

基于分形特征和双层光子带隙结构的 宽阻带低通滤波器*

刘海文¹⁾²⁾ 孙晓玮²⁾ 李征帆¹⁾ 钱蓉²⁾ 周旻²⁾

¹⁾ 上海交通大学电子工程系, 上海 200030)

²⁾ 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2002 年 12 月 24 日收到, 2003 年 3 月 18 日收到修改稿)

提出一种新颖的基于分形特征和双层光子带隙(PBG)结构的宽阻带低通滤波器. 该滤波器在接地板上刻蚀一阶 Sierpinski carpet PBG 结构, 在顶层微带线与接地板之间增加一层具有三阶 Sierpinski gasket PBG 结构的金属层, 该金属层经过打孔与接地板连通. 这种双层 PBG 结构的低通滤波器, 具有良好的宽阻带特性, 且电路尺寸小、结构紧凑. 对比了单层普通方孔 PBG 结构的低通滤波器、单层一阶 Sierpinski carpet PBG 结构的低通滤波器和双层分形 PBG 结构低通滤波器的传输特性, 同时给出 FDTD 模拟和实测结果. 结果表明, 该低通滤波器在低通频带内(50 MHz—3 GHz), 信号的传输系数 S_{21} 达到了 -3 dB 以上; 在阻带内(3—20 GHz), 信号的传输系数 S_{21} 均低于 -20 dB, 因而具有良好的宽阻带特性, 其传输特性优于其他两种 PBG 结构的低通滤波器.

关键词: 低通滤波器, 双层 PBG 结构, 分形, 宽阻带特性

PACC: 4280C, 7820P, 0555, 4220, 7125P

1. 引 言

传统的微带电路设计中, 在滤除杂波或抑制高次谐波时, 人们一般采用的方法是在电路中增加调谐短截线来实现滤波. 这种经验式方法是窄带的, 并且还需占用一定的电路面积. 最近几年, 国内外学者将光子带隙(PBG)应用于微波毫米波的电路设计^[1-13].

在 PBG 结构中^[14,15], 某些频率落在光子带隙内的电磁波被完全禁止在 PBG 结构中传播. 因此, 采用 PBG 结构作为衬底跨越若干个 PBG 周期单元结构的微波电路, 即可实现选频滤波. 与传统方法相比, 利用光子晶体实现滤波特性的优点是滤波频带是通过调整光子晶体的周期结构来控制, 便于工艺实现. 但是, 大多数 PBG 结构都表现出周期性的频率带隙特性, 这些周期性带隙主要由高次谐波产生, 很难控制. 消除这些周期性带隙, PBG 结构便可用于具有宽阻带特性的微波低通滤波器. Rumsey 等^[16]提出了一种同一平面上级联不同周期 PBG 结

构的方法来消除高频部分的周期频率带隙, 以实现低通滤波特性. 由于要级联两个以上的 PBG 结构, 因此电路面积增大. Kim 等^[17]提出一种在同一平面上将不同周期 PBG 结构并行排列的形式来消除高频部分的周期频率带隙, 达到低通滤波的效果. 由于传输信号的微带线与 PBG 结构的相对位置对信号传输特性影响较大, 因此, 微带线只能和并列的 PBG 结构中的一个 PBG 结构处于最佳设计位置, 而其他 PBG 结构不能处在最佳设计位置, 亦即未能充分利用电路中其他 PBG 结构的带隙特性. Caloz 等^[18]设计了一种将两个以上 PBG 结构叠加起来的多层结构低通滤波器, 但该低通滤波器在高频带阻部分 6 GHz 附近的传输系数 S_{21} 达到了 -10 dB, 谐波抑制效果不理想.

为有效滤除杂波和抑制高次谐波, 本文提出一种新颖的基于分形特征和双层 PBG 结构的宽阻带特性低通滤波器. 文中首先介绍双层分形 PBG 的低通滤波器结构设计, 接着比较了单层普通方孔 PBG 结构的低通滤波器、单层一阶 Sierpinski carpet PBG 结构的低通滤波器和本文的双层分形 PBG 结构的

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2002AA135270)和上海市应用材料研究与发展基金(批准号 0109)资助的课题.

低通滤波器的传输特性. 时域有限差分(FDTD)法模拟计算结果和实测数据分析表明,本文的双层分形 PBG 结构低通滤波器具有良好的宽阻带特性,并且其传输特性均优于其他两种 PBG 结构的低通滤波器.

2. PBG 结构带隙特性的物理解释

光子晶体是一种介质在另一种介质中周期排列所组成的人造晶体,其典型结构为一个折射率周期变化的三维物体. 光子在这类材料中的作用类似于电子在凝聚态物质中的作用,存在着类似于半导体能带结构中的禁带,称之为“光子带隙”. 频率落在光子带隙内的电磁波不能在光子晶体中传播,光子晶体的这种特性具有极大的理论价值和潜在的应用前景.

