

平面型紧凑微波光子晶体研究

王伟¹, 曹祥玉¹, 王帅², 党东明¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 安徽合力股份有限公司装载机事业部研究所, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了提高微波光子晶体尺寸的紧凑性, 根据其带隙结构的局域谐振原理和等效电路分析模型, 对传统的 UCEBG 结构进行了改进, 提出了一种新型 EBG 结构。该结构通过引入弯曲折线延长了电流长度, 增大了等效电感效应, 同时采用了更长的边缘耦合, 延长了等效磁流, 增强了等效电容效应。实验结果表明, 新结构能够产生频率带隙, 其带隙中心频率比传统的 UCEBG 结构低 36.5%, 且相对带宽保持不变, 达到了实现紧凑 UC-EBG 结构的目的。

关键词: 微波光子晶体; 电磁带隙; 周期结构; 紧凑; 表面波

中图分类号: TN820.1

文献标识码: A

Research on Compact Uniplanar Microwave Photonic Crystals

WANG Wei¹, CAO Xiang-yu¹, Wang Shuai², DANG Dong-ming¹

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Loader Vehicle Institute, Anhui Heli Co. LTD., Hefei 230601, China)

Abstract: Focusing on the problem that the conventional EBG structure isn't compact enough, a novel uniplanar electromagnetic band gap (UCEBG) structure is presented here, based on the physical mechanism of EBG structures and equivalent circuit model. Incorporated with the meandered strips and the long gaps of edge, this structure significantly enlarges the equivalent capacitance between neighboring elements, as well as increases the equivalent inductance. So, it becomes even more compact in size. An experiment has been carried out to verify the validity of the proposed EBG structure. The measured results show that the obvious stop band is observed, and its center band gap frequency depresses over 36.5% than that of the conventional UC-EBG in the same period of the lattice with the constant relative bandwidth. The objective of realizing compact UC-EBG structure is attained.

Key words: microwave photonic crystals; electromagnetic band gap (EBG); periodic structures; compact; surface wave

1 引言

自光子晶体(Photonic Crystals)的概念提出后的十几年来,引起了世界各国研究机构的关注,相关的理论研究以及应用探索已经成为当今世界范围内研究的热点。虽然,光子晶体最初是在光学领域提出的,但是由于光学波段的尺度很小,加工工艺要求高,所以人工制作光子晶体存在一定的困难。由于微波频段和光波都属于电磁波谱,共同遵从于 Maxwell 方程,这种周期性通过缩比关系扩展到了微波领域,加工上的难题不复存在,光子晶体在微波频段的研究快速开展起来。微波光子晶体(microwave photonic crystals, MPCs)又称电磁带隙结构(electro-

magnetic band-gap, EBG),这是一种由介质、金属或其混合体单元按周期性排列所构成的阵列结构,对特定频段内的电磁波呈现带阻特性。近年来,EBG 结构引起了人们的广泛关注,并已应用到很多领域,特别是在微波毫米波研究中,EBG 结构已成功用于提高天线性能,减少天线阵元间的互耦,改善微波器件性能等方面^[1-8]。早期的 EBG 结构由于物理尺

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60671001); 陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2005F21); 西安市工业攻关基金(No. GG06020)资助项目。

作者简介: 王伟(1979-),男,博士研究生,主要从事微波光子晶体,自适应天线方面的研究。E-mail: wangweishaanxi@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-04-07; **修订日期:** 2008-06-10

寸的原因,造成了在实际应用中的困难。因为在带隙频率内,早期 EBG 结构的周期,其电长度为半波长,给电路和天线的集成造成了很大的不方便。直到近来才有一些新的方法用来提高 EBG 结构的紧凑性^[9-12],比如 Mushroom-like EBG 结构和 Uniplanar Compact EBG (UC-EBG) 结构。Mushroom-like EBG 结构是由 Sievenpiper 等提出的^[9],这种类型的 EBG 结构制作起来比较复杂,它的基本结构都包括四部分:①地平面;②介质基片;③金属过孔;④金属贴片。UC-EBG 结构是 F. Yang 等提出的^[3],它一般由金属贴片和金属导带相间组成。由于其所有的结构都在支撑介质的一个表面上制备,制作简单,成本更低。因此,UC-EBG 越来越多地引起了人们的广泛关注。

