

一种新的紧凑型人工磁导体结构

闫敦豹 高强 付云起 张国华 袁乃昌
(国防科技大学光子晶体研究中心 长沙 410073)

摘要: 本文提出了一种新型的紧凑型人工磁导体(AMC)结构,同样的单元尺寸可以获得较低频率的反射相位阻带带隙,可以比较有效地解决 AMC 结构的大尺寸问题。制作了相应的实际电路,测量结果与仿真结果基本一致。

关键词: 光子晶体,电磁带隙,高阻表面,人工磁导体,表面波

中图分类号: TN015 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)12-2008-03

A Novel Compact AMC Structure

Yan Dun-bao Gao Qiang Fu Yun-qi Zhang Guo-hua Yuan Nai-chang
(PBG Research Center, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, a novel compact Artificial Magnetic Conductor (AMC) structure is presented. For same unit size, this structure can provide lower frequency of phase reflection bandgap. So the large size problem of normal AMC structure can be solved effectively. Several practical circuits are manufactured, and the measured results are basically accordant to simulated results.

Key words Photonic crystals, Electromagnetic band-gap, High impedance surface, Artificial Magnetic Conductor (AMC), Surface wave

1 引言

光子晶体是指具有一定光子带隙(PBG-Photonic Band-Gap)的一种人造周期性电介质结构^[1]。其研究范围涉及光学、电磁学、声学波段,在微波和毫米波领域经常称其为电磁带隙(Electromagnetic Band-Gap, EBG)结构。EBG结构的引入为微波领域的发展提供了一个新的方向,在微带电路里可以用EBG结构实现带阻滤波器^[2,3]、谐振器^[4,5],可以抑制谐波^[6],提高放大器效率^[7]等;在天线方面可以用其实现抛物面天线反射面^[8],可以加载于微带天线用于抑制表面波^[9]从而改善天线方向图等。

近来美国青年学者Sievenpiper又提出了一种新型的EBG结构,由于其对某一频段的表面波具有高阻特性,所以称其为高阻抗表面(High-impedance surface)^[10]。这种结构具有两种特性,一是对在其表面传播的表面波(频率需位于其阻带之内)具有抑制作用,或者说它不支持某一频段的表面波的传播;二是对垂直于其表面入射的平面波(同样频率需位于其阻带之内)具有同相位反射的效果,也就是说在其表面上,反射波与入射波的相位没有发生变化,而金属表面会使反射波产

生180°的相位变化。这两种特性是统一的,因为由其表面的高阻抗特性,用公式可以推出其表面对垂直入射波的零反射相位差特性,所以表面波带隙的中心频率与零反射相位点频率是一致的,二者统一的特性对微波领域的发展有着十分重要的意义^[11]。

利用高阻抗表面抑制表面波的特性,将其环绕在微带天线的周围,可以明显地降低背瓣辐射,改善天线的方向图^[12]。而其零反射相位特性类似于理想磁导体的特性,所以具有这种特性的结构又被称为人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)。AMC结构可以应用于天线实现低剖面天线^[13]。上面提到的两种用途在实际中实现时必须采用足够的周期数目,否则效果并不明显,这就较大地增加了天线的尺寸。国外对AMC结构的研究已经比较深入,但国内还未见到相关的公开报道。

现代的无线通信系统要求电路具有小尺寸和宽带特性,所以在实际的微带电路设计中必须考虑降低电路尺寸以及增加带宽,EBG结构以及现在提出的AMC结构在微带电路中的应用亦是如此^[14]。本文提出了一种新型的结构,对于同

样的单元尺寸，这种结构可以获得较低频率的阻带，或者说对于同样的应用频率，这种结构的单元尺寸要小于常用的高阻抗表面结构。

2 结构设计

这种新型的 AMC 结构贴片单元呈“十”字形，中心位置通过过孔(via)接地，十字贴片单元之间构成缝隙。实际的周期单元如图 1(a)中的粗线方框所示，单元的尺寸参数只有两个，一个是十字单元的分支的宽度 b ，另一个是单元之间的缝隙宽度 g 。那么实际的周期长度 a (两相邻十字形单元的过孔之间的距离示于图 2)为

$$a = (b + g)\sqrt{5} \tag{1}$$

本文中采用的结构尺寸参数为 $b=2.82\text{mm}$ ， $g=0.4\text{mm}$ ，由此 $a=7.2\text{mm}$ 。用以作比较的普通的正方形单元的尺寸参数为单元宽度 $w=6.8\text{mm}$ ，缝隙宽度 $g=0.4\text{mm}$ ，周期长度为 7.2mm 。两种结构的缝隙宽度与周期长度均相同。采用的板材相对介电常数为 10.2，厚度为 4mm 。

