

一种新型 X 波段基片集成波导双模带通滤波器

秦培元, 石小林, 梁昌洪, 吴 边

(西安电子科技大学 天线与微波技术重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出一种具有对称传输零点的基片集成波导双模带通滤波器. 该滤波器含有两个双模矩形基片谐振腔, 通过在谐振腔中引入电感不连续性, 可以产生简并模式的耦合; 每个谐振腔中不同模式间的相位差在通带两边各引入了一个传输零点, 极大地改善了阻带特性. 采用该方法设计了一个新型 X 波段双模带通滤波器, 仿真与测试结果吻合.

关键词: 基片集成波导; 双模谐振器; 传输零点

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)05-0831-04

Novel X-band dual-mode bandpass filter based on the substrate integrated waveguide

QIN Pei-yuan, SHI Xiao-lin, LIANG Chang-hong, WU Bian

(Key Lab. of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper presents a novel dual-mode filter with symmetric transmission zeros based on the substrate integrated waveguide(SIW). This filter contains two dual-mode SIW rectangular cavities. By making use of the inductive discontinuities in an SIW cavity, two coupling degenerate modes can be excited. Due to the phase difference between the two modes in each cavity, two transmission zeros on each side of the passband are created, so the out-of-band rejection of the filter is significantly increased. An SIW dual-mode filter with a center frequency of 12 GHz has been fabricated and measured using the proposed method. Experimental results agree well with the simulation results.

Key Words: substrate integrated waveguide; dual mode resonator; transmission zero

在现代微波无线通信系统中, 滤波器和双工器等无源器件有着十分重要的作用. 如果采用传统的金属波导、微带线或者共面波导来设计, 不是造价昂贵就是很难达到所要求的技术指标^[1-2]. 基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, 缩写 SIW)通过周期性金属通孔实现了类波导结构^[3-6], 继承了传统波导器件高品质因数和大功率容量等优良特性, 被广泛应用于设计各种微波和毫米波器件, 同时基片集成波导还具有易于加工、造价低和容易集成等优点.

采用简并模式的双模谐振腔理论来设计微波带通滤波器是最近研究的热点, 通过在谐振器中加入微扰单元使谐振器的两个简并模式分离, 因此经过扰动后的谐振器可以作为一个双调谐电路^[7]. 它可以有效地减小滤波器的尺寸, 并且具有良好的频率选择性. 文献[7]提出一种共面波导双模带通滤波器, 虽然具有良好的滤波特性, 但加工比较复杂; 文献[8]提出一种 SIW 双模非对称滤波器, 带外只含有一个传输零点. 笔者提出一种具有两个谐振腔的 SIW 双模带通滤波器, 通过在每个矩形腔中引入电感不连续性, 可以在腔中产生简并模式的耦合, 同时在通带两边各产生一个传输零点, 极大地改善了带外特性. 最后用实例验证了该方法的有效性.

收稿日期: 2008-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(60501023, 60901031)

作者简介: 秦培元(1983-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: pyqin1983@hotmail.com.

1 基片集成波导双模谐振腔

基片集成波导谐振腔的简化模型如图 1 所示, w, l, k, d 分别为 SIW 谐振腔实际的宽度、长度、金属过孔间距和直径. 为了设计方便, 只选择两种模式, 并假定两种模式(TE_{m0n} 和 TE_{p0q}) 工作在同一谐振频率, 则有^[9]

$$\left(\frac{m\pi}{w_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{l_{\text{eff}}}\right)^2 = \left(\frac{p\pi}{w_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{q\pi}{l_{\text{eff}}}\right)^2 \quad (1)$$

其中的 m, n 是第一模式的下标, p, q 是第二模式的下标. 为了方便初始模式的选择, 式(1)可表示为

$$w_{\text{eff}}/l_{\text{eff}} = ((m^2 - p^2)/(q^2 - n^2))^{1/2} \quad (2)$$

SIW 矩形谐振腔的谐振频率为

$$F_{R(TE_{m0n})} = \frac{c}{2(\epsilon_r)^{1/2}} ((m/l_{\text{eff}})^2 + (n/w_{\text{eff}})^2)^{1/2} \quad (3)$$

其中 $l_{\text{eff}} = l - d^2/(0.95k)$, $w_{\text{eff}} = w - d^2/(0.95k)$, (4)

w_{eff} 和 l_{eff} 分别是 SIW 双模腔体对应为填充了介电常数为 ϵ_r 的矩形金属波导的等效宽度和等效长度. 由式(1)~(4), 对于给定的谐振频率可以得到基片集成波导腔体的基本尺寸.