一般而言,光子带隙的产生受以下几个因素的影响:两种介质的介电常数比、晶格结构及填充率. 介电常数比越大越容易得到光子带隙^[14,45]. 理论研究表明^[16],介质中三角形排列的空气圆柱结构是最佳的二维光子晶体结构. 对于入射电场方向不同的 TE, TM 两种偏振模式,二维光子晶体具有不同的带

隙结构. 利用光子晶体的频率禁带特性可以实现对电磁波的滤波. 研究还发现^[19],当光子晶体中的某些单元被取消而造成缺陷时,就会使得光子晶体的光子频率禁带出现一些“可穿透窗口”,即光子频率禁带内的某些频率会毫无损失地穿过光子晶体. 基于以上光子晶体结构的物理机理,本文提出一种具有分形特征的排列结构组成双层光子带隙结构,用来设计新颖的、性能良好的低通滤波器. 分形特征的排列结构组成光子晶体,其实质是构造具有分维数、周期的分形特征的排列结构,以此使得介质的介电常数具有周期性分布规律,从而形成特定频率范围内具有“光子带隙”特性的光子晶体结构.

3. 双层 PBG 的低通滤波器结构设计

基于分形特征和双层 PBG 结构的低通滤波器结构如图 1 所示,顶层为 50Ω 微带线,下面是一层厚度为 h_1 的介质,该介质下是一层刻蚀三阶 Sierpinski gasket PBG 结构的金属板. 再下面是一层厚度为 h_2 的介质,该介质下是一层一阶 Sierpinski carpet PBG 结构的接地板. 金属板经通孔与接地板导通. 微带线、金属板和接地板材料为铜,其表面镀金. 介

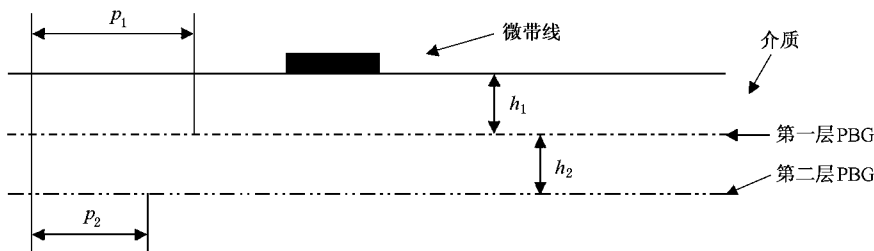


图 1 双层 PBG 结构的低通滤波器横截面结构示意图

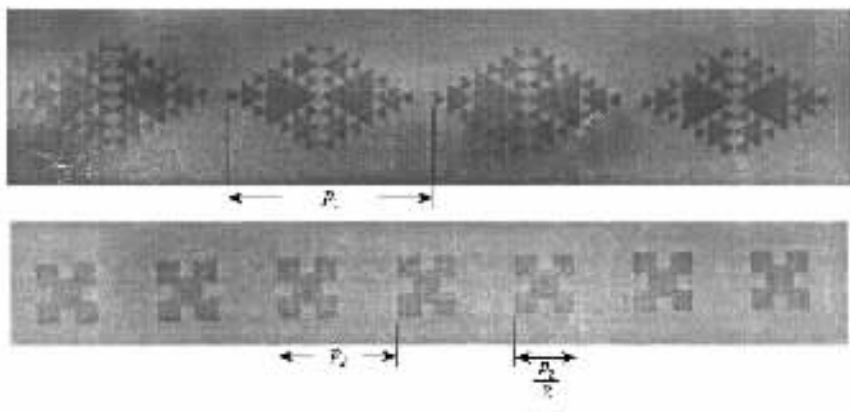


图 2 具有分形特征的 PBG 结构的实物照片 第一层 PBG 结构间距为 p_1 , 第二层 PBG 结构间距为 p_2

质是聚四氟乙烯(介电常数为 2.22, 厚度 $h_1 = h_2 = 0.254$ mm). 选取设计的带隙中心频率 f_0 为 5 GHz, 因此 50Ω 微带线线宽 w 取为 0.8 mm. 该工作频率下介质中导波波长 λ_0 约为 45.2 mm. 研究表明^[6], PBG 周期间距取为 $d = \lambda_0/2$, 方孔的边长取为 $p_2 = d/2$ 的关系, 这是所得到的最优化结构, 阻带内具有较大的衰减, 通带的起伏又在可接受的范围之内. 我们设计的分形 PBG 结构实物照片如图 2 所示, 第一层 PBG1 的网格间距 p_1 为 38.6 mm, 共由 8 个三阶 Sierpinski gasket 组成, 第二层 PBG2 的网格间距 p_2 为 22.6 mm, 共由 7 个一阶 Sierpinski carpet 组成.

