

文章编号:1000-582X(2011)06-127-05

蝶型槽基片集成波导带通滤波器

陈世勇,陈凯让

(重庆大学 通信工程学院,重庆 400044)

摘要:利用基片集成波导的高通传输特性以及蝶型光子带隙结构的阻带特性,构建了一种新型结构的基片集成波导带通滤波器.为了验证该想法,设计了 1 个中心频率为 4.65 GHz,分数带宽为 40%的滤波器,电磁仿真结果表明该滤波器在频率为 3.71~5.6 GHz 范围内具有明显的通带特性,带内最大插入损耗约为 0.4 dB.利用 PCB 工艺制作了该滤波器的实物,使用矢量网络分析仪对其进行了测试,测试结果表明该滤波器的通带为 3.78~5.76 GHz,分数带宽约为 41%,带内最小插入损耗为 0.72 dB,最大插入损耗为 1.65 dB.电磁仿真结果和实际测试结果较一致。

关键词:基片集成波导;光子带隙结构;带通滤波器

中图分类号:TN713

文献标志码:A

Substrate integrated waveguide bandpass filter based on butterfly radial slot

CHEN Shi-yong, CHEN Kai-rang

(Institute of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A novel broadband substrate integrated waveguide bandpass filter was presented based on the highpass characteristics of substrate integrated waveguide(SIW) and the bandstop performance of butterfly radial slot photonic band gap(PBG) structure. In order to verify this idea, a wideband bandpass filter with 4.65 GHz center frequency and 40% fractional bandwidth was designed. The electromagnetic simulation results show good passband characteristics from 3.71 to 5.6 GHz, while the maximum insertion loss is about 0.40dB. An experimental filter prototype was fabricated with standard PCB process and measured by the vector network analyzer. The measured results show that, for the filter prototype, the passband is from 3.78 GHz to 5.76GHz, the fractional bandwidth is about 41%, the minimal insertion loss is about 0.72 dB and the maximum insertion loss is 1.65. dB The measured results are in good agreement with the simulated results.

Key words: substrate integrated waveguide; photonic band gap; bandpass filter

基片集成波导由于具有较高的品质因数、易于和其他平面电路集成等特点被广泛的应用于微波、毫米波无源电路的设计之中。基片集成波导通常是利用基片的上下金属板和两排间隔一定距离的金属通孔构成,通孔之间的间距只要满足小于通孔直径

的 3 倍,并且小于工作频率导播波长的 1/10,就可以防止电磁波从基片侧面辐射,从而将电磁能量的绝大部分束缚在导行系统中,便于电磁波定向传播^[1-5]。基片集成波导相当于内部填充了介质的矩形金属波导,因此采用普通矩形波导实现的电路结

收稿日期:2010-10-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975301)

作者简介:陈世勇(1975-),男,重庆大学博士,主要从事射频电路方向的研究,(Tel)023-65103544;(E-mail)chensy@cqu.edu.cn。

构基本上可以用基片集成波导来实现。集成波导滤波器的宽带化、小型化成为电路设计中的研究热点。早期研究人员通过在集成波导中插入改变其宽度的销钉实现电感耦合,实现了分数带宽小于 10% 的基片集成波导的窄带集成波导带通滤波器^[6-7];为了提高滤波器的带外抑制程度和减小滤波器的实现面积,研究人员分别采用非相邻谐振器之间的交叉耦合、双模谐振器或多层电路结构实现基片集成波导微波带通滤波器,该类型的滤波器的分数带宽均不超过 20%^[8-12]。Fermín Mira 采用 zigzag 滤波器拓扑结构,实现滤波器非相邻谐振器之间的耦合,实现了分数带宽为 28% 的 SIW 带通滤波器。该类型滤波器的传输零点位置可以通过非相邻谐振器之间的耦合大小来灵活控制,从而可以实现较好的频率响应特性及带外抑制特性^[13]。宽带 SIW 带通滤波器的研究文献较少,文献[14]采用在 SIW 的接地面上刻蚀周期性的带隙结构,实现了分数带宽约为 60% 的微波带通滤波器,该滤波器的实现减小了电路的接地面积,从而使得滤波器的性能会受到一定的影响。基于 SCMRC 低通结构和集成波导组合的实现了分数带宽约为 70% 的宽带基片集成波导带通滤波器,由于 SCMRC 谐振器采用 4 个折叠的带线实现,从而减小了滤波器的长度^[15-16];为了进一步减小滤波器实现的电路尺寸,研究人员利用折叠集成波导和分离谐振单元相结合,实现了分数带宽为 80% 的带通滤波器,该类型滤波器由于采用的折叠结构,因此制作的成本较高^[17]。