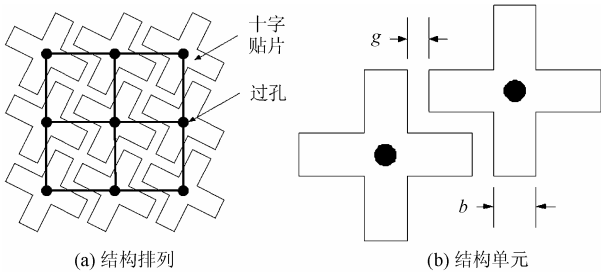


图 1 新型的 AMC 结构

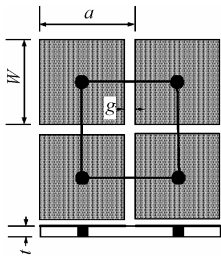


图 2 普通的 AMC 结构

3 等效电路分析

对于普通的 AMC 结构，Sievenpiper 采用了等效电路模型的分析方法^[10](如图 3 所示)，其中

$$C = \frac{w(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{a}{g}\right) \tag{2}$$

$$L = \mu_0 t \tag{3}$$

则此结构的谐振频率为

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} \tag{4}$$

而对于本文提出的新型结构也可以用此方法，从结构本身而言等效电感与普通的 AMC 结构相同，本文使用的缝隙宽度相同，但是缝隙长度加大了，从而使得等效电容加大，使得结构的谐振频率降低。实际的缝隙等效电容约为

$$C = \frac{(3b + 2g)(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{a}{g}\right) \tag{5}$$

这就意味着电容增大了

$$w'/w = (3b + 2g)/(\sqrt{5}(b + g) - g) \tag{6}$$

由此，谐振频率可以降低 15% 左右。所以从等效电路的角度分析，本文提出的结构可以降低谐振频率，对于同样的电路尺寸可以得到较低的阻带中心频率，可以依据式(5)，式(3)，式(4)估计其谐振频率。但是 Sievenpiper 的等效电路模型本身只是估计方法，本身并不精确，所以本文引用此方法得到的也只是估计公式，并不是精确的计算公式。

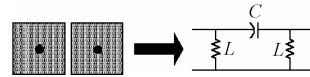


图 3 普通 AMC 的等效电路

4 仿真结果

对普通的 AMC 结构以及本文提出的十字形结构进行了仿真计算，以一个单元建模，周围应用周期边界条件，分别仿真了结构的色散关系曲线和反射相位曲线。图 4 为普通 AMC 结构的仿真结果，图 5 为十字形 AMC 结构的仿真结果。在色散关系曲线中，带隙已明显标示。从结果可以看出，反射相位正负 90° 对应的带隙与通过色散关系得到的带隙基本一致，另外图 5 得到的带隙中心频率比图 4 所示的阻带频率低 200MHz 左右，与用估计公式得到的结果也基本一致。