4. 理论和实验结果及分析

我们设计了三种不同 PBG 结构的低通滤波器(衬底介质均为聚四氟乙烯). 第一种是采用单层普通方孔 PBG 结构的低通滤波器(LPF1), 介质厚度为 0.22 mm; 第二种是采用单层一阶 Sierpinski carpet PBG 结构的低通滤波器(LPF2), 介质厚度为 0.22 mm; 第三种是本文提出的双层具有分形特征 PBG 结构的低通滤波器(LPF3). 运用 FDTD 法对上述三种结构进行计算机仿真, 其传输特性(传输系数 S_{21}) 如图 3 所示.

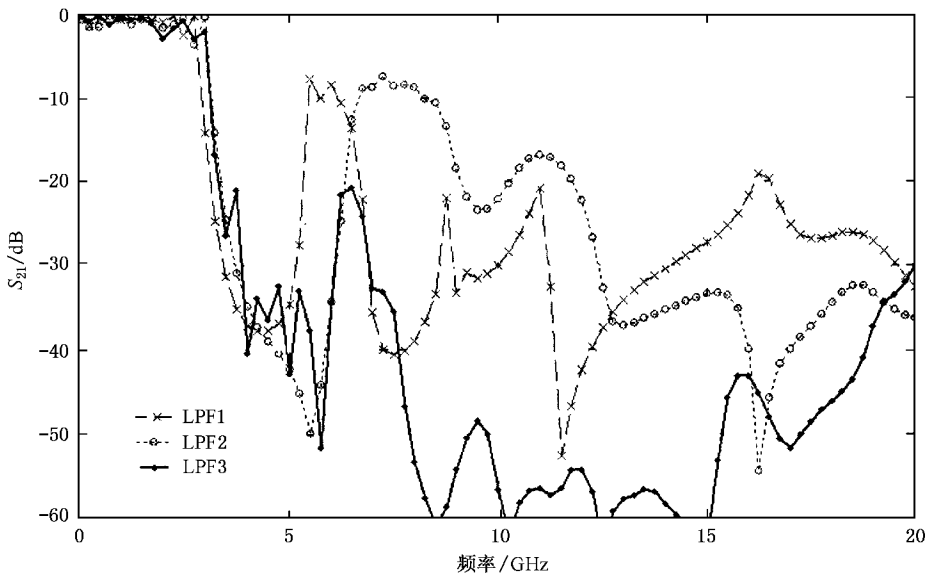


图 3 三种低通滤波器传输特性的 FDTD 计算结果

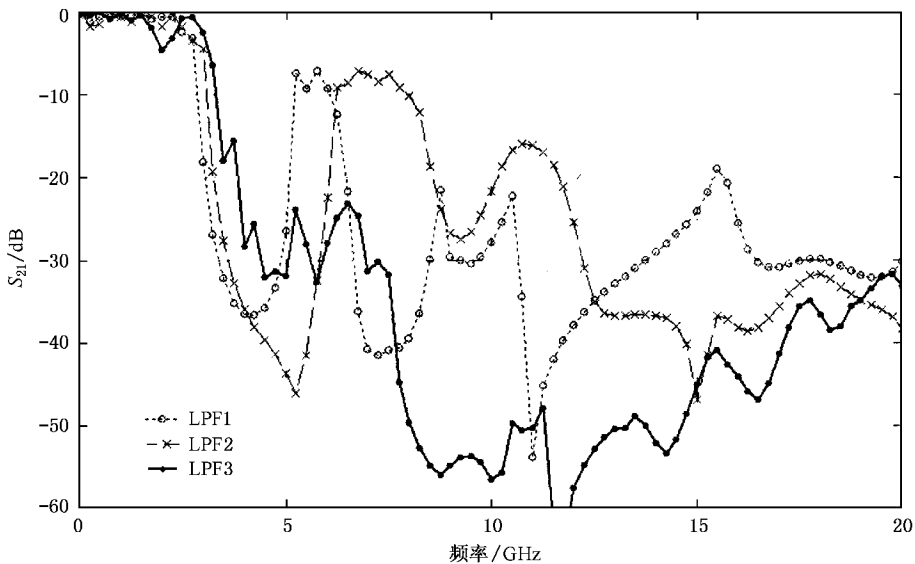


图 4 三种低通滤波器传输特性的实测结果

图 3 中,三种 LPF 的截止频率约为 3 GHz,低通频段内的通带衰减小于 1 dB. 在高阻频段阻带衰减系数三者差异明显. LP1 在 7.2 GHz 附近阻带衰减小于 10 dB,LP2 在 6 GHz 附近阻带衰减也小于 10 dB. 而 LP3 在高阻频段阻带衰减均大于 20 dB. 本例中,设计的 PBG 带隙中心频率为 5 GHz(二次谐波),在 10 GHz(三次谐波)和 15 GHz(四次谐波)处,LP3 的衰减达到 55 dB,而 LP1 和 LP2 是在 20—30 dB 之间. 对于抑制高次谐波,LP3 滤波性能优于 LP1 和 LP2.

