

## 基于 FDTD 的波导介质层 PBG 结构的研究<sup>1</sup>

闫敦豹 袁乃昌 付云起

(国防科技大学光子晶体研究中心 长沙 410073)

**摘要:** 该文提出了波导中介质层式的 PBG 结构, 并对其阻带特性进行了数值分析, 其中包括 PBG 结构的设计; 周期长度、周期个数、单元尺寸等几个方面对阻带特性的影响等, 并给出了结论。利用介质层 PBG 结构来制作波导滤波器具有设计简单、易于实现的显著优点。

**关键词:** 光子晶体, PBG 结构, 滤波器, FDTD

**中图分类号:** TN015 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0118-06

## Research on Dielectric Layer PBG Structures in Waveguide Based on FDTD

Yan Dun-bao Yuan Nai-chang Fu Yun-qi

(PBG Research Center, NUDT, Changsha 410073, China)

**Abstract** In this paper, a new dielectric layer PBG structures in waveguide is introduced, and numerical analysis to its stop-band characteristic is finished. The design of PBG structures and the effect of the size of period, the number of periods, the size of unit etc. are presented. And the conclusion is presented too. It is easy to design and manufacture waveguide filter using dielectric layer PBG structures.

**Key words** Photonic crystals, PBG structure, Filter, FDTD

### 1 引言

自从 1987 年光子晶体 (Photonic crystals) 这一概念<sup>[1]</sup> 被提出以来, 已受到世界许多领域的极大关注, 其研究范围涉及到光波波段、微波波段以及声波波段。光子晶体就是能够实现光子带隙 (Photonic Band-Gap, PBG) 的人造周期性结构, 所以有时也称为 PBG 结构。这种周期结构的周期尺寸与其形成的阻带的中心频率对应的波长可比拟, 所以在微波波段比光学波段更易于实现。目前国外在微波波段对光子晶体的研究比较深入, 在微波电路<sup>[2]</sup>、微波天线<sup>[3,4]</sup>等方面已经取得了许多成果, 而国内在这方面的研究才刚刚起步。光子晶体完全依靠自身的结构就可以形成很好的带阻特性, 而这种特性在实现宽带滤波、提高放大器效率、改善天线方向图等方面均有明显的效果, 所以对光子晶体的研究具有十分重要的意义。

PBG 结构的实现方法有很多, 在微带电路中, 直接在接地板上对应微带线的位置腐蚀出成周期排列的小孔就可实现, 或者在微带线下面进行介质穿孔 (不穿透接地板) 也可实现; 在波导中在两个宽边之间沿纵向周期排列介质柱<sup>[5]</sup> (属二维 PBG 结构) 都可以实现。本文根据以上各种 PBG 结构的特征提出了矩形波导纵向排列介质层的 PBG 结构 (图 1), 仿真结果证实了这种 PBG 结构的带阻特性, HFSS 软件的仿真结果验证了这一结果的可靠性。然后详细分析了周期尺寸、周期个数、单元尺寸对其形成的阻带特性的影响, 并给出了结论。最后给出了在实际设计中的设计步骤。

<sup>1</sup> 2002-07-09 收到, 2003-01-14 改回

国家安全重大基础预研资助项目 (编号 51307)

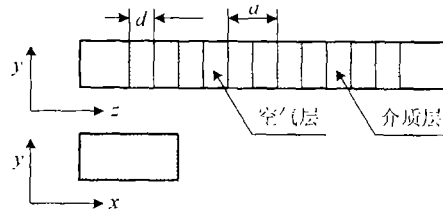


图 1 矩形波导中的介质层 PBG 结构

## 2 结构设计

PBG 结构设计的理论依据是光学中的 Bragg 反射条件<sup>[2]</sup>, 依据这一理论, PBG 结构的周期长度约为波导波长的二分之一。实际上在应用 PBG 结构后, 精确的波导波长的计算变得十分复杂。但在微带线上引入 PBG 结构后, 如果结构单元相对于周期尺寸较小可以用普通的微带线的波导波长近似代替应用 PBG 结构以后的波导波长。而在波导中应用介质层的 PBG 结构后, 对波导波长的影响很大, 无法按微带线的情况进行近似。实际上在波导中应用介质 PBG 结构后, 改变的是波导内的有效介电常数, 从而改变了波导波长。如果介质层厚度与介质层之间空气层的厚度均小于二分之一波导波长, 有效介电常数可以用体积比模型来计算<sup>[4]</sup>, 是指有效介电常数约为介质层与空气层的体积平均值。由于 PBG 结构周期长度约为波导波长的二分之一, 所以介质层 PBG 结构的有效介电常数可以用体积比模型来进行估计。依据上述理论可以得到如下几个设计公式:

