Ecole Polytechnique de Montreal, Montreal, Canada)

Abstract: One of the principal problems in studying the substrate integrated waveguide (SIW) is the transition of SIW with other types of transmission lines. Recently a taper transition between microstrip line and SIW has been proposed. In this paper, the idea has been extended to more general cases, and several new transition types have been developed, including the direct, concave, and convex transitions, and the transition with multilayers. An experimental study has been made at the C band, which shows that a VSWR less than 1.2 through the band 4.1 to 5.5 GHz and an insertion loss better than 0.5 dB can be obtained.

Key words: transition; waveguide; SIW; hybrid circuit

1 引言

基板集成波导是一类新型波导^[1~4], 可以广泛地应用于微波及毫米波电路中. 此类波导的一个重要性质是具有与传统矩形波导相近的传播特性, 诸如品质因数高、易于设计等, 同时较传统波导更为紧凑, 具有体积小、重量轻、容易加工和集成等优点. 但是由于微波有源器件大都是表面封装或芯片形式, 在安装时需要共面电路结构—如共面波导、微带线等. 因此, 基板集成波导与共面传输线的过渡问题是这项技术推广的一个重要前提, 设计这类转换的最重要的指标是带宽及回波损耗. 文献[2]给出了一种锥形的微带-SIW 转换器结构. 在本文中, 我们对此类结构进行了全面拓展, 提出了两类共四种微带线与 SIW 的过渡形式. 数值计算和实验结果均表明这类转换器可以达到设计的要求.

2 结构分析与数值模拟

微带线与 SIW 的过渡形式可以分为两类: 第一类为共面形式, 即微带线与 SIW 的一个宽面在同一层介质基片上, 这类结构可以仅用一层介质基片实现, 加工工艺简单; 第二类为

异面形式, 微带线与 SIW 的宽面分布在不同层的介质基片上, 通过小孔或缝隙发生耦合.

2.1 共面形式

共面形式的微带-SIW 转换器的基本结构示于图 1. 可以直观地发现微带线所支持的电场结构与 SIW 的主模式 (TE_{10}) 的场结构具有一种自然的相似性, 因此有理由相信这是一种自然的过渡. 对于传统的矩形波导, 某一模式的等效阻抗为

$$Z = (b/a) Z_c$$

其中 Z_c 为该模式的特性阻抗. 由于 SIW 的传播特性与传统的矩形波导颇为相近^[1], 仅传播常数有微小差异. 因此可以认为此公式也可用于 SIW 等效阻抗的计算, 在设计时应保证在所需的工作频段微带线的特性阻抗与 SIW 的等效阻抗相匹配. 三种基本的转换形式示于图 2, 居中的一种可以与其它形式相结合来做输入输出端的阻抗匹配. 我们采用时域有限差分法 (FDTD) 分析了这类过渡结构, 结果表明选择不同的结构对于匹配的设计非常重要, 如图 3 所示凹型过渡的最佳工作频段明显异于直接过渡结构. 可以通过改变 SIW 的宽窄边尺寸和介电常数来调节两种传输线之间的匹配.

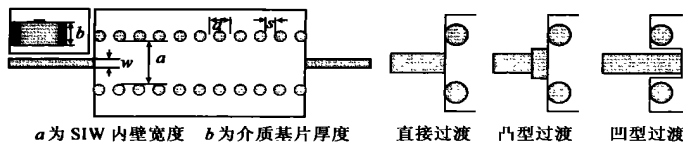


图 1 共面形式微带-SIW 转换器 图 2 共面形式的三种基本转换形式

2.2 异面形式

多层板技术已在微波及毫米波电路中得到广泛应用,它提供了更为紧凑的系统设计平台和更佳的性能.文[5~8]用到了多层电路中的耦合结构,但并没有对这种结构本身做详细讨论.异面形式的微带-SIW 过渡的基本结构如图 4 所示,