传统的 UC-EBG 结构一般基于相对厚的高介电常数基底,且带隙在 10GHz 以上^[3],这意味着低频设计将具有较大的结构尺寸。当实际应用空间有限或共形于弯曲表面时,较大的结构尺寸显然是不适用的。这就要求设计更为紧凑的 EBG 结构。所谓“紧凑”,就是说可以在同样的 EBG 周期内实现更低频率的带隙,或者说实现同样频率的带隙所需的 EBG 结构单元周期更小。为了达到这一目标,本文根据 EBG 结构带隙形成机理,对传统的 UCEBG 结构进行了改进,得到了一种新型 UCEBG 结构。并通过实验验证了这种新型 UCEBG 结构能够产生频率带隙,而且其带隙中心频率比传统的 UCEBG 结构低 36.5%,相对带宽保持不变,达到了实现紧凑型 EBG 的设计目的。

2 EBG 结构分析

关于 EBG 的带隙形成机理,根据目前的理论分析,有两种基本类型:

第一种为 Bragg 散射机理,此时带隙的产生主要是因 Bragg 散射引起,单元周期性的排列引起散射波相位的周期性分布,在特定频率和特定方向上,各单元的散射波构成反相叠加,互相抵消,从而使得电磁波不能传播,形成频率带隙。此时 EBG 的周期间距 a 需满足 Bragg 条件,即: $a = \lambda_g/2$, 其中 λ_g 是 EBG 带隙频率对应的导波波长。

第二种为局域谐振机理,与 Bragg 散射机理不同。EBG 结构的表面波阻抗随着电磁波频率的不同而不同。对表面波阻抗的研究可以等效为对有着特定谐振频率的集总 LC 网络的研究。在谐振频率范围内,EBG 结构的表面波阻抗非常高,阻止表面波的传播,形成特定的频率带隙。

对于各种 EBG 结构,严格来讲,上述两种机理对其带隙的形成都有一定的影响,但是在不同的情况下,起主体作用的将有所不同。对于 UCEBG 来说,其周期单元本身的谐振特性比较强,此时局域谐振机理的作用将起着主要作用。如图 1(a)所示,传统的 UCEBG 制作在普通的微带基片上,它由许多形状复杂的金属贴片周期排列而成。定义单元周期为 a ,介质层的厚度为 h ,相对介电参数为 ϵ_r ;介质层上的单元贴片的厚度为 0.01mm。其中各个单元贴片的四个周边均含一宽度为 w 的导体条带与周围相邻的四个单元贴片相联,导体条带上集中的电流 $\vec{J}$ 可引入等效电感效应,而单元贴片之间孔隙中的磁流 $\vec{J}_m$ 形成等效电容效应,这样,单元贴片的局域谐振特性可等效为一谐振电路,如图 1(b)所示。由文献[10]可知,EBG 的带隙中心频率及 3dB 带宽可以分别由以下近似公式求得:

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

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\eta} \sqrt{L/C} \quad (2)$$

其中, ω_0 为带隙中心频率; $\Delta\omega$ 为带隙宽度; η 为自由空间的波阻抗 $\eta = 120\pi$ 。

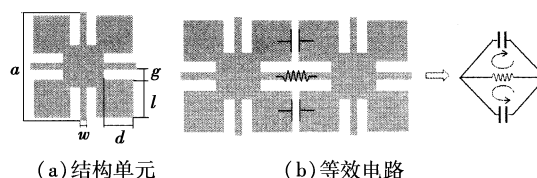


图1 传统的 UC-EBG

3 新型紧凑 UCEBG 结构

因为 UCEBG 结构的带隙位置和带隙宽度可由式(1)、式(2)近似得到。可见,为了获得紧凑的 EBG 结构,应该利用各种方法增大单元等效电感和电容,以降低带隙中心频率。这也就意味着,要实现相同的带隙频率,周期单元具有较大等效电感和电容的结构就具有较小的结构尺寸。但从式(2)又看出,带隙宽度和等效电容平方根成反比,和电感平方根成正比,增大电容在降低频率的同时会使得带隙宽度减小,而增大电感在降低频率的同时使得带隙宽度增大。

根据这一思想,本文提出了一种新型的 UCEBG 结构,如图 2(a)所示。图中灰色的部分表示金属导带,这些金属导带光刻在同一介质面上。在不同的贴片单元边缘之间的孔隙形成等效电容 C ,连接两个单元中心的折线导带引入等效电感 L ,图 2(b)所

示的是其等效集总 LC 谐振电路。这种新型结构,单元之间的孔隙比传统的 UCEBG(如图 1 所示)更长了,相当于孔隙中心的磁流 $\vec{J}_m$ 更长。同时这种结构引入的折线导带延长了导带中电流 $\vec{J}$ 的长度。由文献[11]可知,延长 EBG 结构单元的磁流长度可以增加其等效集总 LC 网络的电容效应,增长电流长度可以增加其等效电感效应。所以,新结构可以引入更大的等效电感和等效电容。由式(1)可知,其可以形成更低频段的频率带隙,而传统的 UCEBG 结构在低频段物理尺寸较大。