$$\epsilon_c = (d/a)\epsilon_r + (1 - d/a) \quad (1)$$

$$\lambda_g = (\lambda/\sqrt{\epsilon_c})/\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_c)^2} \quad (2)$$

$$a = \lambda_g/2 \quad (3)$$

其中  $d$  和  $a$  如图 1 所示,  $\epsilon_r$  和  $\epsilon_c$  分别为介质的相对介电常数和 PBG 结构的有效介电常数,  $\lambda$  与  $\lambda_g$  分别为 PBG 结构形成的阻带的中心频率对应的真空中波长和波导波长,  $\lambda_c$  为矩形波导 TE<sub>10</sub> 模对应的截止频率。

## 3 计算结果

本文所有计算结果均是利用 FDTD 数值方法计算而得, 在波导纵向的两侧设置 PML 吸收边界条件, 四周设置为理想导体, 用高斯脉冲以 TE<sub>10</sub> 模的形式激励, 然后对所得数据进行 Fourier 变换, 进而得到其  $S$  参数。

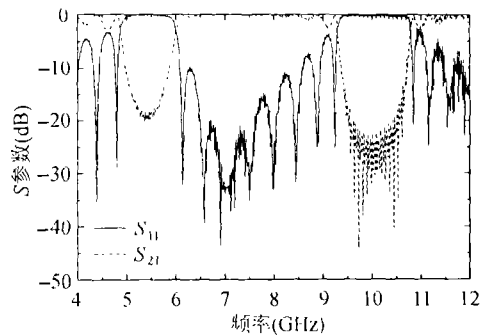


图 2 波导内介质层 PBG 结构的阻带特性

### 3.1 设计公式的验证

利用上述的设计公式,设计了阻带中心频率约为 5.5GHz 的 PBG 结构,矩形波导的横向尺寸为  $5.7\text{cm} \times 2.3\text{cm}$ ,  $\epsilon_r = 2.0$ ,  $d/a = 0.5$ ,  $a = 2.3\text{cm}$ ,沿波导纵向设置 9 个周期,图 2 是计算得到的 S 参数。从图中看出,在 5.5GHz 附近确实出现了禁带,而且在其二次谐波附近也存在一个禁带,但阻带内的起伏较大。计算结果表明,利用上述的设计公式来进行估算是可行的。

### 3.2 周期长度的影响

依据设计公式,若 PBG 结构的有效介电常数保持固定,周期长度应该决定着阻带的中心频率。设计的矩形波导尺寸同上,  $\epsilon_r = 2.0$ ,  $d/a = 0.5$ ,沿纵向仍设置 9 个周期,改变  $a$  的值分别为 1.54cm, 2.30cm, 3.07cm,以研究周期长度的影响。图 3 是不同的周期长度对应的 S 参数,从图中可以看出,周期越长,其形成的阻带的中心频率就越低,反之,则中心频率就越高。

