

基于补偿型微带谐振单元的一维光子带隙结构^{*}

顾建忠^{1)†} 林水洋^{1)‡} 王 闯^{1)‡} 喻筱静¹⁾ 孙晓玮¹⁾

1) 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2006 年 1 月 23 日收到, 2006 年 4 月 21 日收到修改稿)

提出了一种具有光子带隙(PBG)性能的补偿型微带谐振单元(C-CMRC),通过并联两个开路微带线来补偿 CMRC 结构在低频通带内因为阻抗不平衡而引起的回波损耗,从而减小插入损耗,并且该 C-CMRC 谐振结构具有更强的慢波效应和更大的禁带宽度.利用该结构谐振单元的慢波效应,设计具有一维 PBG 性能的低通滤波器,重复周期仅为 $0.15\lambda_g$.与普通的 $0.5\lambda_g$ 周期的 PBG 结构相比,大大减小了电路面积.实际设计、制作和测试了 CMRC 和 C-CMRC 两种结构,通过两种结构的测试结果比较,验证了提出的 C-CMRC 结构的有效性.利用该 C-CMRC 结构制作的低通滤波器在小于 1.8 GHz 通带内插入损耗小于 1.4 dB,从 2.85 到 9 GHz 禁带衰减都大于 33 dB.

关键词:补偿型微带谐振单元,慢波,禁带,光子带隙

PACC: 4280C, 7820P, 0555, 4220

1. 引 言

近年来,光子晶体^[1-5]在光波和电磁波频段的应用逐渐成为热点,它是一种周期性排列的介质结构,在某些频段内能够产生光子带隙(PBG),该重复周期与禁带波长具有相同的数量级.在 PBG 结构中,落在光子带隙内的电磁波被完全禁止在 PBG 结构中的传播,这种阻带特性具有很高的理论价值和实际的应用前景.特别是微波毫米波领域内,光子晶体可以广泛应用于滤波、谐波抑制、改善效率、电磁兼容等方面,在提高器件性能方面具有显著的作用.

早期 PBG 结构的制作,需要在介质材料中掺杂其他材料或者周期性打孔,制作和分析都比较复杂.文献[6,7]针对微带线提出了一种新的单平面光子带隙结构(UC-PBG),只需要在地平面上腐蚀周期性结构,就可以实现光子晶体的性能.随后,文献[8,9]提出了一种缺陷接地结构(DGS),它同 UC-PBG 结构一样具有 PBG 的性能,但是比 UC-PBG 设计和制作更加简单.这两种结构使得 PBG 的平面电路应用取得了突破性进展,大量的应用随之出现.但无论是

UC-PBG 还是 DGS 结构,它们的制作都需要在接地平面上腐蚀一定的图案来达到实现 PBG 禁带和慢波的性能,这样增加了制作的工艺步骤和难度.而且在实际的电路使用中,需要将电路悬置,避免 PBG 性能的失效,这给后期的加工和安装增加了难度.这两个缺点限制了光子晶体在微波毫米波平面电路中的进一步应用.在 2000 年,薛泉等^[10]提出了用微带谐振单元(CMRC)结构来实现光子晶体的性能,该结构只需要在 $50\ \Omega$ 线内腐蚀一定的图形,按一定的周期排列就可以得到相应频段的 PBG 性能.但是该结构因为阻抗的失配,在低频通带内有很大的回波损耗,引起通带内纹波起伏过大,不利于在电路中的应用.由于 CMRC 结构仅占用很小的电路面积,无需额外的工艺制作,设计简单并且可以非常灵活地在微波毫米波电路中应用,在提高电路性能方面具有非常显著的效果^[11-14].

