

多层结构的光子带隙特性

庞云波, 高葆新

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 文中提出了一种具有光子带隙特性的多层结构, 由方形金属构成的周期阵列位于介质衬底的正中. 此结构与传统的微带电路完全兼容, 制作时无需在介质衬底中打孔, 同时保持了接地地板的完整性. 文中比较了阵列平面处于不同位置时的带隙特性, 然后通过改变阵列形式来改善带隙特性. 文章的最后说明了该结构的一种应用方式.

关键词: 光子带隙; 时域有限差分法; 微带; 滤波器

中图分类号: TN713.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1372-04

The Photonic Bandgap of the Sandwich Structure

PANG Yun-bo, GAO Bao-xin

(Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents a sandwich structure of photonic bandgap (PBG), in which a periodic pattern of square metal pads is printed in the midmost of the substrate. It is compatible with the conventional microstrip circuits. Neither drilling nor suspending the substrate is required, and the integrality of the ground plane is also kept. Several circuits with different pattern of periodic lattice are compared, and potential applying way is demonstrated.

Key words: photonic bandgap; finite difference time domain method; microstrip; filter

1 引言

光子晶体^[1] (Photonic Crystal) 是一种介质材料在另一种介质材料中周期排列所组成的特殊结构, 其特点是能够产生光子带隙 (PBG: Photonic Bandgap). 应用于微波领域, 它能够阻止特定频段内的电磁波传播. 光子晶体广泛应用于^[2,3] 抑制谐波、改善效率、提高电磁兼容性, 它可以用来制作宽频带阻滤波器、宽带反射器、匹配器、延时线、高 Q 谐振器、单向辐射天线、人身防护天线、雷达或天线的防辐射罩等等.

制作光子晶体, 可以采用悬空或衬垫的介质球, 也可以构造高介电常数材料中的空气球. 早期还采用层叠方式, 但这些结构对机械加工的精度要求很高, 制作困难. 于是 1991 年 E. Yablonovitch 等提出了一种仅需在固体介质材料的上表面钻长斜孔的方法^[4], 由于只需要在介质材料的上表面这一层进行操作, 降低了制作难度, 同时解决了制作光波段的光子晶体的难题. 尽管如此, 它还是需要作二维的机械加工, 工作量仍然很大.

针对平面微带结构, Yongxi Qian 提出了一种崭新的光子晶体制作方法^[5]: 不是像以往那样在作为微带衬底的介质材料中钻孔, 而仅仅是在微带结构的接地金属板上蚀刻周期性阵列. 这就完全可以采用目前相当成熟的 PCB (Printed Circuit Board) 制版工艺直接实现, 从而大大地减小了工作量, 节约时间的同时也提高了光子晶体的制作精度.

由于 Qian 的这种光子带隙结构是蚀刻在接地地板上的, 自然破坏了地板的完整性, 因而不能直接把微带电路固定到金属板上^[6]. 而如果没有对光子带隙结构进行恰当的屏蔽, 某个处于禁带内的频率的辐射可能很大, 甚至于显著影响附近的电路. 所以必须要有一个屏蔽盒来减少由于蚀刻地板而带来的辐射损耗. 根据传输理论, 屏蔽盒将减小电路的等效介电常数和特征阻抗, 并且可能造成谐振. 于是为了减小屏蔽盒的额外影响, 必须将微带电路悬空于屏蔽盒中, 使其与盒的间距不小于衬底厚度的五倍^[7]. 这就使得整个屏蔽结构复杂, 同时加大了系统的体积.

本文提出了一种全新的制作光子带隙结构的方法. 它利用常规 PCB 工艺实现周期阵列, 将其置于介质衬底之中. 这种方法与 Qian 的方法一样, 无需在衬底打孔, 制作简单, 精度相同. 由于避免了在微带结构的接地金属板上蚀刻阵列, 因而保持了接地地板的完整性. 这样在使用屏蔽盒时, 就不必像 Qian 的方法那样要做特别的考虑, 因而总体结构简单而紧凑.