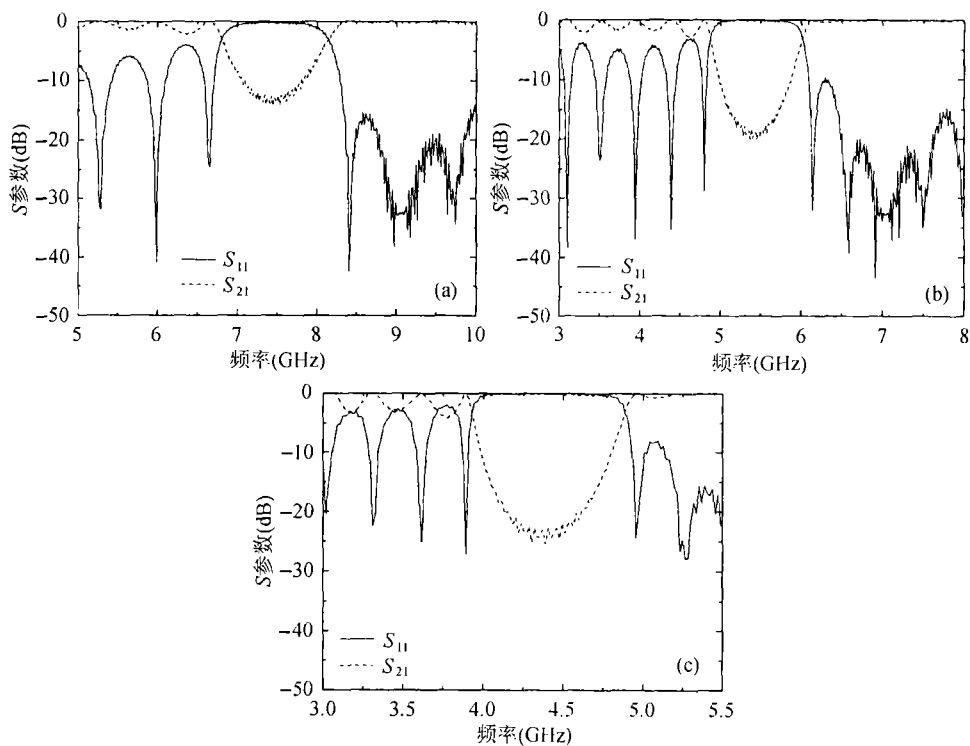


图 3 周期长度对 PBG 带阻特性的影响  
(a)  $a = 1.54\text{cm}$  (b)  $a = 2.30\text{cm}$  (c)  $a = 3.07\text{cm}$

### 3.3 周期个数的影响

矩形波导尺寸同上,  $\epsilon_r = 2.0$ ,  $d/a = 0.5$ ,  $a = 2.30\text{cm}$ ,沿波导纵向的周期数分别为 5, 7, 9, 11, 16,图 4 为不同周期个数的 PBG 结构的 S 参数。由图中可得,周期个数越多,形成的阻带就越深,但当周期个数很多时,阻带内的起伏变大,而且周期个数的增加也使 PBG 结构的尺寸变大,实际应用中,两方面要折衷来考虑。

### 3.4 结构单元尺寸的影响

研究单元尺寸的影响相对要复杂一些,因为若保持周期不变,改变单元尺寸,势必改变了有效介电常数,阻带的中心频率也就会偏移。本文研究了在保持周期长度和有效介电常数都不变的情况下,单元尺寸对带阻特性的影响。周期长度不变,改变单元尺寸,若不改变有效介电常数,必须改变介质的相对介电常数。矩形波导的设计还是同上,  $a = 2.3\text{cm}$ ,沿波导纵向设置 9

个周期, 分别研究了  $d/a = 2/3$ ,  $a/a = 1/2$ ,  $d/a = 1/3$ ,  $d/a = 1/6$  这 4 种情况的阻带特性, 而对应着这 4 种情况的介质的相对介电常数分别为  $\epsilon_r = 1.75$ ,  $\epsilon_r = 2.0$ ,  $\epsilon_r = 2.5$ ,  $\epsilon_r = 4.0$ 。图 5 为这 4 种情况下的 PBG 结构的阻带特性, 从图中可以看出, 在阻带的中心频率和有效介电常数一定的情况下, 介质的相对介电常数越高, 也就是介质层的厚度越小, 形成的阻带就越深, 带宽也越宽。但若介质的相对介电常数太高, 其形成的阻带内的起伏变得很大, 取  $d/a = 1/2$  比较合适。