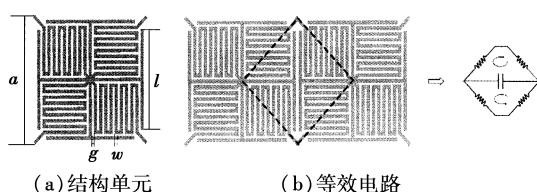


图2 新型紧凑 UCEBG 结构

4 测量结果

为了进一步说明这种新型紧凑 EBG 结构单元的紧凑性,本文制作了一个 3×6 的贴片阵列。所用的支撑介质材料是:聚四氟乙烯玻璃布板 F4B-2, 厚度 $h = 1.5\text{mm}$, $\epsilon_r = 2.65$ 。其余结构的尺寸如表 1 所示。

表 1 新型 EBG 单元结构的尺寸

a/mm	l/mm	w/mm	g/mm
7.2	5.8	0.2	0.2

首先,将上述两种单元贴片以 3×6 矩阵形式蚀刻于微波基片上,同时在两端均与一阻抗为 50Ω 的微带传输线相连,这样相当于一种滤波器结构。图 3(a)所示的是正面、底面的测试照片。使用矢量网络分析仪 Anritsu 37347C 对其进行测试后,所得的测试结果即传输系数 S21 如图 3(b)所示。从图中可以看出,在 -20dB 以下,从 $(2.97 \sim 5.03)\text{GHz}$ 有一个明显的禁带,带隙中心频率 4.00GHz ,相对带宽 51.5% 。在相同的周期和相同的测试方法条件下,文献[12]中传统 UCEBG 结构带隙为 $(4.7 \sim 7.9)\text{GHz}$,中心频率为 6.3GHz ,相对带宽 50.8% 。可见本文提出的改进型的 UCEBG 结构其带隙中心频率比传统的 UCEBG 结构低 36.5% ,而相对带宽保持基本不变(稍有增加)。而对于传统的 UCEBG 结构来说,要实现更低的频率就需要更大的周期尺寸。这证明了本文提出的 UCEBG 结构在尺寸上更紧凑,达到了设计目的。

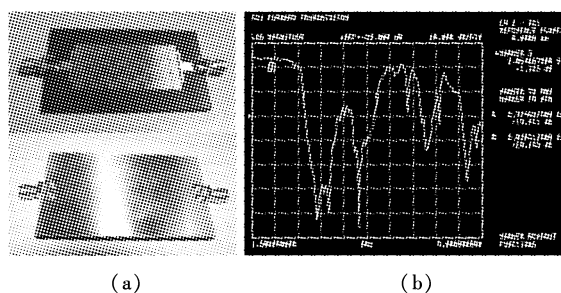


图3 滤波法测量原理(a)及其测试结果(b)

为了验证数据的可靠性,我们还用不同的方法进行了测试。图 4 给出的是采用悬置微带线法测量的原理图。被测量的 UCEBG 结构蚀刻在地面平板上,悬置的微带线在支撑介质之上,两边用 SMA 接头连接测量 S 参数。这相当于利用 UCEBG 制作出的一种缺陷地结构的微带传输线。图 5(a)给出了测量时正面、底面的正视照片。用 Anritsu 37347C 矢量网络分析仪进行测试。图 5(b)给出了传输参数(S21)测试结果。从图中可以看出,在 $(2.72 \sim 4.83)\text{GHz}$ 有一个明显的禁带,带隙中心频率 3.78GHz ,相对带宽 55.8% 。这与图 3 所示的滤波法测量的结果虽然略有不同,但是带隙得主体位置并没有太大的差别。微小的差别可能是端口匹配不是很好或者加工误差造成的。这进一步说明了该结构相对于传统 UCEBG 的紧凑性。另外需要说明的是,此时的带隙深度比较浅,这是由于采用的 EBG 单元数太少的缘故。增加 EBG 单元数就可以实现更深的带隙,但是带隙的频率位置并不会改变。这里采用了较少的周期数目,是为了能说明问题的本质,节省加工成本。

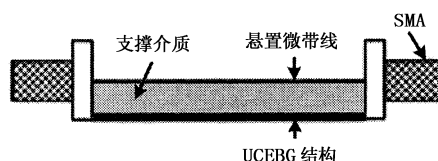


图4 悬置微带线法原理图

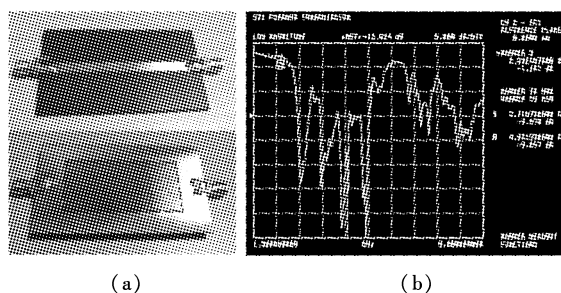


图5 悬置微带线法测量原理图(a)及其测试结果(b)