利用时域有限差分法 (FDTD: Finite difference time domain)^[8] 得到的仿真结果和实验的测量结果都证明这种结构拥有光子带隙特性. 此方法说明一个经过恰当安排的周期阵列, 无论其形状和位置如何, 都可以是一个光子带隙结构. 另一个重要的特性是, 可以通过调节周期阵列在介质衬底中的位置来调节该结构所具有的禁带宽度和深度. 此结构与传统

收稿日期: 2002-05-20; 修回日期: 2002-06-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69971013)

的微带电路完全兼容,因而可以很方便地应用于现有系统中. 尽管在目前的设计中,为了便于和常规微带线进行对比,在结构的上方没有制作其它电路,但很容易实现它与其它电路的整合,从而有效减小总体电路的尺寸. 文中还简单说明了一种应用方式. 总的来说,此结构设计简单、制作方便,并且便于应用.

2 多层结构的原理

导致光子带隙产生的本质因素在于结构的波阻抗^[9]. 无论是排列介质,还是在地板上蚀刻阵列,都是通过对阻抗的周期调制而实现光子带隙的. 而根据传输线理论,无损传输线的特性阻抗为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

其中 L 、 C 分别是单位长度的分布电感和电容. 这样,在 L 保持不变的情况下,加大 C 就可以调制阻抗,实现光子带隙.

定义反射系数 $\Gamma = \frac{Z_1/Z_2 - 1}{Z_1/Z_2 + 1}$, 其中 Z_1 、 Z_2 为阻抗. 定义 PBG 的带宽与中心频率的比值为 $\gamma = \Delta\omega/2\omega_0$, 其中 $0 \leq \gamma \leq 1$. 参考文献[10], 有 $\cos^{-1}(|\Gamma|) = \frac{\pi(1-\gamma)}{2}$, 那么,

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1 + \cos \frac{\pi(1-\gamma)}{2}}{1 - \cos \frac{\pi(1-\gamma)}{2}} \text{ 或者 } \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1 - \cos \frac{\pi(1-\gamma)}{2}}{1 + \cos \frac{\pi(1-\gamma)}{2}} \quad (2)$$

这说明了阻抗调制与 PBG 相对带宽的关系. 当 $\gamma = 0$ 时, $Z_1 = Z_2$; 当 $\gamma = 1$ 时, $Z_1/Z_2 = \infty$. 因此要获得足够的禁带宽度,就要有相应的阻抗调制度.

设计时,首先确定所需的中心频率和相对带宽,由公式(2)得出相应的阻抗调制度. 在假设 L 不变的情况下,由公式(1)可以得到相应的电容调制度. 由于此微带结构的复杂性,难以通过解析方法得到其等效 L 、 C 参数的精确数值,为此采用了 FDTD 全波分析方法.

实验采用的多层结构是由两块厚度均为 0.8mm 的介质

板来构成总厚度为 1.6mm 的衬底,其相对介电常数 $\epsilon_r = 13$. 而按照均匀周期排列的方形金属被印制在下层介质板的上表面,进而埋在整个结构的正中间. 图 1 是采用这种结构制作的一根 50Ω 微带线. 为清晰起见,图中没有把两块介质板胶合起来.

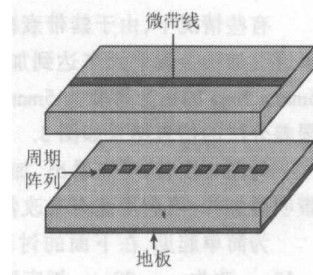


图 1 多层结构的示意图

该微带线的宽度为 1.2mm, 对应于常规介质衬底上的 50Ω 线. 在衬底正中沿微带线的纵向一共排列了 9 个金属单元. 每个单元均为正方形, 其尺寸为 5mm × 5mm. 而整个结构的周期为 $a_0 = 10$ mm.

3 仿真计算与实验测量

采用时域有限差分法对该结构进行计算机仿真, 得到的反射系数(S_{11})和传输系数(S_{21})如图 2 中虚线所示(图中标注为 Sim_ S_{11} 、Sim_ S_{21}).