双模滤波器有很好的频率选择性, 结构紧凑, 因此被广泛应用于矩形波导滤波器的设计. 文献[10]提出了一种新型的 H 面双模波导滤波器, 这种滤波器无须调节螺钉即可实现电磁波的模式转换和其在谐振腔体内的耦合. 该滤波器的主体部分是一个大尺寸的腔体谐振器, 通过两种不同模式电磁波的耦合产生滤波效果. 用基片集成波导来实现这种结构的波导滤波器, 不仅造价低廉、易于加工而且能广泛应用于微波毫米波集成电路中. 由于基片集成波导本身的结构特性, 它们只能支持 TE_{m0n} 模而不能支持 TM_{m0n} 模. 理论上可以选择多个谐振模式在基片集成波导谐振腔内工作, 但是为了设计方便, 一般只选择两个谐振模式来实现滤波器的性能.

图 2 给出了一种单层 SIW 双模滤波器的结构示意图. 这种基片集成波导腔体滤波器包含一个 TE_{102} 和 TE_{201} 双模谐振腔, 两个普通波导和两个耦合小孔. 耦合小孔在腔内激励出相互耦合的两个正交的工作模式, 当两个模式之间幅度相同, 相位相差 180° 时, 就引入了一个传输零点. 通过改变腔体的尺寸, 可以控制两个模式负耦合的强弱, 进而确定传输零点的位置^[10], 使之位于通带的左边或右边. 图 3 给出了传输零点在通带左边和右边的单腔双模基片集成波导滤波器的仿真结果, 这两个滤波器的具体尺寸参数在表 1 中给出.

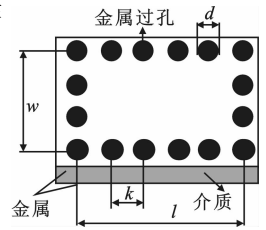


图 1 基片集成波导谐振腔

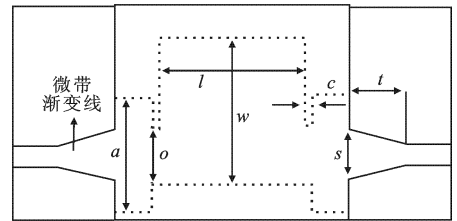
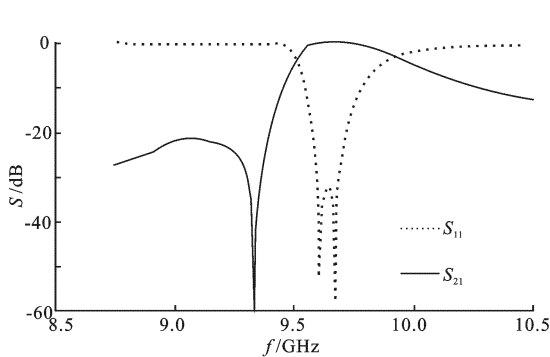
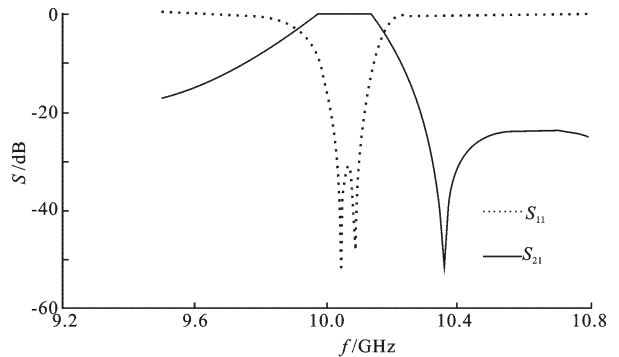