蝶型结构实现的低通滤波器和传统的高低阻抗线实现的低通滤波器相比较具有宽阻带以及带外抑制陡峭的特性。正是基于这种特点,将其集成到基片集成波导之中,提出了一种新的宽带集成波导微波带通滤波器的紧凑实现方式。该类型滤波器由于带外传输零点的引入,可以提高滤波器的带外抑制特性。首先分析了基片集成波导的传输特性;然后讨论了蝶型辐射槽参数对阻带抑制特性的影响;最后设计了 1 个中心频率为 4.65 GHz,分数带宽为 40% 的带通滤波器实例,采用 PCB 工艺制作了滤波器实验电路,测试结果表明滤波器的中心频率为 4.78 GHz,分数带宽约为 41%。带内最小插入损耗为 0.72 dB,最大插入损耗为 1.65 dB。

1 基片集成波导的传输特性分析

基片集成波导的结构(俯视)如图 1 所示,其中

d 为金属通孔直径, w 为相邻金属通孔的中心距离, c 为 2 排通孔的中心距离,即基片集成波导的宽度, h 为基片的厚度。由于介质基板的地、信号层以及两排金属通孔,使得该结构可以认为是 1 个介质矩形波导。对应的基片集成波导截止频率可以通过下面的公式(1)来表示^[1]

$$f_{\text{CTE}_{10}} = \frac{c_0}{2C_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

其中, $C_{\text{eff}} = C \bar{c}$;

$$\bar{c} = \xi_1 + \frac{\xi_2}{\frac{w}{d} + \frac{\xi_1 + \xi_2 - \xi_3}{\xi_3 - \xi_1}};$$

$$\xi_1 = 1.0198 + \frac{0.3465}{\frac{c}{w} + 1.0684};$$

$$\xi_2 = -0.1183 - \frac{1.2729}{\frac{c}{w} - 1.2010};$$

$$\xi_3 = 1.0082 - \frac{0.9163}{\frac{c}{w} + 0.2152};$$

一般情况下,只要满足 $w < 3d$ 且 $w < \frac{\lambda}{10}$,基片集成波导和矩形传输特性就基本一致,根据上述设计原则,集成波导采用介电常数 ϵ_r 为 2.65,厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯材料作为基板,设计的基片集成波导的尺寸为: $d=0.5$ mm, $w=1$ mm, $c=27$ mm。根据公式(1)可以计算出对应的 TE_{10} 的截止频率为 3.45 GHz,该结构的基片集成波导的传输特性仿真结果如图 2 所示,可以看出对应的截止频率为 3.71 GHz 左右,和计算的结果有大约有 7.5% 的误差。对应的 TE_{10} 模的电场分布如图 3 所示,可以看出基片集成波导中的主模的电场分布和金属矩形波导中的主模分布一致。