从图中可以看出在 5GHz 附近有一个明显的禁带, 其中心频率是整个结构的周期的函数. 这是光子带隙结构所特有的性质. 此外, 该图显示此结构的通带损耗接近 0dB, 表明采用该方法构造的新结构既没有破坏匹配条件, 也没有增加导体损耗.

由于在此结构中, 周期阵列位于衬底的正中, 所以其禁带宽度比 Qian 的结构要小. 但 Qian 的结构禁带中, 具有更大的波动, 而且其通带损耗更大(特别是在低频区域). 而对于多层结构, 完全可以采用其它方法来调节禁带的宽度.

利用 hp8510c 网络分析仪测试该结构的反射和传输系数. 测得的传输系数(图 2 中标注为 Mea_ S_{21})与仿真结果吻合的很好. 而且其总体损耗(金属介质损耗与辐射损耗)并不比常规微带线的大. S_{11} 的测量值不够好是由于网络分析仪接口磨损所致.

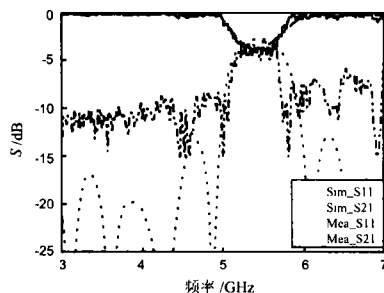


图 2 多层结构的反射系数和传输系数

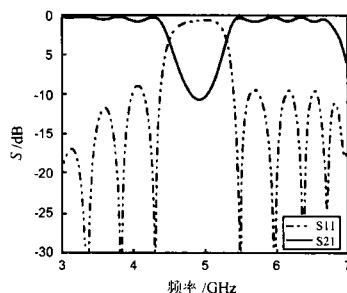


图 3 加长金属单元后, 多层结构的反射系数和传输系数

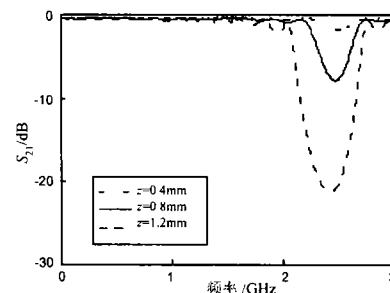


图 4 周期阵列位于不同 z 平面时, 多层结构的传输参数

4 非均匀周期与非正方单元结构

为了加大禁带宽度, 可以采用 chirp 技术^[11], 即按下述公式调整多层结构的周期:

$$a_i = a_0 \cdot (1 + i\delta) \quad (3)$$

式中 a_0 是单元周期长度. 采用时域有限差分法分析了 $\delta = 4\%$ 和 $\delta = 8\%$ 时的多层结构. 根据仿真结果^[12] 可以发现, 当调节参数 δ 变大时, 其禁带宽度也相应增大, 并且在禁带中出现了明显的波动. 这些现象表明多层结构确实是光子带隙结构. 调节参数 δ 越大, 禁带越宽的同时禁带深度却越浅.

有些情况下,由于禁带衰减较小,实际应用受限.我们可以通过加长金属单元来达到加大衰减的目的.当金属单元从 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的正方形变为 $5\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的长方形时,其时域有限差分法的仿真结果如图 3.

与图 2 比较,可以看出,加长金属单元后,多层结构的禁带明显加深.可利用这点来改善多层结构.

为简单起见,在下面的讨论中,多层结构的周期将从 $a_0 = 10\text{mm}$ 改为 $a_0 = 20\text{mm}$,相应地其中心频率将从 5GHz 附近变为 2.5GHz 附近.

前述几个多层结构的周期阵列都位于介质衬底的正中.如果取垂直衬底的方向为 z 轴,设接地地板所在平面为 $z = 0$ 平面,则前述结构的周期阵列都位于 $z = 0.8\text{mm}$ 平面上.沿 z 轴改变阵列平面的位置,分别利用时域有限差分法进行仿真分析.图 4 显示了阵列平面分别位于 $z = 0.4, 0.8, 1.2\text{mm}$ 时,仿真所得到的传输参数.

