

# 一种新颖的 PBG 宽阻带低通滤波器

刘海文<sup>1,2</sup>, 孙晓玮<sup>2</sup>, 程知群<sup>2</sup>, 李征帆<sup>1</sup>

(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)

**摘 要:** 本文首次提出综合 PBG 结构和微带线结构两因素, 来设计滤波器的概念. 与普通 PBG 结构滤波器不同的是, 本文采用具有 T 形和十字形短截线的微带线代替直线微带线, 在接地板上只需刻蚀一列 PBG 结构即可构成宽阻带低通滤波器. 文中以 T 形短截线 PBG 结构的低通滤波器为例, 运用时域有限差分法 (FDTD), 分析了在不同短截线长度和 PBG 结构方孔边长的情况下, 该滤波器的传输特性. 文中还给出了该滤波器和 Rumsey 方法与 Kim 方法设计的级联、并联两种 PBG 结构低通滤波器的传输特性的模拟结果及其对比分析. 最后, 文中给出了模拟结果和测试结果, 来验证所设计的低通滤波器的有效性.

**关键词:** 低通滤波器; 光子带隙; 微带线; 时域有限差分法 (FDTD); 缺陷接地结构

**中图分类号:** TN45, TN713 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2004)05-0791-04

## A Novel Photonic Band-Gap Microstrip Structures for Low-Pass Filters of Wide Stop-Band

LIU Hai-wen<sup>1</sup>, SUN Xiao-wei<sup>2</sup>, CHENG Zhi-qun<sup>2</sup>, LI Zheng-fan<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Two novel low-pass filters (LPFs) of wide stop-band synthesizing both the structure of photonic band-gap (PBG) and the structure of microstrip are proposed in this paper. Compared with the conventional PBG filters with the straight microstrip line, one of the proposed filters is implemented by a one-line PBG microstrip structure with T-junction opened stubs and its transmission characteristics are discussed. The other is implemented by a one-line PBG microstrip structure with cross-junction opened stubs. The transmission characteristics of the proposed filter and the filters designed by the Rumsey's method and Kim's method are presented and discussed. The new wide-band harmonic rejection LPFs are easy to design and fabricate. Finally, The simulated and experimental results verify the validity of the LPFs.

**Key words:** low-pass filter; PBG; microstrip; finite-difference time-domain; defected ground structure

## 1 引言

近几年, 将光子带隙 (PBG) 结构和缺陷接地结构 (Defected Ground Structure, 简称 DGS) 应用于微波毫米波的电路设计<sup>[1~9]</sup>, 来滤除高次谐波或不需要的杂波, 渐成热点. Yablonovitch 研究表明<sup>[1]</sup>, 通过合理构造, 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, PBG 的这种阻带特性具有极大的理论价值和潜在的应用前景. 但是, PBG 结构的频谱具有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. 针对此问题, Rumsey<sup>[4]</sup>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, 来实现低通滤波特性. 由于要级联两个以上的 PBG 结构, 因此电路面积增大很多. Kim<sup>[5]</sup>提出一种在

同一平面上将不同周期 PBG 结构并列排列的形式, 来消除高次谐波, 达到低通滤波的效果. Caloz<sup>[6]</sup>设计了一种将两个以上 PBG 结构叠加起来的多层结构的低通滤波器, 但该低通滤波器在高频带阻部分 6GHz 附近的传输系数  $S_{21}$  达到了 -10dB, 谐波抑制效果不理想, 且为多层结构, 制作和设计难度增大.

大多数 PBG 结构的滤波器设计重点是寻求和构造合适的 PBG 结构, 信号传输一般采用一根直的微带线. 本文提出一种新颖的、基于 PBG 结构的宽阻带低通滤波器, 首次提出将 PBG 结构和微带线结构结合起来设计滤波器的方法. 该方法采用具有 T 形或十字形短截线的微带线代替普通直线微带线, 只需在接地板上刻蚀一列 PBG 结构, 即可获得性能良好的宽阻带低通传输特性. 模拟和测试结果表明它的有效性. 文末, 还介绍了一种新颖的缺陷接地结构 (Defected Ground Struc-

ture, 简称 DGS), 以及作者在这方面工作的一些进展.