5 结论

为了最终把 EBG 结构应用到实际工程中去,研究结构尺寸更小的紧凑型 EBG 结构是非常必要的。

(下转第 920 页)

- 2933 – 2936.
- [4] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Phy. Rev. Lett.*, 2000, 85(18):3966 – 3969.
- [5] Pendry J B, Smith D R. Comment on wave refraction in negative-index media; always positive and very inhomogeneous[J]. *Phy. Rev. Lett.*, 2003, 90(2):9703.
- [6] 蒋耀庭, 简涛. 激光物理与隐身技术[J]. *激光与红外*, 2001, 31(4):195 – 197.
- [7] Lazarides N, Tsironis G P. Coupled nonlinear Schrodinger field equations for electromagnetic wave propagation in nonlinear left-handed materials[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 71(3):66 – 14 – 6617.
- [8] Kourakis I, Shukla P K. Nonlinear propagation of electromagnetic waves in negative refraction index composite materials[J]. *Phys. Rev. E.*, 2005, 72(1):6626 – 6630.
- [9] Scalora M, et al. Generalized nonlinear schrodinger equation for dispersive susceptibility and permeability: application to negative index materials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(1):3902 – 3905.
- [10] Wen S C, Wang Y W, Xiang Y J, et al. Modulation instability in nonlinear negative-index material[J]. *Phy. Rev. E.*, 2006, 73(3):6617 – 6622.
- [11] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. 贾东方, 余震红, 等译. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2002:34 – 35.
- [12] Wen S C, Wang Y W, Xiang Y J, et al. Role of the anomalous self-steepening effect in modulation instability in negative-index material[J]. *Opt. Exp.*, 2006, 14(4):1568 – 1575.
- [13] 刘海兰, 文双春, 熊敏, 等. 超常介质中暗孤子的形成和传输特性研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(1):6473 – 6477.
- [14] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001:15 – 17.

(上接 912 页)

本文根据 EBG 结构带隙形成机理和等效电路分析模型, 设计了一种新型的紧凑 UC – EBG 结构。并通过实验证明了, 该新型 EBG 结构比传统的结构更加紧凑, 其带隙中心频率降低了 36.5%, 同时相对带宽保持不变, 达到了设计目标。

参考文献:

- [1] Ang Yu, Xuexia Zhang. A novel method to improve the performance of microstrip antenna arrays using a dumbbell EBG structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2003, 2:170 – 172.
- [2] H Y David Yang, R Kim, D R Jackson. Design consideration for modeless integrated circuit substrates using planar periodic patches[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 2000, 48:2233 – 2239.
- [3] F Yang, K Ma, Y Qian, et al. A uni-planar compact photonic-band gap (UC – PBG) structure and its applications for microwave circuits[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* 1999, 47:1509 – 1514.
- [4] 刘涛, 曹祥玉, 殷兆伟, 等. EBG 结构在圆柱共形偶极子阵中的应用[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2007, 8(2):63 – 65.
- [5] F Yang, Y Rahmat-samii. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap structures: A low mutual coupling design for array applications[J]. *IEEE Trans. Antenna Propag.* 2003, 51:2936 – 2946.
- [6] Zeev Iluz, Reuven Shavit, Reuven Bauer. Microstrip antenna phased array with electromagnetic bandgap substrate[J]. *IEEE Trans. Antenna Propag.*, 2004, 52(6):1446 – 1453.
- [7] M F Abedin, M Ali. Effects of a smaller unit cell planar EBG structure on the mutual coupling of a printed dipole array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2005, 4:274 – 276.
- [8] Yang F, Ma K, Qian Y, et al. A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic-bandgap (UC – PBG) structure[J]. *IEEE Trans Microwave Theory and Tech.*, 1999, 47(11):2092 – 2097.
- [9] D Sievenpiper, L Zhang, R F J Broas, et al. High-impedance electromagnetic surfaces in a forbidden frequency band[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1999, 47:2059 – 2074.
- [10] D Sievenpiper. High-impedance electromagnetic surfaces, Ph. D. dissertation, Dept. Electrical Engineering, Univ. California, Los Angeles, CA, 1999.
- [11] 林宝勤. 微波光子晶体电磁带隙特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006:66 – 75.
- [12] B Q Lin, Q R Zheng, N Yuan. A novel planar PBG structure for size reduction[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16(5):269 – 271.