图 2 SIW 双模滤波器的结构示意图



(a) 传输零点在通带左边



(b) 传输零点在通带右边

图 3 单腔双模滤波器的仿真结果

表 1 具有右边或左边传输零点的 SIW 双模滤波器结构尺寸

	变 量								
	a	o	l	w	k	c	s	t	d
具有右边传输零点的滤波器尺寸	16.0	8.3	20	20.3	1	1	7.0	8.0	0.5
具有左边传输零点的滤波器尺寸	14.8	8.8	20	21.8	1	1	4.8	7.5	0.5

2 基片集成波导双模双腔滤波器设计

通过组合两个谐振频率相同、传输零点分别位于通带左右的 SIW 双模谐振腔,设计了中心频率为 12GHz 的双腔 SIW 双模带通滤波器,图 4 给出其结构图。所选的两个模式为 TE_{102} 和 TE_{201} 。

具体的设计流程如下:

(a) 根据腔内耦合的两个具体模式(TE_{102} 和 TE_{201}),由式(2)可以得到初始的 w_{eff} 与 l_{eff} 的比值 $w_{\text{eff}}/l_{\text{eff}}=1$,即 $w_{\text{eff}}=l_{\text{eff}}$;

(b) 根据所需要的频带范围,由式(3)和(4)确定 l 与 w 的初值;将 $F_R=12\text{GHz}$ 代入式(3),可求出 $w_{\text{eff}}=l_{\text{eff}}=17.17\text{mm}$,由式(4)得出 $l=w=17.9\text{mm}$;

(c) 令 $w_1=l_1=w_2=l_2=w=17.9\text{mm}$,微调参数 w_1 和 l_1 ,先得到在通带高端含有一个传输零点的 SIW 双模谐振腔。增大 w_2 的值,得到另一个传输零点位于通带低端的双模谐振腔^[10],为了保证中心频率不发生偏移,还需要适当地改变 l_2 的值;

(d) 通过商业电磁仿真软件的全波优化,确定 w_1, w_2, l_1, l_2 的最终值,如表 2 所示;

表 2 基片集成波导双模滤波器具体结构尺寸

	mm						
参数	a	c_1	c_2	c_3	o_1	o_2	o_3
数值	9.6	1.3	2.7	1.3	8.0	7.9	8.05
参数	l_1	l_2	w_1	w_2	s	t	d
数值	17.2	15.4	16.4	19.2	0.25	9	0.5

(e) 通过优化耦合孔的宽度来实现滤波器良好的频带特性,耦合小孔的宽度控制滤波器的带宽。当孔加宽,滤波器的带宽增加,所以,可以根据实际需要来确定孔的宽度。而 SIW 滤波器其他参数初值的设定,可通过计算出中心频率实际波导的尺寸,然后由式(4)转换为 SIW 尺寸的方法确定。

在基片集成波导-微带转换器的设计上,采用微带渐变线的形式。渐变线的一端是 50Ω 微带线的宽度,另一端是 SIW 腔体滤波器的等效输入阻抗对应的微带线宽度,它可以在较宽频带上实现良好的匹配^[11]。