## 2 PBG 结构低通滤波器的设计

本文提出的基于 PBG 结构的低通滤波器的结构如图 1 所示. 图 1(a) 顶层是带 T 形开路短截线的  $50\Omega$  微带线, 图 1(b) 中是带十字形开路短截线的  $50\Omega$  微带线. 微带线下面是由聚四氟乙烯构成的介质层(介电常数为 2.22, 厚度为 0.254mm). 该介质下面是一层刻蚀有正方形方孔的 PBG 结构的接地板. 微带线和接地板材料为铜, 其表面镀金. 选取带隙中心频率  $f_0$  为 5GHz, 因此  $50\Omega$  微带线线宽  $w_1$  约为 0.78mm. 该工作频率下介质中导波波长  $\lambda_g$  约为 43.6mm. T 形开路短截线和十字形开路短截线线宽  $w_2 = 0.78\text{mm}$ , 线长  $l = 10.9\text{mm}$  ( $\lambda_g/4$ ). 接地板上 PBG 结构中的方孔间距<sup>[2,3]</sup>最佳值  $d$  约为  $\lambda_g/2$ , 即 21.8mm, 方孔边长最佳值约为  $d/2$ , 即 10.9mm.

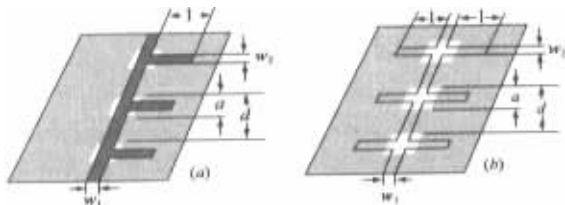


图 1 本文提出的基于 PBG 结构的低通滤波器的结构示意图  
(a) T 形开路短截线 (b) 十字形开路短截线

## 3 低通滤波器传输特性的分析

以图 1(a) 中所示具有 T 形开路短截线的 PBG 结构的低通滤波器为例, 运用时域有限差分法(FDTD), 分析其传输特性.

### 3.1 短截线长度 $l$ 对滤波器传输特性的影响

分别取  $l = 8\text{mm}$ ,  $10.9\text{mm}$  和  $21.8\text{mm}$ , 其传输特性如图 2 所示. 由图 2 可知, 随着  $l$  增加, 该滤波器的截止频率减小. 其原因是当改变开路短截线长度  $l$ , 开路短截线的串联谐振频率随之改变, 从而改变了滤波器的截止频率.

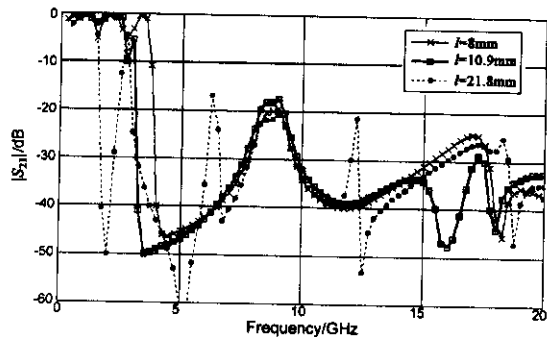


图 2 不同的短截线长度  $l$  滤波器传输特性( $S_{21}$ )的 FDTD 模拟结果

### 3.2 PBG 结构方孔边长 $a$ 对滤波器传输特性的影响

分别取 PBG 结构方孔边长  $a = 5\text{mm}$ ,  $10.9\text{mm}$  和  $16\text{mm}$ , 其传输特性如图 3 所示. 由图 3 可分析得,  $a$  的变化对滤波器的截止频率影响很小, 但是,  $a$  的变化对通带内波纹影响较大. 与  $a = 5\text{mm}$  和  $16\text{mm}$  两种情况下相比, 当  $a = 10.9\text{mm}$  (即  $\lambda_g/4$ )

时, 通带内波纹起伏较小, 结果比较理想. 这个  $a$  值选取结果与 PBG 经验公式<sup>[7]</sup>计算选取  $a$  值的结果是吻合的.

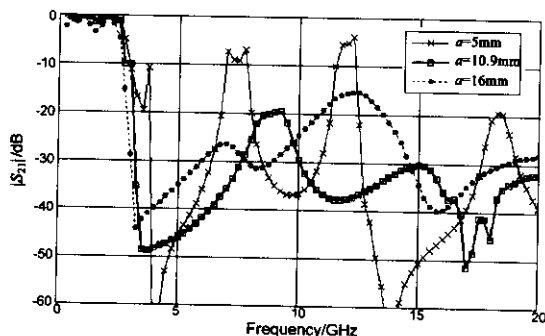


图 3 不同 PBG 结构方孔边长  $a$  滤波器传输特性 ( $S_{21}$ ) 的 FDTD 模拟结果

## 3.3 与 Rumsey 方法和 Kim 方法设计的 PBG 结构低通滤波器的比较

Rumsey<sup>[4]</sup>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, 来实现低通滤波特性. 此处, 我们选取带隙中心频率为 5GHz 和 10GHz 两种 PBG 结构级联构成的 PBG 结构. Kim<sup>[5]</sup>提出一种在同一平面上将不同周期 PBG 结构并列排列的结构, 来消除高次谐波. 此处, 我们选取带隙中心频率为 5GHz 和 7.5GHz 两种 PBG 结构并联构成的 PBG 结构. 比较上述两种方法构成的 PBG 结构低通滤波器与本文图 1(a) 所示结构的低通滤波器的传输特性, 三者的模拟结果如图 4 所示.