根据图 4 的结果,可以发现,周期阵列所在平面距离多层

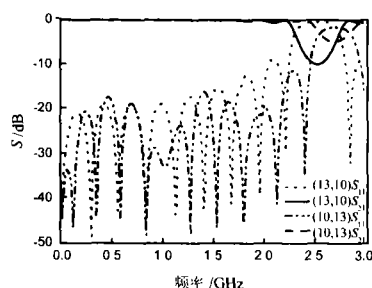


图 5 不同介质材料作为衬底时,多层结构的反射系数和传输系数

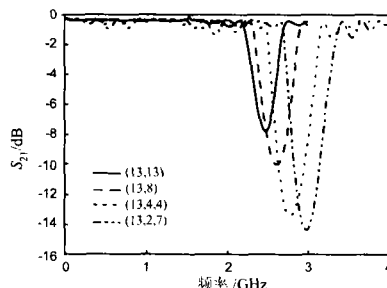


图 6 不同的 ϵ_{r2} 参数对多层结构的传输系数的影响

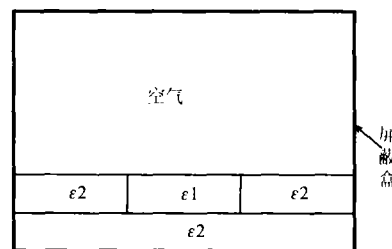


图 7 减小光子带隙结构尺寸方法的简单示意图($\epsilon_{r1} > \epsilon_{r2}$)

根据图 5,可以发现 $(13,10)$ 结构的禁带要比 $(10,13)$ 的更宽更深.更重要的是,前者的禁带的中心频率比后者的低,这就意味着 $(13,10)$ 结构拥有更高的等效介电常数.应该很好地利用这一点:保持 ϵ_{r1} 参数不变,而仅仅改变 ϵ_{r2} 参数.图 6 是利用时域有限差分法得到的仿真结果.

根据图 6,可以发现: ϵ_{r2} 参数越小,系统的禁带的中心频率就越高.尽管 ϵ_{r2} 参数从 13 变到了 2.7,相差达 4.8 倍,但是禁带的中心频率仅仅从 2.5GHz 变为 3GHz ,只有 1.2 倍.这就意味着下层介质板对多层结构的光子带隙特性的影响不如上层介质板,可以利用这一点来减小结构的尺寸.

众所周知,典型的光子带隙结构是一种以半波长为周期的阵列.为了减小尺寸,必须采用高介电常数的介质材料作为衬底,或者想尽办法来实现某种小型化的结构^[13,14].而采用本文的方法,可以在不改变整体电路衬底材料的情况下达到减小光子带隙结构尺寸的目的.图 7 是其简单的示意图.

假设一个典型的光子带隙结构制作在相对介电常数 $\epsilon_r = 2.7$ 的厚度为 1.6mm 的介质材料上,其周期是 33mm .而按照我们的方法,在采用 $(13,2.7)$ 结构的情况下,多层结构的周期仅为 20mm ,不足原有长度的 $2/3$.这样,就可以有效地减小系统尺寸.

这种结构的另一个优点是不必把整个衬底都换成高介电常数的材料,因而可以减小损失,降低成本.而且,所有的电路

结构上表面的微带线越近,结构的禁带就越宽和越深.因此,可以通过改变周期阵列平面在 z 轴的位置来调节禁带的宽度和深度.当周期阵列平面位于 $z = 1.2\text{mm}$ 时,禁带已经足够宽、足够深,完全可以作为滤波器使用了.

而如果在此基础上,再加长金属单元,则禁带的改善将更为明显.这样可以通过改变金属单元的长度,改变周期阵列的平面位置,来调节多层结构的禁带的宽度与深度.