基于文献[10]的 CMRC 结构,本文提出了一种新型的补偿型微带谐振单元(C-CMRC),使用并联微带线的结构来补偿 CMRC 结构中低频通带内驻波不理想的情况.该 C-CMRC 结构不仅可以补偿通带内阻抗不匹配,并且可以进一步提高 CMRC 结构慢波和禁带的性能,在减小电路尺寸和禁带抑制方面都

^{*} 国家重点基础研究发展规划(批准号 00300123)资助的课题.

[†] E-mail: jianzhong_gu@yahoo.com.cn

有很好的效果.实际制作了尺寸相同的 CMRC 和 C-CMRC 结构,测试结果表明 C-CMRC 结构与原来的结构相比具有更优异的 PBG 性能,而且低频通带内的阻抗得到了有效的匹配.利用该 C-CMRC 结构制作的低通滤波器,具有面积小、低频通带内插入损耗小和禁带衰减大等优点.文中提到的所有结构和滤波器都制作在相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ 、衬底厚度 $h = 1 \text{ mm}$ 和介质损耗角正切值为 0.0003 的衬底上.

2. C-CMRC 结构的设计

根据传输线理论,无损传输线的传播常数计算公式为

$$\beta = \omega_0 \sqrt{LC}, \quad (1)$$

其中 L 和 C 分别是传输线单位长度的分布电感和电容.传输线的分布电感电容值决定了单位长度传输线电感电容的绝对值,进而决定了信号在传输线中传播的相位.为了减小电路面积,可以通过在传输线终端增加集总参数的电感和电容来实现,但是这样制作的工艺比较复杂,而且因为集总参数的电容电感在微波频段存在较大的寄生效应,一般不采用该方法来达到小型化的目的.常用的方法可以通过增加传输线的分布电感电容参数来实现慢波的效果,从而减小电路尺寸.禁带的实现可以设计微带电路在不同频段的谐振点来实现宽阻带.

图 1 是 CMRC 结构的版图.在 CMRC 的结构中,为了达到需要的慢波和禁带性能,分布的电感和电容值都通过人为地设计而增加,而并不增加额外的电路面积,所腐蚀的电路图形都在 50Ω 线宽内.如图 1 所示, 50Ω 线宽 $W_1 = 2.7 \text{ mm}$,其他电路尺寸为 $W_2 = 0.3 \text{ mm}$, $W_3 = 0.95 \text{ mm}$, $S_1 = 0.15 \text{ mm}$ 和 $L_1 = 10.3 \text{ mm}$.但是在设计的 CMRC 结构中,增加的电感和电容值不是线性的.根据无损传输线的阻抗计算公式

$$Z_0 = \sqrt{L/C}, \quad (2)$$

CMRC 结构的中心宽度为 W_2 的高阻抗线呈电感效应,而 4 个三角形的微带负载呈现电容效应,与传统的微带传输线相比串联电感值的增加大于并联电容值的增加,因此低频通带内的阻抗大于 50Ω .从图 2 中的仿真和测试参数可以看到,在通带内,测试的反射系数 S'_{11} 为 -10 dB ,这是因为在通带的低频段内 CMRC 的特征阻抗变化所引起的.

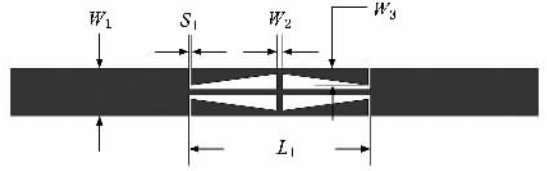


图 1 CMRC 版图

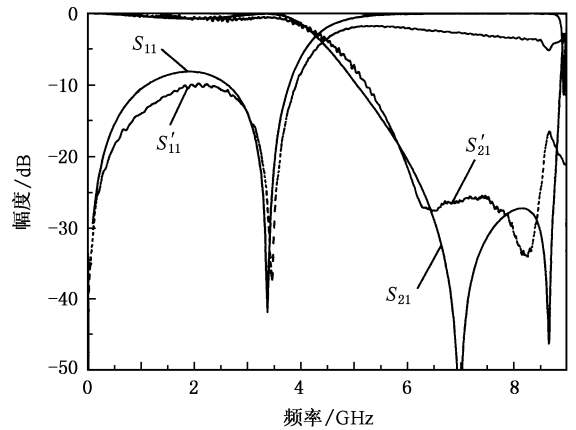


图 2 CMRC 仿真 (S_{11}, S_{21}) 和测试的频率响应 (S'_{11}, S'_{21})