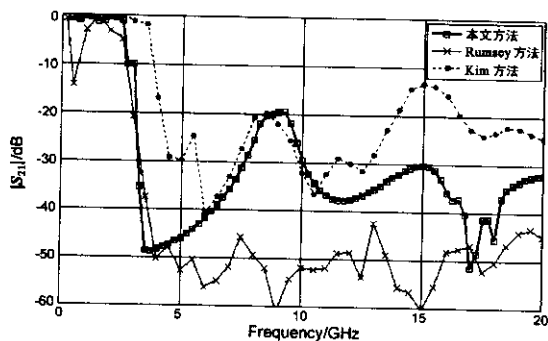


图 4 基于本文方法、Rumsey 方法和 Kim 方法设计的 PBG 结构低通滤波器三者传输特性( $S_{21}$ )的 FDTD 模拟结果对比

由图 4 分析可知, Rumsey 方法设计的低通滤波器具有很好宽阻带特性, 但是, 通带内波纹起伏明显大于其他两种方法的波纹起伏, 而且, 该滤波器需要占用很大的面积. 本文方法和 Kim 方法设计的低通滤波器, 通带内波纹起伏小于 1dB. 另外, 本文方法设计的低通滤波器宽阻带特性优于 Kim 方法设计的低通滤波器, 而且, 占用电路面积很小.

## 4 模拟结果和测试结果

根据图 1 所示结构, 制作了两个基于 PBG 结构的低通滤波器(分别采用 T 形和十字形短截线的微带线结构). 它们的传输特性如图 5 所示.

由图 5 知, 由具有 T 形短截线和具有十字形短截线构成的 PBG 结构低通滤波器在低通频段(0.5GHz ~ 3GHz 之间)传

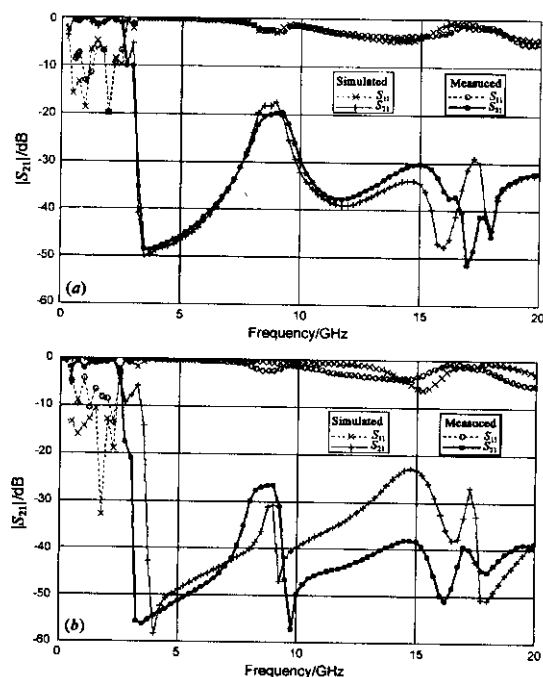


图 5 本文设计的两个低通滤波器传输特性的模拟结果与测试结果 (a) T 形短截线 (b) 十字形短截线

传输系数  $|S_{21}|$  大于  $-1$  dB, 在高频频段 (3GHz ~ 20GHz 之间) 传输系数  $|S_{21}|$  小于  $-20$  dB, 满足实际应用要求, 并且, 后者的宽阻带特性优于前者。图 5 还表明, 模拟结果与实测结果基本吻合。本测试是在微波网络分析仪 HP8722D 上完成的, 其工作频段为 0.05GHz ~ 40GHz。

## 5 缺陷接地结构 (DGS) 及其应用

2000 年, 韩国学者在研究 PBG 结构的基础上提出了 DGS 结构<sup>[10]</sup>。与 PBG 相比, DGS 结构更加小巧、等效电路建模更加简单, 在微波毫米波电路实际应用中更具有优势<sup>[7-10]</sup>。DGS 结构只需在微带电路金属接地板上刻蚀一个缺陷单元即可实现阻带特性。我们设计了一个在十字型微带线下的接地板上刻蚀一个缺陷单元的低通滤波器, 结构如图 6 所示。图中灰色部分为微带线, 虚线为接地板上的缺陷单元。该缺陷单元由两部分组成, 一部分是微带线下的空隙  $g$ , 一部分是空隙两端的