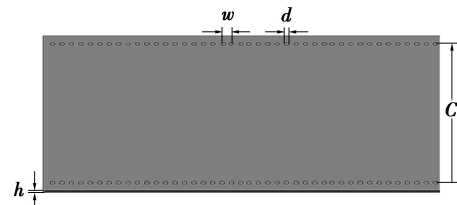


图 1 基片集成波导结构

2 滤波器的设计

2.1 单个蝶型带隙结构

2 个扇形面以及 1 个矩形槽构成的蝶型结构如

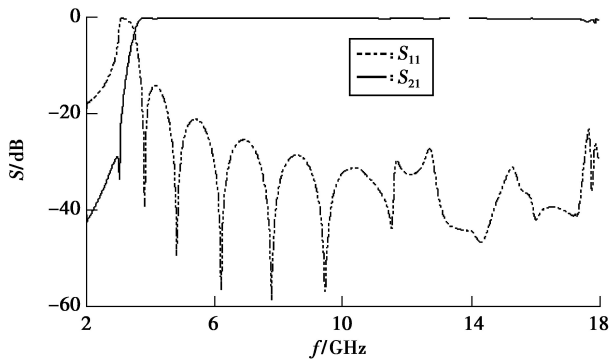


图 2 基片集成波导传输特性

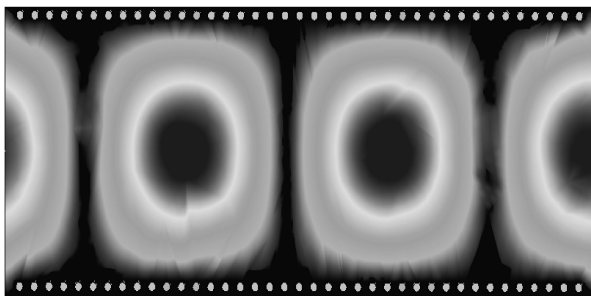


图 3 集成波导的电场分布

图 4 所示,其中 a 为矩形槽的长度, c 为矩形槽的宽度, b 为扇形面的半径, e 为扇形面对应的角度。将蝶型结构周期性的刻蚀在接地面上将会形成一定的阻带^[18-19],蝶形结构的半径 b 和周期间距 a 应该满足如下的关系

$$\frac{b}{a} = 0.45. \quad (2)$$

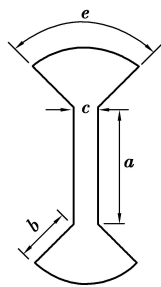


图 4 蝶型带隙结构单元

增加 b/a 的值,阻带的带宽将增加,同时阻带向低频端方向移动;保持半径 b/a 的值不变的情况下,增加蝶型槽的数量将增加阻带的衰减,而带宽几乎保持不变^[18]。

2.2 微带-集成波导的转换

为了便于测量需要进行集成波导和微带线之间的转换设计。由集成波导的等效阻抗可以通过确定微带渐变线的宽度以及长度实现阻抗匹配。基片集

成波导 TE_{10} 模等效阻抗可以表示为^[4]

$$Z_e = \frac{h}{C_{\text{eff}}} \frac{\eta_0}{\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2C_{\text{eff}}}\right)^2}}, \quad (3)$$

其中: η_0 为空气波阻抗; ϵ_r 为集成波导介质的相对介电常数; λ 为介质中的工作波长; h 为集成波导的高度。通常情况下需要对微带渐变线宽度和长度进行优化设计。

2.3 设计实例

为了验证该想法,实际设计了 1 个中心频率为 4.65 GHz,分数带宽为 40%的蝶形结构集成波导带通滤波器,滤波器由谐振器以及 4 个尺寸相同的蝶形带隙结构单元耦合组成,结构如图 5 所示,其中蝶形带隙结构的弧度 $e=90^\circ$,矩形槽的长 $a=4$ mm,宽 $c=0.4$ mm 半径 $b=2.7$ mm,需要说明的是这里的 b/a 不满足 0.45 左右的值,主要原因是为了消除抑制频带中的共振特性,通过适当的调整 PBG 结构的周期来提高 PBG 结构的阻带抑制特性,以获得更好的滤波器的频率响应。带隙结构谐振器之间的距离 $L_1=10.6$ mm, $L_2=13.6$ mm, $L_3=10.6$ mm。SIW 谐振器在长度 \times 宽度 $=30$ mm \times 30 mm 的情况下,对应其谐振器刻蚀的如图 4 所示的蝶型槽,其对应的品质因素几乎不变均为 1 111 左右,该尺寸蝶型槽导致的辐射损耗很小,可以忽略。集成波导的尺寸为 $L=84$ mm, $W_{50}=2.72$ mm, $C=27$ mm, $L_4=44$ mm, $L_{\text{taper}}=11$ mm, $w=1$ mm, $d=0.5$ mm。采用 HFSS 对电路的结构进行了优化仿真,滤波器的插入损耗以及回波损耗如图 7 的点画线所示,可以看出滤波器的通带响应频率范围为 3.71 ~ 5.6 GHz,带内最小插入损耗为 0.4 dB,最大回波损耗为 10.6 dB。