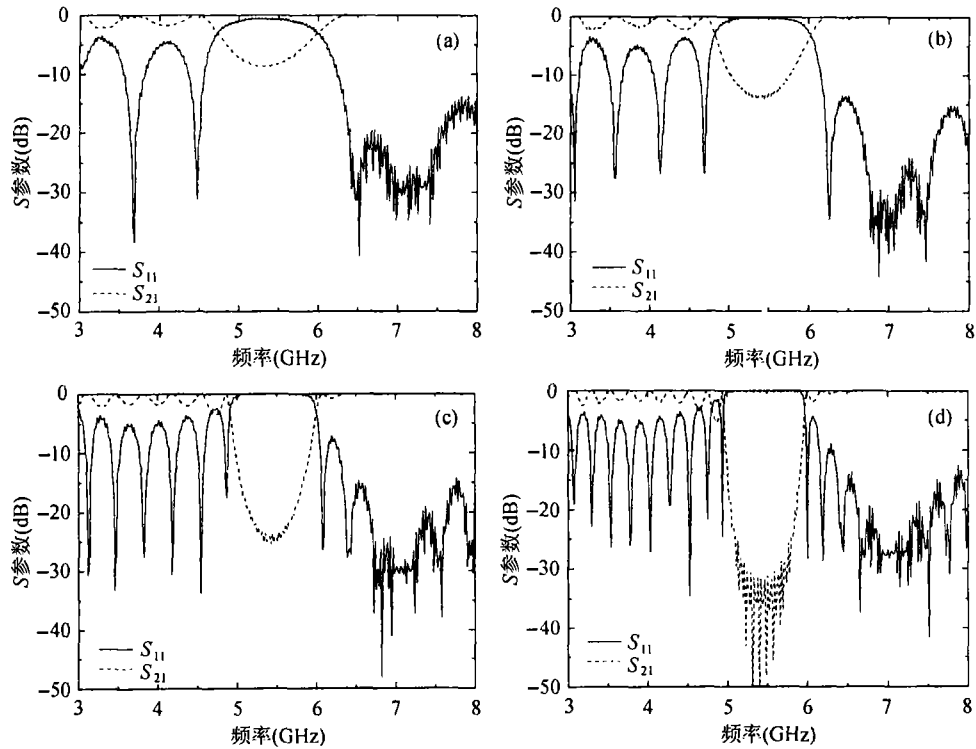


图 4 周期个数的影响

(a) 5 个周期 (b) 7 个周期 (c) 11 个周期 (d) 16 个周期

#### 4 与仿真结果比较

为了证实计算结果的可靠性, 还用 HFSS 仿真软件对这种介质层波导光子晶体进行了仿真, 仿真的是阻带中心频率约为 5.5GHz 的 PBG 结构, 矩形波导的横向尺寸为  $5.7\text{cm} \times 2.3\text{cm}$ ,  $\epsilon_r = 2.0$ ,  $d/a = 0.5$ ,  $a = 2.3\text{cm}$ , 沿波导纵向设置 9 个周期。图 6 使用 HFSS 仿真时建立的模型, 图 7 是计算结果与仿真结果的  $S$  参数的比较。从图中可以看出, 计算结果与仿真结果基本一致, 证实了计算结果的可靠性。

#### 5 实际设计考虑

在实际设计中, 实现介质层与空气层间隔排列比较困难, 可用介电常数近似为 1 的泡沫层作为支撑介质, 来取代空气层, 将介质层与泡沫层粘在一起, 在波导口直接塞进去即可。至于周期个数、介质材料可根据实际设计需求, 参考本文中列出的各种因素的影响, 来进行选择。然后根据所需要的阻带中心频率依据本文中给出的三个公式进行设计。这三个公式只是近似公式, 最好用 FDTD 或软件再仿真, 然后进行修正, 得到更精确的设计。