通过在 CMRC 的中心增加两段并联的开路线来实现对于通带内阻抗不平衡的补偿.从图 3 可以看到,增加的微带开路线并联在 CMRC 结构的中心,而且不增加额外电路面积.补偿微带开路线的长度与 CMRC 结构的长度相同,宽度可调.对于通带内的低频段而言,可以等效为一个并联电容.对于不同的补偿微带开路线宽度,等效的电容值不同,对于 CMRC 结构的补偿效应也不同,我们仿真了三种不同宽度的 C-CMRC 结构,从图 4 可以看到,补偿微带开路线的宽度越宽,电容负载效应越明显,对于低频段 CMRC 的补偿效果也更好.不同的微带线宽 $W_4 = 1, 1.5, 2 \text{ mm}$ 所对应的低频通带的回波损耗分别为 21, 27 和 34 dB,相应禁带内的第一个谐振衰减点依次为 4.4, 4.6 和 5.1 GHz.我们实际制作了 $W_4 = 2 \text{ mm}$

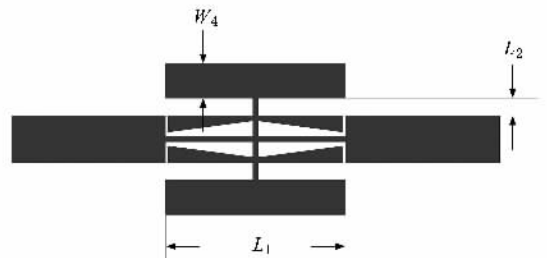


图 3 C-CMRC 版图

的 C-CMRC 结构,与没有补偿开路微带线的 CMRC 结构相比,具有更好的性能.从表 1 的数据比较可以得出,禁带宽度大大增大,慢波效应更为明显,低频通带内的性能也有明显的提高.

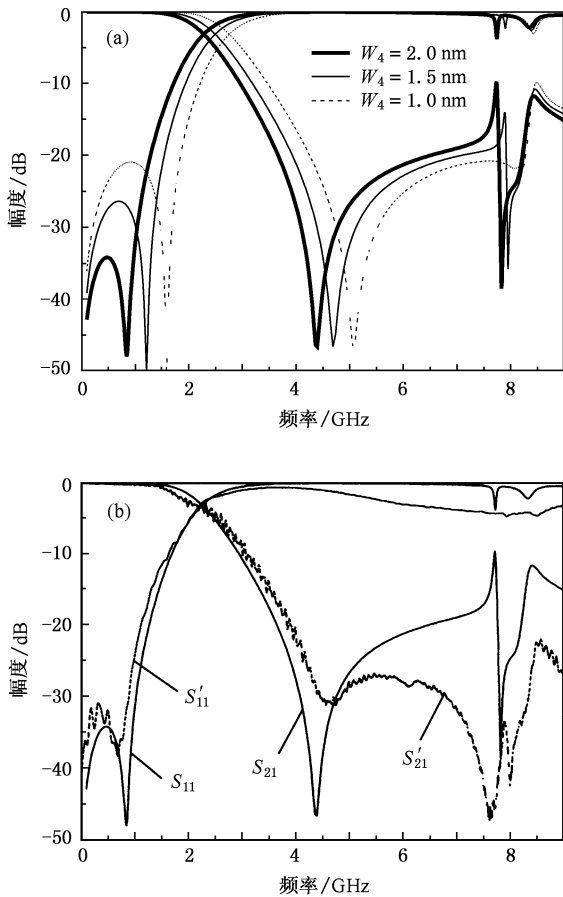


图 4 C-CMRC 的频率响应 (a) 不同宽度补偿开路微带线的 C-CMRC (b) C-CMRC 仿真 (S_{11} , S_{21}) 和测试的频率响应 (S'_{11} , S'_{21})