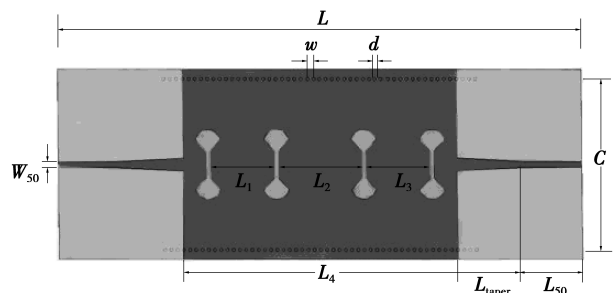


图 5 蝶型集成波导滤波器结构示意图

3 测试结果

根据电路的设计尺寸,集成波导带通滤波器在

厚度为 1 mm, 相对介电常数为 2.65 的聚四氟乙烯介质基板上, 利用 PCB 工艺加工而成, 滤波器的实物如图 6 所示。采用 Anritsu MS4624D 矢量网络分析仪对加工的实验滤波器进行了测试, 插入损耗和回波损耗测试结果如图的实线所示, 可以看出滤波器中心频率为 4.78 GHz, 通带范围从 3.78 ~ 5.76 GHz(分数带宽约为 41%), 带内插入损耗最大值为 1.65 dB, 最小值为 0.72 dB, 最大回波损耗为 10.87 dB, 对比仿真结果, 测试结果滤波器的带宽有所增加, 上边阻带的衰减没有仿真结果抑制陡峭, 总体上测试结果和仿真结果较一致。

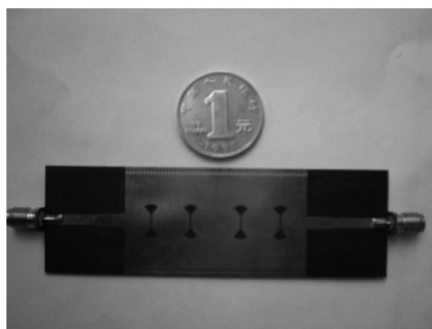


图 6 蝶型滤波器实物

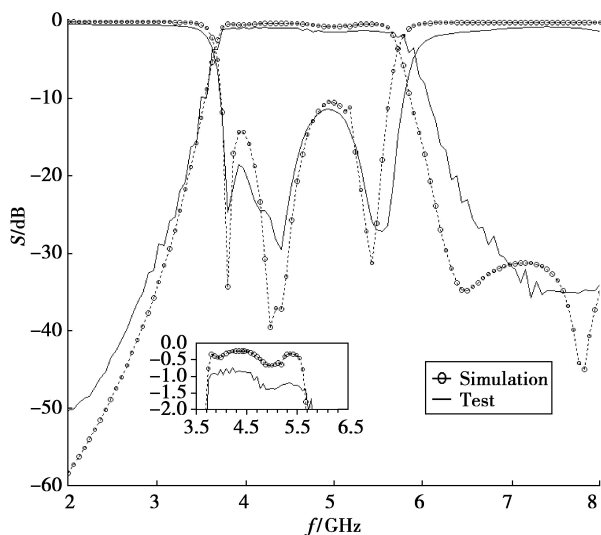


图 7 滤波器电磁仿真及测试结果

4 结论

在介绍了基片集成波导的传输特性、蝶型 PBG 结构的阻带特性以及微带锥形转换线的基础上, 通过在 SIW 信号层刻蚀一定规律的蝶型槽实现了一种微波宽带 SIW 带通滤波器。对其进行电磁仿真和实际电路的制作和测试, 结果表明该滤波器具有

41% 的分数带宽, 通带内波纹平坦、插损小。该类型的滤波器结构简单、生产成本低、易于加工, 对于微波 SIW 宽带滤波器设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] YAN L, HONG W, WU K, et al. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines[J]. IEEE Proceedings-H: Microwaves, Antennas and Propagation, 2005, 152(1): 35-42.
- [2] ZHANG Y L, HONG W, WU K. Novel substrate integrated waveguide cavity filter with defected ground structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(4): 1280-1287.
- [3] WU K, XU F. Guided wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(1): 66-73.
- [4] DESLANDES D, WU K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 2(11): 68-70.
- [5] CASSIVI Y, PERREGRINI L, ARCIONI P. Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide[J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2002, 9(12): 333-335.
- [6] SOTOODEH Z, BIGLARBEIGIAN B, HOJAAT KASHANI F. A novel bandpass waveguide filter structure on SIW technology[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2008(2): 141-148.
- [7] ZHANG X C, XU J, YU Z Y. C-band half mode substrate integrated waveguide filter[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 2(50): 275-277.
- [8] HAO Z C, HONG W, CHEN X P, et al. Multilayered substrate integrated waveguide (MSIW) elliptic filter[J]. IEEE Microwave Wireless Components letters, 2005, 2(15): 95-97.
- [9] CHEN X P, HAO Z C, HONG W, et al. Planar asymmetric dual-mode filters based on substrate integrated waveguide (SIW)[C]// 2005 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest. June 12-17, 2005, USA. USA: IEEE Incorporated, 2005: 949-952.
- [10] CHEN X P, HONG W, CUI T J, et al. Symmetric dual-mode filter based on substrate integrated waveguide (SIW)[J]. Electrical Engineering, 2006, 89(1): 67-70.
- [11] HAN S, WANG X L, FAN Y, et al. The generalized chebyshev substrate integrated waveguide diplexer[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2007 (73): 29-38.
- [12] WU L S, ZHOU X L, YIN W Y. A novel multilayer par-