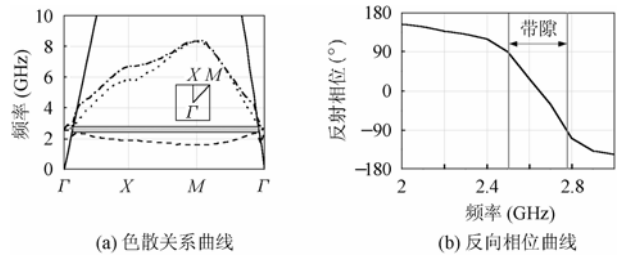


图 4 普通 AMC 结构的仿真结果

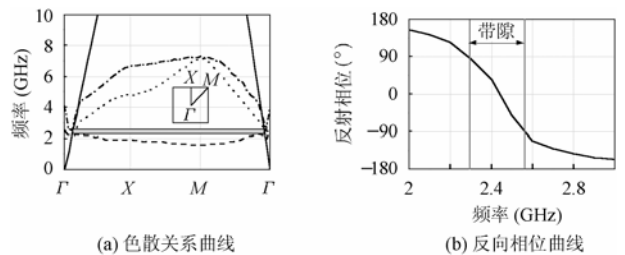


图 5 十字形 AMC 结构的仿真结果

5 实验结果

分别制作了相应的实际电路,并用文献[10]中的方法进行了 TM 模带隙的测试,利用短同轴探针激励 TM 模表面波,测量其表面波传输特性。图 6 为测试结果,测试结果得到的带隙中心频率以及带隙宽度与仿真结果基本一致,本文提出的十字形 AMC 结构比普通 AMC 结构的带隙中心频率降低了 200MHz 左右,但是带隙宽度减小了一些,从等效电路角度分析,带隙宽度与等效电感与等效电容之比(L/C)成比例,十字形 AMC 结构增加了等效电容,但是等效电感没有改变,所以带隙宽度降低。

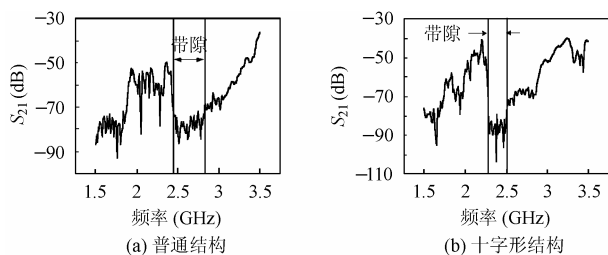


图 6 TM 模表面波带隙测量结果

6 结束语

本文提出了一种新型的 AMC 结构,结构制作与普通 AMC 结构基本相同,用等效电路的方法分析了结构的表面波阻带特性,进行了仿真计算与实验测量,结果表明同样的单元尺寸可以获得较低的带隙中心频率,一般而言,带隙的中心频率可以降低 15%左右,能比较有效地解决普通 AMC 结构应用的大尺寸问题。

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059 – 2062.
- [2] Smith D R, Schultz S. A new type of waveguide structures with photonic band structures. *IEEE MTT-S Digest*, 1996(2): 911 – 914.
- [3] Radisic V, Qian Y, Coccioli R, *et al.*. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1998, 8(2): 69 – 71.
- [4] Yun Tae-Yeoul, Kai Chang. Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators. *IEEE Trans. on MTT*, 2001, 49(3): 549 – 553.
- [5] Beaky M M, Burk J B, Everitt H O, *et al.*. Two dimensional

photonic crystals Fabry-Perot resonators with lossy dielectrics.

IEEE Trans. on MTT, 1999, 47 (11): 2085 – 2090.

- [6] Yasushi Horii, Makoto Tsutsumi. Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1999, 9(1): 13 – 15.
- [7] Radisic V, Qian Y, Itoh T. Broad-band power amplifier using dielectric photonic bandgap structure. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1998, (81): 13 – 14.
- [8] Marc Thevenot, Cyril Cheype, Alain Reineix, *et al.*. Directive photonic-bandgap antennas. *IEEE Trans. on MTT*, 1999, 47(11): 2115 – 2122.
- [9] Colburn J S, Yahya Rahmat-Samii. Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1999, 47(12): 1785 – 1794.
- [10] Sievenpiper D, Zhang Lijun, Romulo F. Jimenez Broas, *et al.*. High impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Trans. on MTT*, 1999, 47 (11): 2059 – 2074.
- [11] Yang Fan, Rahmat-Samii Y. Mutual coupling reduction of microstrip antennas using electromagnetic band-gap structure. *IEEE AP-S Dig.*, 2001: 478 – 481.
- [12] Li Z, Rahmat-Samii Y. PBG, PMC and PEC surface for antenna applications: a comparative study. *IEEE AP-S Dig.*, 2000: 674 – 677.
- [13] Yang Fan, Rahmat-Samii Y. A low-profile circularity polarized curl antenna over an electromagnetic bandgap (EBG) surface. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2001, 31 (4): 264 – 267.
- [14] Laso M A G, Lopetegi T M, Erro J. Novel wideband photonic band gap microstrip structure. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2000, 24(5): 357 – 360.

闫敦豹: 男, 1976 年生, 博士生, 从事于光子晶体天线等方面的研究.

高强: 男, 1979 年生, 博士生, 从事于光子晶体及频率选择表面等方面研究.

付云起: 男, 1974 年生, 博士生, 从事光子晶体方面的研究.

张国华: 男, 1977 年生, 博士生, 从事光子晶体相控阵天线的研究.

袁乃昌: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 从事于目标特性、超宽带电磁学、电磁兼容等方面的研究.