JP 采用网络分析仪 HP8722D(工作频段为 0.05—40 GHz)对上述三种结构进行了测试,传输特性如图 4 所示. 从图 4 可以看出,测试结果与理论分析基本相符.

5. 结 论

本文提出的一种新颖的基于分形特征和双层 PBG 结构的宽阻带特性低通滤波器. 这种低通滤波器,占用电路面积较少、PBG 结构新颖. 理论计算结果和实测数据分析表明,该低通滤波器在低通频段内(50 MHz—3 GHz),信号的传输系数 S_{21} 达到了 -3 dB 以上,在阻带内(3—20 GHz),信号的传输系数 S_{21} 均低于 -20 dB. 因此,该滤波器具有良好的宽阻带低通滤波特性,能满足工程应用. 若采用介电常数大的介质基底,并对 PBG 的结构进行优化,PBG 的尺寸将大大缩小,那么这种滤波器不仅可广泛应用于微波电路,还可应用于毫米波电路和便携式移动通信设备.

- [1] Laso M G , Lopetegi T , Erro M J *et al* 2000 *Microwave and Optical Tech. Lett.* **24** 357
- [2] Radisic V , Qian Y , Coccioli R *et al* 1998 *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **8** 69
- [3] Yang F R , Ma K P , Qian Y *et al* 1999 *IEEE Microwave Theory and Techniques* **47** 1509
- [4] Coccioli R , Yang F R , Ma K P *et al* 1999 *IEEE Microwave Theory and Techniques* **47** 2123
- [5] Caloz C , Itoh T 2002 *IEEE Microwave Theory and Techniques* **50** 2206
- [6] Radisic V , Qian Y , Itoh T 1998 *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **8** 13
- [7] Rumsey I , Piket M , Kelly K 1998 *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **8** 336
- [8] Laso M G , Lopetegi T , Erro M J *et al* 2000 *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **10** 220
- [9] 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]
- [10] He Y J , Su H M , Tang F Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 892 (in Chinese) 何拥军、苏惠敏、唐芳琼等 2001 物理学报 **50** 892]
- [11] Wang H , Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) 王辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [12] Zhuang F , Xiao S S , He J P *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2167 (in Chinese) 庄 飞、肖三水、何江平等 2002 物理学报 **51** 2167]
- [13] Zhou P , You H Y , Wang S Y *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2277 (in Chinese) 周 鹏、游海洋、王松有等 2002 物理学报 **51** 2277]
- [14] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [15] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [16] Liou L , Mah M , Cook J 1998 *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **8** 330
- [17] Taesun K , Chulhun S 2000 *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* **10** 13
- [18] Caloz C , Chang C C , Itoh T 2001 *Proceeding of APMC 2001 IEEE Microwave Conference*(Taipei) 651
- [19] Xiao S S , Shen L F , He S L 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2858 (in Chinese) 肖三水、沈林放、何赛灵 2002 物理学报 **51** 2858]

A low-pass filter of wide stopband with a novel dual-layer fractal photonic bandgap structure *

Liu Hai-Wen^{1,2)} Sun Xiao-Wei²⁾ Li Zheng-Fan¹⁾ Qian Rong²⁾ Zhou Min²⁾

¹⁾(Department of Electronic Engineering , Shanghai Jiaotong University , Shanghai 200030 , China)

²⁾(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology ,
Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050 , China)

(Received 24 December 2002 ; revised manuscript received 18 March 2003)

Abstract

The concept of the photonic bandgap (PBG) is extended to a novel architecture which consists of two fractal PBG plates stacked up in the direction perpendicular to the plane of the substrate. This novel , dual-layer fractal PBG is presented here as the substrate for a microstrip line , and the resulting configuration builds a low-pass filter of wide stop-band. In the specific design , the dual-layer PBG includes two kinds of fractal PBGs with different periodicities in which one fractal PBG consists of a first-order Sierpinski carpet , and the other consists of third-order Sierpinski gasket. Simulated and measured transmission parameters in comparison with the corresponding two filters with monolayer PBG show that the filter with the proposed fractal PBG drastically enhances the width of the stop-band.

Keywords : low-pass filter , dual-layer PBG , fractal , broad stop-band

PACC : 4280C , 7820P , 0555 , 4220 , 7125P

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA135270) , and the Applied Material Research and Development Foundation of Shanghai , China (Grant No. 0109).