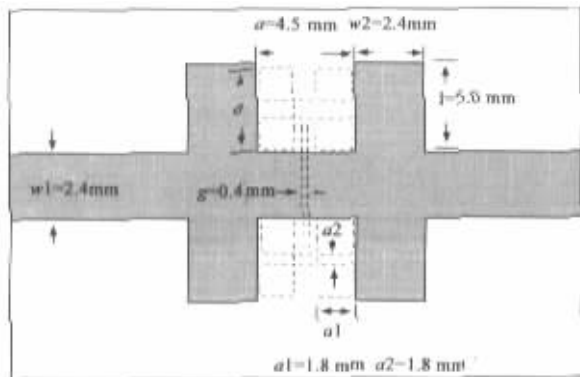


图 6 分形结构 DGS 低通滤波器的结构示意图

$a \times a$  正方形 (该正方形形状是一个类似于 Sierpinski 毯的分形图案)。介质材料厚度是 0.762mm, 介电常数是 2.22。该滤波器的传输特性结果如图 7。该滤波器电路参数提取过程请参考文献 [8]。

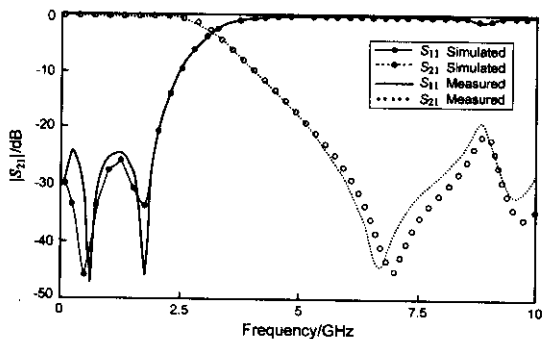


图 7 分形结构 DGS 低通滤波器传输特性的模拟结果与测试结果

## 6 结论

本文提出一种新颖的、基于 PBG 结构的宽阻带低通滤波器。该滤波器采用具有 T 形和十字形短截线的微带线代替普通直线微带线, 并结合在接地板上刻蚀一系列 PBG 结构, 即可获得良好宽阻带低通传输特性。模拟和测试结果表明它的有效性。与以往 PBG 结构低通滤波器相比, 它具有如下优点: (1) 电路结构简单 (2) 具有很好的宽阻带特性和较小的通带波纹 (3) 很低的插入损耗 (4) 该结构易于实现, 可应用于微波电路和天线设计。

## 参考文献:

- [1] E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys. Rev. Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] V Radisic, et al. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8(2): 69-71.
- [3] F R Yang, Y Qian, T Itoh. A novel uniplanar compact PBG structure for filter and mixer applications [J]. IEEE MTT-S, 1999, 1(6): 919-922.
- [4] I Rumsey et al. Photonic bandgap structure used as filters in microstrip circuit [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8(10): 336-338.
- [5] T Kim, C Seo. A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(1): 13-15.
- [6] C Caloz et al. Multilayer and anisotropic planar compact PBG structure for microstrip application [J]. IEEE MTT, 2002, 50(1): 2206-2208.
- [7] Haiwen Liu, et al. A novel defected ground structure to improve the output power of a VCO [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 38(4): 279-281.
- [8] Haiwen Liu. A novel fractal defected ground structure and its application to the low-pass filter [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 39(6): 453-458.
- [9] Haiwen Liu, et al. An improved 1-D period defected ground structure

for microstrip line[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, accepted 2004.

[10] Chul-Soo Kim et al. A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(4):131-133.

作者简介：

刘海文 男,1975 年生于湖南邵阳,1997 年、2000 年获武汉大学学士、硕士,2001 年起,在上海交通大学电子工程系攻读博士学位,研究兴趣有微波技术和混沌理论等,在 IEEE 等国外期刊上发表论文 10 余篇. Email: haiwen\_liu@hotmail.com, haiwen\_liu@sjtu.edu.cn.

孙晓玮 女,1958 年出生于北京,研究员,博士生导师,IEEE 会

员,1996 年获西安交通大学微电子专业博士学位;1998 年中科院上海微系统与信息技术研究所博士后流动站出站,1999 年英国 Sheffield 大学电子工程系高级访问学者,发明专利 3 项,在国内外学术刊物上发表论文 60 余篇.

程知群 男,1964 年 5 月出生于安徽巢湖,副研究员,合肥工业大学硕士,2000 年获中科院上海微系统与信息技术研究所微电子专业博士学位.

李征帆 男,1936 年出生于浙江上虞,教授,博士生导师,获国务院特殊津贴,1958 年毕业于清华大学电子工程系,美国康乃尔大学高级访问学者,现任上海交通大学电子科学与技术博士后流动站负责人,发表论文 100 余篇,其中 20 余篇发表于 IEEE Transactions 上,中国通信学会微波通信委员会委员,通信学报、微波学报、电波科学学报、上海交大学学报编委.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>