表 1 CMRC 和 C-CMRC 结构的性能比较

类 型	- 20 dB 禁带 宽度/GHz	低频通带内 反射系数/dB
CMRC	5.94—8.57	- 9.8
C-CMRC	3.93—9.00	- 30

3. 具有 PBG 性能的 C-CMRC 低通滤波器设计

利用上述的 C-CMRC 结构的慢波和禁带效应可以用来制作高性能的滤波器,通过级联 3 个 C-CMRC 单元形成具有 PBG 性能的低通滤波器.设计的低通滤波器的截止频率为 1.8 GHz,普通微带 1.8 GHz 的 $0.5\lambda_g$ 导波长度为 56.2 mm. 根据 Bragg 反射

条件,单元的重复周期约为 $0.5\lambda_g$. 因为 C-CMRC 结构的慢波效应,C-CMRC 单元的重复周期仅为 16.3 mm,即 $0.15\lambda_g$,大大减小了电路面积.3 个级联的 C-CMRC 单元结构的尺寸与上述提到的尺寸相同,其中 $W_4 = 2$ mm. 图 5 为设计的低通滤波器的版图,图 6 为制作的低通滤波器的实物照片.低通滤波器的测试采用的是 Agilent E8358A 型矢量网络分析仪,测试结果如图 7 所示.实测的滤波器在低通频段内驻波都大于 12.3 dB,通带内的插入损耗小于 1.4 dB (插入损耗包含测试用的两个微波接头).禁带内衰减从 2.85 到 9 GHz 都大于 33 dB,因为所用矢量网络分析仪的测试频率范围为 0—9 GHz,所以高于 9 GHz 的频率未作测试.整个滤波器的长度为 42.9 mm,宽度仅为 8.7 mm,在很小的电路面积内,得到了性能优异的低通滤波器.

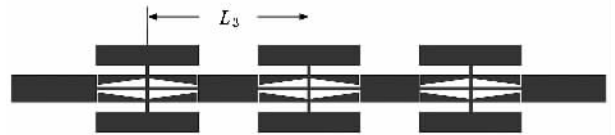


图 5 3 个 C-CMRC 串联的低通滤波器版图

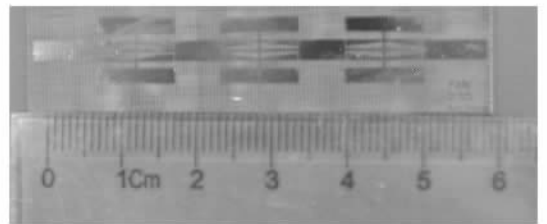


图 6 3 个 C-CMRC 串联的低通滤波器实物照片

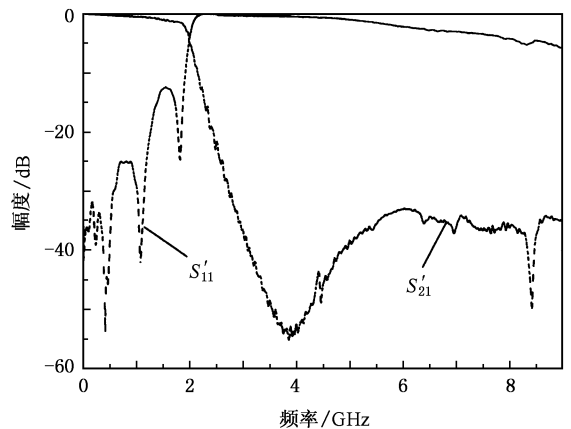


图 7 3 个 C-CMRC 串联的低通滤波器测试的频率响应 (S'_{11} , S'_{21})