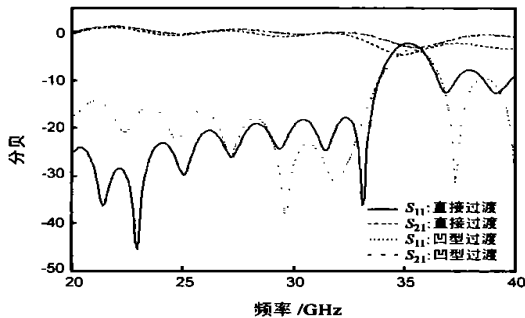


图 3 直接过渡与凹型过渡的散射参数比较

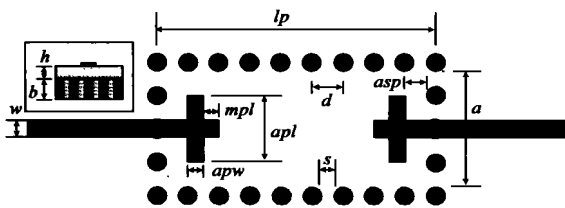


图 4 不同介质层间的微带-SIW 转换: apl 、 apw 为耦合缝隙的长度和宽度, h 、 b 为两层介质基片的厚度

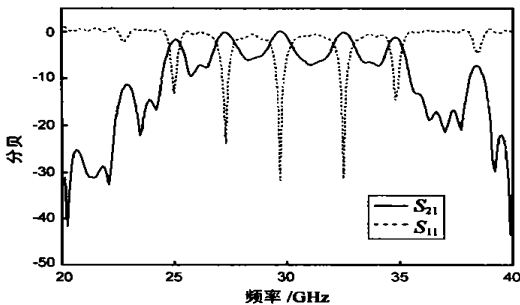


图 5 不同介质层的微带-SIW 转换散射参数: 图中五个峰值点对应于表 2 中加黑的谐振频率

表 1 不同层间微带-SIW 转换器的几何尺寸

w	a	b	d	s	r
1.1mm	3.5mm	0.6mm	2.0mm	1.0mm	5.9
h	mpl	apw	apl	asp	lp
0.3mm	1.0mm	1.0mm	2.1mm	2.0mm	27.0mm

这类结构很容易在低温共烧陶瓷(LTCC)上实现.为得到强的耦合,一般上面一层介质片的厚度 h 远小于下一层的厚度 b .设计这类转换器的关键要素是耦合孔径的尺寸和位置,我们所设计的结构的几何尺寸如表 1 所示.可以看到底层的金属通孔形成一个闭合的腔体,在腔体的上表面有两个矩形的耦合缝隙.能够预见这种结构将在几个频率谐振点上得到较好的传输.分析的结果验证了上述结论,如图 5 所示.

谐振模式的传播常数满足:

$$k^2 = \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{lp}\right)^2$$

其中, $k = \sqrt{\mu}$.

由此我们计算了相应于传统矩形波导谐振腔在 25 ~ 35GHz 范围内的谐振频率(表 2).有趣的是,在 11 个谐振模式中仅有 5 个得到传播,对应于图 5 中的 5 个峰值点.这 5 个模式分别是 TE_{108} 、 TE_{109} 、 TE_{1010} 、 TE_{1012} 和 TE_{1013} ,对这种现象的解释是耦合的强度依赖于缝隙的位置和模式及其场分布,当某种模式的切向场值在缝隙处较大时,将产生强的耦合,反之则耦合较弱,不会发生传播.

表 2 25 ~ 35 GHz 间的谐振频率

l	m	n	Freq (Hz)	l	m	n	Freq (Hz)
1	2	0	35337967570.9690	7	1	0	23808982035.5806
2	2	0	35559024697.4674	7	2	0	38723746180.5890
3	2	0	35924430588.1410	8	1	0	25401359265.0432
4	2	0	36429841874.3213	9	1	0	27093148021.4429
5	1	0	21011647780.8069	10	1	0	28866875084.9597
5	2	0	37069532437.7415	11	1	0	30708345362.2682
6	1	0	22337286963.4661	12	1	0	32606083218.7008
6	2	0	37836692265.2643	13	1	0	34550818240.6751

3 实验结果

我们在 C 波段做了各类过渡形式的实验.图 6(a)、6(b)

给出了单排和双排金属化孔的直接过渡形式的电路板,相应的结果示于图 7(a)、7(b).图 7(a)对应的 SIW 的孔间距 $s = 1.0\text{mm}$,而图 7(b)对应于 $s = 2.0\text{mm}$.介质基片的厚度 $h = 1.5\text{mm}$, $r = 3.0$,SIW 均由 32 个周期的金属孔构成.从实验结果可以看出:SIW 的传播特性与传统的矩形波导极为接近,对