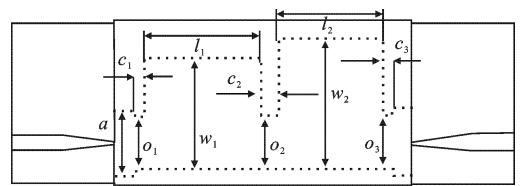


图 4 双腔 SIW 双模滤波器结构示意图

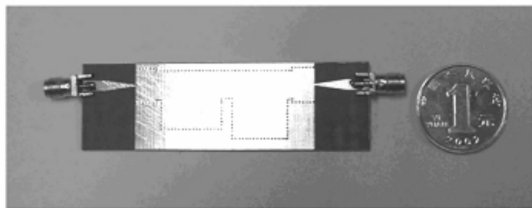


图 5 基片集成波导双模带通滤波器实物照片

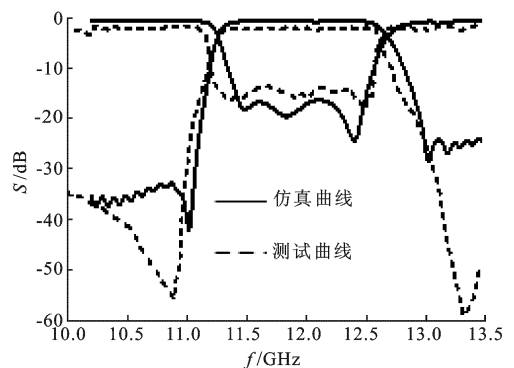


图 6 S 参数的仿真和测试曲线对比

3 实测结果

笔者在相对介电常数 2.65, 厚度 1 mm 的介质基板上加工了这种 SIW 双模带通滤波器,实物如图 5 所

示,并采用 Agilent8719ES 矢量网络分析仪对该滤波器进行了测试.滤波器的实测中心频率为12 GHz,相对带宽 11%;通带内最小插入损耗为1.3 dB,回波损耗大于10 dB.由于模式间的耦合,在10.8 GHz和13.3 GHz 频率点处出现一对传输零点,极大地改善了阻带特性.图 6 给出了仿真与实测的 S 参数对比曲线,两者吻合.

4 总 结

基片集成波导具有易于设计、体积小、重量轻、容易加工、造价低、方便集成等优点.笔者通过组合两种谐振频率相同、传输零点分别位于通带左右的 SIW 双模谐振腔,设计出一种新型 SIW 带通滤波器,并给出了具体的设计步骤.仿真和实测表明,该 SIW 双模滤波器不但具有良好的带内特性,而且含有一对传输零点,极大地改善了带外特性.这类 SIW 双模滤波器在微波集成电路中具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Levy R, Snyder R V, Matthaei G. Design of Microwave Filters [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 2002, 50(3): 783-793.
- [2] 吴边, 梁昌洪, 陈亮, 等. 一种开口环缺陷地面结构复合左右手传输线 [J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(2): 254-257.
Wu Bian, Liang Changhong, Chen Liang, et al. Composite Right/left-handed transmission Line Based on Split-ring Resonator DGS [J]. Journal of Xidian University, 2008, 35(2): 254-257.
- [3] Mira F, San Blas A A. Fast and Accurate Analysis and Design of Substrate Integrated Waveguide (SIW) Filters [EB/OL]. [2008-03-10]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4405153&isnumber=4405082>.
- [4] Zhang Yulin, Hong Wei, Wu Ke, et al. Novel Substrate Integrated Waveguide Cavity Filter with Defected Ground Structure [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 2005, 53(4): 1280-1287.
- [5] Liu Bing, Hong Wei, Wang Yuanqing, et al. Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) 3-dB Coupler [J]. Half Mode Substrate Integrated Waveguide (HMSIW) 3-dB Coupler [J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2007, 17(1): 22-24.
- [6] Huang T H, Chang C S, Chen H J, et al. Simple Method for A K-Band SIW Filter with Dual-Mode Quasi-Elliptic Function Response [J]. Microwave and optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1246-1248.
- [7] Chen H C, Tzuang C-K C. All-Planar Dual-Mode Asymmetric Filters at Ka-Band [J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2003, 13(3): 111-113.
- [8] Chen Xiaoping, Hao Zhangcheng, Hong Wei, et al. Planar Asymmetric Dual-Mode Filters Based on Substrate Integrated Waveguide [C]//2005 IEEE MTT-S International. New York: IEEE, 2001: 1764-1769.
- [9] Cassivi Y, Wu Ke. Low Cost Microwave Oscillator Using Substrate Integrated Waveguide Cavity [J]. IEEE Trans on Microwave Wireless Components Letters, 2003, 13(2): 48-50.
- [10] Guglielmi M, Jarry P, Kerherve E, et al. A New Family of All-inductive Dual-mode Filters [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 2001, 49(10): 1764-1769.
- [11] 李浩, 华光, 陈继新, 等. 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(12): 2002-2004.
Li Hao, Hua Guang, Chen Jixin, et al. Theoretical and Experiment Investigation on the Transition between the Substrate Integrated WaveGuide (SIW) and Microstrip [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 2002-2004.

(编辑: 郭 华)