4. 结 论

提出了一种新颖的、基于 C-CMRC 结构的低通滤波器,该滤波器根据 Bragg 反射条件级联 3 个 C-CMRC 单元而成. 因为该结构的慢波效应, C-CMRC

单元的重复周期仅为 $0.15\lambda_g$. 测试的通带和禁带性能优异,而且该滤波器完全采用平面工艺,无须接地通孔工艺和在地平面上制作 DGS 等结构,制作简单而且易于应用. 该 C-CMRC 结构面积小,可以应用于微波混合电路和集成电路设计,无需额外的工艺即可获得理想的禁带和慢波的 PBG 性能.

-
- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] Zhuang F, He S L, He J P *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 355 (in Chinese) [庄 飞、何赛灵、何江平等 2002 物理学报 **51** 355]
- [3] Zhang H T, Gong M L, Wang D S *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2060 (in Chinese) [张海涛、巩马理、王东升等 2004 物理学报 **53** 2060]
- [4] Zhou M, Chen X S, Xu J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 411 (in Chinese) [周 梅、陈效双、徐 靖等 2005 物理学报 **54** 411]
- [5] Tong Y W, Zhang Y W, He L *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 935 (in Chinese) [童元伟、张治文、赫 丽等 2006 物理学报 **55** 935]
- [6] Radisic V, Qian Y, Coccioli R *et al* 1998 *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* **8** 69
- [7] Yang F, Ma K, Qian Y *et al* 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 1509
- [8] Dal A, Park J S, Kim C S *et al* 2001 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **49** 86
- [9] Liu H W, Sun X W, Li Z F *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3082 (in Chinese) [刘海文、孙晓玮、李征帆等 2003 物理学报 **52** 3082]
- [10] Xue Q, Shum K M, Chan C H 2000 *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* **10** 403
- [11] Xue Q, Shum K M, Chan C H 2003 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **51** 1449
- [12] Gu J Z, Sun X W 2005 *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.* **12** 880
- [13] Lin D B 2004 *IEE Electron. Lett.* **40** 19
- [14] Poek C K, Yan B P, Yang E S 2005 *Microwave Opt. Techn. Lett.* **46** 84

A compensated compact microstrip resonant cell with photonic band-gap performance^{*}

Gu Jian-Zhong^{1,2)†} Lin Shui-Yang^{1,2)} Wang Chuang^{1,2)} Yu Xiao-Jing¹⁾ Sun Xiao-Wei¹⁾

¹ *Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*

² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

(Received 23 January 2006 ; revised manuscript received 21 April 2006)

Abstract

A compensated compact microstrip resonant cell (C-CMRC) with photonic band-gap (PBG) performance is presented in this paper. Two open microstrip stub-lines are added at the center of the compact microstrip resonant cell (CMRC) to compensate for the unbalanced change of inductance and capacitance in low pass band. It can significantly improve the return loss and insertion loss. Furthermore, the C-CMRC with capacitive loading leads to a stronger slow-wave and enlarged stop-band bandwidth. A low pass filter with 3 C-CMRC resonators in series has been designed according to the PBG performance. The period is only $0.15\lambda_g$ due to the slow-wave effect. Comparison with the general PBG period of $0.5\lambda_g$, the circuit size is reduced effectively. The original CMRC and the C-CMRC with open stub lines are designed, fabricated and measured to validate the improved performance. A low pass filter with 3 C-CMRC resonators is also designed with 1.26 dB insertion loss below 1.8 GHz and more than 25 dB stop-band from 2.6 to 9 GHz.

Keywords : compensated compact microstrip resonant cell, slow-wave, stop-band, photonic band-gap

PACC : 4280C, 7820P, 0555, 4220

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 00300123).

[†] E-mail : jianzhong_gu@yahoo.com.cn