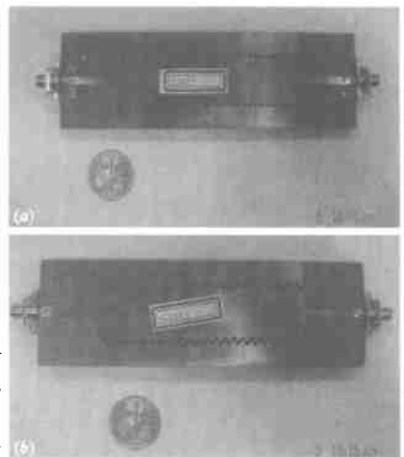


图 6 (a)微带-SIW 直接过渡结构—单排金属化孔;(b)微带-SIW 直接过渡结构—双排金属化孔

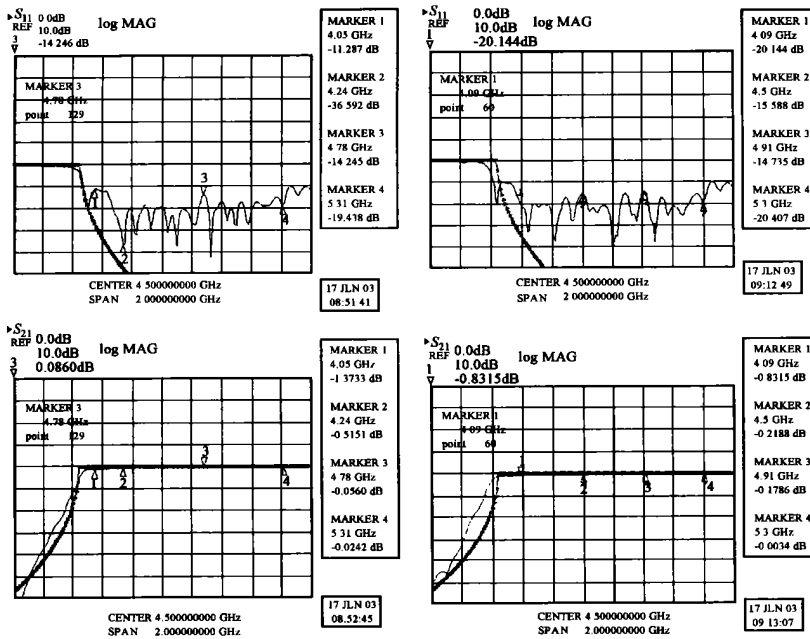


图7 (a)对应于图6(a)转换器结构的散射参数,实线代表测量数据,三角线代表模拟数据;(b)对应于图6(b)转换器结构的散射参数,实线代表测量数据,三角线代表模拟数据

于一个宽边尺寸 $a = 22.0\text{mm}$ 的矩形波导,其主模的截止频率为 $f_c = 3.9\text{GHz}$,这正是图7(a)、7(b)中的SIW的截止频率。由于工作频段低, $s \ll \lambda$,因此不同的孔间距对传播特性的影响很小。我们也分析了X波段和 K_a 波段的微带-SIW过渡结构,数值模拟的结果示于图3,在20~26GHz的频段内驻波比较好。实验表明在毫米波段SIW的传播损耗要远小于同长度微带线的损耗。

4 结论

在本文中我们分析了两类微带-SIW转换器,这种转换是基于SIW的混合集成电路设计的基础。实验及数值分析表明,SIW可以很好地实现与微带电路的过渡,而且具有很大的灵活性。

参考文献:

[1] H Li, W Hong, et al. Substrate integrated waveguide based on LTCC [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Philadelphia, USA: IEEE, 2003. 2045 - 2048.
 [2] K Wu, F Boone. Guided-wave properties of synthesized nonradiative dielectric waveguide for substrate integrated circuits (SICs) [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Phoenix, USA: IEEE, 2001. 723 - 726.
 [3] D Deslandes, K Wu. Integrated transition of coplanar to rectangular

waveguides [A]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest [C]. Phoenix, USA: IEEE, 2001. 619 - 622.

[4] Y Cassivi, K Wu. Hybrid planar NRD-guide magic tee junction [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Technique, 2002, MTT-50(10): 2405 - 2408.
 [5] Y Huang, K L Wu, et al. An integrated LTCC laminated waveguide-to-microstrip line T-junction [J]. IEEE Microwave Wireless and Components Letters, 2003, 13(8): 338 - 339.
 [6] J Papapolymerou, J C Cheng, et al. A micromachined high-Q x-band resonator [J]. IEEE Microwave Guided Wave Letters, 1997, 7(6): 168 - 170.
 [7] C A Tavernier, R M Henderson, et al. A reduced-size silicon micromachined high-resonator at 5.7GHz [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Technique, 2002, MTT-50(10): 2305 - 2314.
 [8] H J Hsu, M J Hill, et al. A duroid-based planar EBG cavity resonator filter with improved quality factor [J]. IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters, 2002, 1(2): 67 - 70.

作者简介:



李 皓 男, 1971年2月生于山东枣庄, 1993和2000年分别于解放军信息工程学院和国防科技大学获得学士和硕士学位, 现为东南大学毫米波国家重点实验室博士研究生, 研究方向为通信系统中的射频技术。



华 光 男, 1958年8月生于河北唐山, 东南大学毫米波国家重点实验室副教授, 在职博士, 长期从事天线微波领域国防科研工作, 主持并完成了“863”项目“分布式相控阵雷达天线”课题, 参与了机载预警雷达有源相控阵, 新一代机载火控雷达相控阵天线等多项国防预研课题, 现主要从事研究雷达中的天馈系统和B3G移动通信的天线系统。

通信的天线系统。

洪 伟 男, 1962年10月生于河北张家口, 1985和1988年分别于东南大学获硕士、博士学位, 现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师, 主要从事电磁理论与微波技术方面的科研与教学工作。

崔铁军 男, 1965年9月生于河北承德, 分别于1990和1993年在西安电子科技大学获得硕士、博士学位, 现为东南大学无线电工程系教授、博士生导师, 主要从事计算电磁学、电磁散射与逆散射、微波毫米波电路的全波分析等方面的科研与教学工作。