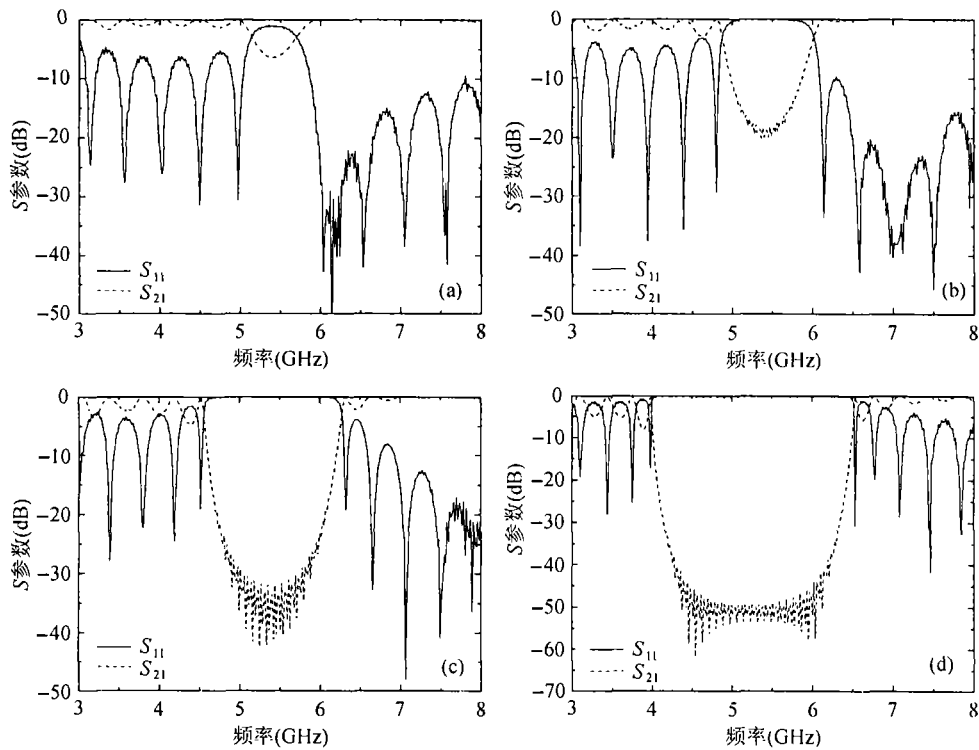


图 5 单元尺寸的影响

- (a)  $d/a = 2/3$ ,  $\epsilon_r = 1.75$     (b)  $d/a = 1/2$ ,  $\epsilon_r = 2.0$   
 (c)  $d/a = 1/3$ ,  $\epsilon_r = 2.5$     (d)  $d/a = 1/6$ ,  $\epsilon_r = 4.0$

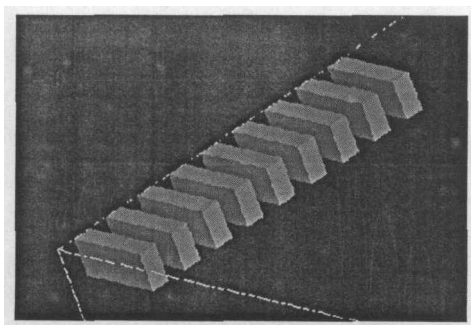


图 6 HFSS 仿真模型

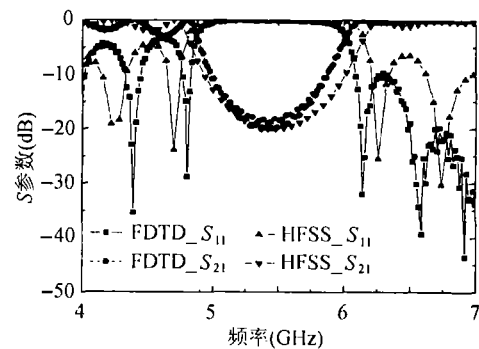


图 7 计算结果与仿真结果的比较

## 6 结论

通过详细的理论分析和数值计算,对矩形波导中介质层 PBG 结构形成的阻带特性得出下列几个结论:

(1) 利用本文中给出的 3 个公式,可以根据需要的阻带的中心频率来进行 PBG 结构的设计,也可以对已知的 PBG 结构估计其形成的阻带的中心频率。计算结果表明,用这三个公式来

进行估算是可行的, 而且误差并不大。

(2) 在有效介电常数固定的情况下, PBG 结构的周期长度决定着阻带的中心频率, 周期尺寸越长, 阻带的中心频率越低, 反之, 阻带的中心频率越高。

(3) PBG 结构的周期个数影响着阻带的深度, 周期个数越多, 形成的阻带越深。但太多的周期个数形成的阻带内的起伏较大, 而且周期个数的增加增大了 PBG 结构的尺寸, 所以应折衷考虑, 一般取 7 至 9 个周期为宜。

(4) 在有效介电常数和周期长度固定的情况下, 采用的介质的相对介电常数越高, 也就是介质层的厚度越薄, 其形成的阻带越深, 而且阻带宽度越宽。但介质层厚度太薄的情况下, 形成的阻带的质量不高, 取  $d/a = 1/2$  比较合适。

### 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] Vesna Radisic, Yongxi Qian, Roberto Coccioli, *et al.*. Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1998, 8(2): 69-071.
- [3] Yasushi Horii, Makoto Tsutsumi. Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1999, 9(1): 13-15.
- [4] Joseph S. Colburn, Yahya Rahmat-Samii. Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates. *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, 1999, AP-47(12): 1785-1794.
- [5] Smith D R, Schultz S. A New type of waveguide structures with photonic band structures. *IEEE MTT-S Digest*, 1996: 911-914.

闫敦豹: 男, 1976 年生, 博士生, 目前主要从事光子晶体天线的研究。

袁乃昌: 男, 1965 年生, 博士生导师, 目前主要从事目标特性、超宽带电磁学及电磁兼容的研究。

付云起: 男, 1974 年生, 博士生, 目前主要从事光子晶体方面的研究。