5 多层非同质材料的结构

前述结构中,两块介质板的材料是相同的.假设上、下层介质材料的相对介电常数分别为 $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$,如果采用符号 $(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2})$ 来表征整个结构,那么前述结构均可表示为 $(13,13)$.依据不同的介质材料来搭建多层结构,然后分别利用时域有限差分法进行仿真分析.图 5 是 $(13,10)$ 和 $(10,13)$ 多层结构的仿真结果.

都是采用常规的 PCB 制版工艺实现的,不需要复杂的步骤.

6 结论

本文提出了一种崭新的构造光子带隙结构的方法.该方法无需在衬底当中打孔,不必悬空衬底,而且保证了接地地板的完整性.因而不需要复杂的屏蔽盒,从而可以方便地应用于平面微带电路,同时也有利于在结构的上表面整合其它微带电路.该方法的另一个重要特性是多层结构的禁带的宽度和深度可以很方便地予以调节.在微带电路中采用这种方法构造光子带隙结构,可以有效减小结构尺寸.此方法简便实用,成本低廉.

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] 高葆新, 庞云波. 光子带隙结构材料与微波集成电路[A]. 2000' 全国第八届"微波集成电路与移动通信"学术年会论文集[C]. 长沙: 中国电子学会微波分会, 2000. 1 - 4.
- [3] 庞云波, 高葆新. 光子带隙结构的发展及其数值计算[A]. 2000' 全国第八届"微波集成电路与移动通信"学术年会论文集[C]. 长沙: 中国电子学会微波分会, 2000. 181 - 184.
- [4] E Yablonovitch. Photonic band-gap structures [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1993, 10(2): 283 - 295.

- [5] Vesna Radisic, et al. Novel 2-D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1998, 8 (2): 69 - 71.
- [6] Zhengwei Du, et al. Novel microstrip photonic bandgap cell structures [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 22 (7): 1075 - 1086.
- [7] T Akalin, et al. PBG-type microstrip filters with one- and two-sided patterns [J]. Microwave Opt. Tech. Lett., 2001, 30(1): 69 - 72.
- [8] A Taflov. Computational Electrodynamics: The Finite - Difference Time-Domain Method [M]. Boston, MA: Artech House, 1995.
- [9] C - S Kee, et al. Essential parameter in the formation of photonic band gaps [J]. Phys. Rev. E, 1999, 59(4): 4695 - 4698.
- [10] C - S Kee, et al. Roles of wave impedance and refractive index in photonic crystals with magnetic and dielectric properties [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2148 - 2150.
- [11] M A G Laso, et al. Novel wideband photonic bandgap microstrip structures [J]. Microwave and Optical Tech. Lett, 2000, 24(5): 357 - 360.
- [12] Yunbo Pang, Baoxin Gao. A new sandwich structure of photonic bandgap [A]. IEEE MIT-S International Microwave Symposium [C]. Seattle, USA: IEEE, 2002.
- [13] 庞云波, 高葆新. 一种新型的光子带隙结构单元 [J]. 微波学报, 2001, 17(2): 77 - 80.
- [14] Yunbo Pang, Baoxin Gao. Miniaturization of photonic bandgap structure for microstrip lines [A]. 2001 International Laser, Lightwave and Microwave Conference [C]. Shanghai: NNSF of China, OS of America, IS of Japan, 2001. 245 - 248.

作者简介:



庞云波 男, 1975 年 8 月生于杭州, 1998 年毕业于清华大学电子工程系, 获工学学士学位, 现为清华大学电子工程系博士研究生. E-mail: pangyunbo98@mails.tsinghua.edu.cn



高葆新 男, 1934 年 9 月生于北京, 清华大学电子工程系教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 中国电子学会学术委员, 微波集成电路与移动通信专业委员会主任, 曾获国家科技进步奖、光华科技成就奖、国家优秀教材奖等约 10 项, 编著与主编的科技书有:《微波集成电路》、《微波电路计算机辅助设计》、《微波场效应晶体管的理论设计和应用》、《电子调谐器原理与设计》等 11 册, 发表论文近 200 篇, 目前研究领域: 微波有源与无源电路, 射频与微波 CAD, 电磁场数值分析, 光电集成前端, 微机电系统。