- tial H-plane filter implemented with folded substrate integrated waveguide[J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2009, 8(19): 494-496.
- [13] MIRA F, MATEU J, COGOLLOS S. Design of ultra wideband substrate integrated waveguide filters in zigzag topology [J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2009, 5(19): 281-283.
- [14] HAO Z C, HONG W, CHEN X P, et al. Compact super-wide bandpass substrate integrated waveguide (SIW) filters [J]. Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(9): 2968-2977.
- [15] CHEW Q, DENG K, WANG D P, et al. Improved spiral compact microstrip resonance cell low-pass filter with wide stopband characteristics [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(1): 121-124.
- [16] CHEW Q, DENG K, XU L, et al. A compact wide-band bandpass filter integrating SCMRC and SIRW structures [J]. Nanjing University of Science and Technology, 2006, 49(1): 195-198.
- [17] GENG L, CHE W Q, DENG K. Wideband bandpass filter of folded substrated-integrated waveguide integrating with stripline compact resonant cell [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2008, 50 (2): 390-393.
- [18] TAN B T, YU J J, KOH S J, et al. Investigation into broadband PBG using a butterfly-radial slot (BRS) [C] // 2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 8-13, 2003, Philadelphia, USA. USA: IEEE Incorporated, 2003: 1107-1110.
- [19] YU J J, TAN B T, CHEW S T. CPW ebg using butterfly-radial slot (BRS) for low pass wideband filtering [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2004, 41 (4): 320-323.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 126 页)

- [7] MUDIGONDA N R, RANGAYYAN R M, DESAUTELS J E L. Detection of breast masses in mammograms by density slicing and texture flow-field analysis [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 20 (12): 215-227.
- [8] ANDRE T C S S, RANGAYYAN R M. Classification of tumors and masses in mammograms using neural networks with shape and texture features [C] // The 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, September 17-21, 2003, Cancun, Mexico. USA: IEEE Incorporated, 2004.
- [9] CHENG H D, XUE M, SHI X J. Contrast enhancement based on a novel homogeneity measurement [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(11): 2687-2697.
- [10] 冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [11] 何传江, 刘维胜, 申小娜. 基于规范子块五点求的快速分形图像编码 [J]. 计算机研究与发展, 2007, 44 (12): 2066-2071.
- HE CHUAN-JIANG, LIU WEI-SHENG, SHEN XIAO-NA. Fast fractal image coding based on quincunx sums of normalized blocks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(12): 2066-2071.
- [12] 何传江, 刘维胜, 申小娜. 基于行列式的快速分形图像编码算法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3): 435-439.
- HE CHUAN-JIANG, LIU WEI-SHENG, SHEN XIAO-NA. Fast fractal image encoding algorithm based on local determinants [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(3): 435-439.
- [13] 李高平, 向慧芬. 基于平均偏差剔除的快速分形图像编码算法 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(19): 49-52.
- LI GAO-PING, XIANG HUI-FEN. Fast fractal image coding algorithm based on mean deviation kick-out condition [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(19): 49-52.
- [14] 乔闹生. 一种改进的直方图均衡化 [J]. 光学技术, 2008, 34: 141-142.
- QIAO NAO-SHENG. An improved histogram equalization [J]. Optical Technique, 2008, 34: 141-142.
- [15] 王国权, 仲伟波. 灰度图像增强算法的改进与实现研究 [J]. 计算机运用研究, 2004, 12: 175-176.
- WANG GUO-QUAN, ZHONG WEI-BO. Study on Modification and actualization at algorithm of gray Image manipulation [J]. Application Research of Computers, 2004, 12: 175-176.

(编辑 侯 湘)