

# 基于 FDTD 的 1-D 和 2-D PBG 结构的研究\*

闫敦豹 袁乃昌 付云起 张光甫

(国防科技大学光子晶体研究中心, 湖南, 长沙, 410073)

**摘要** 用 FDTD 数值方法研究了用于微带传输线的 1-D 和 2-D 的 PBG(Photonic Band-Gap) 光子带隙结构. 并且制作了不同 PBG 结构的电路用于实验, 以比较计算结果和实验结果. 详细分析了 PBG 结构的周期的尺寸和个数、单元的尺寸和形状等方面对其形成的阻带的影响, 并给出了结论.

**关键词** 光子晶体, PBG, FDTD, 阻带.

## RESEARCH ON 1-D AND 2-D PBG STRUCTURE BASED ON FDTD METHOD\*

YAN Dun-Bao YUAN Nai-Chang FU Yun-Qi ZHANG Guang-Fu

(Photonic Crystals Research Center, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** The 1-D and 2-D photonic band-gap(PBG) structure used in microstrip was studied by using FDTD technique. Several PBG circuits were fabricated for comparing the calculational results with experimental ones. The effects on the stopband formed by PBG structure were analyzed detailedly, which brought form the length and numbers of period of PBG structure, unit's size and shape, etc., and conclusions were given.

**Key words** photonic crystals, PBG, FDTD, stopband.

### 引言

光子晶体的概念最初是在光学领域中提出, 是指具有光子带隙(PBG-Photonic Band-Gap)特性的人造周期性电介质结构. 随着对光子晶体的研究的不断深入, 光子晶体已经深入到微波和毫米波领域, 并且已应用到微波电路<sup>[1]</sup>、天线等许多方面<sup>[2]</sup>, 利用其带阻特性, 可以实现宽带滤波<sup>[3]</sup>, 提高放大器效率, 改善天线的方向图.

PBG 结构就是可以实现光子带隙的周期性结构. 在微带电路中, 这种 PBG 结构的实现有两种方法, 一种是在介质基片上沿微带线的纵向周期性地挖出小圆柱体单元(不穿透接地面), 使得在介质基片上形成小圆柱孔的周期性排列; 另一种方法是在接地面上也是沿微带线方向腐蚀掉成周期性排列的小孔(保持介质基片不变). 本文对采用第二种方法形成的 1-D 和 2-D PBG 结构进行了详细的分析, 结果表明这种结构可以获得良好的阻带特性. 而且相

对于第一种方法, 这种结构更容易实现.

### 1 PBG 结构的设计

本文采用的 PBG 结构如图 1 所示, 这是 2-D 的示意图, 1-D 的则是只保留中间一排孔. 由于传输的电磁场主要集中在微带线下面<sup>[4]</sup>, 所以实际上对于微带线来说, 1-D 的 PBG 结构已经足以获得良好的带阻特性, 计算结果也表明二者基本没什么区别(如图 2 所示).

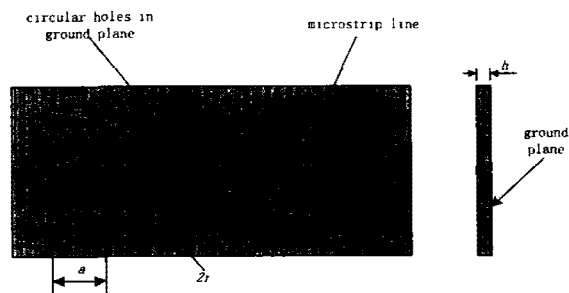


图 1 2-D 的 PBG 结构

Fig. 1 2-D PBG structure

\* 国家安全重大基础预研(批准号 51307)资助项目

稿件收到日期 2001-09-06, 修改稿收到日期 2002-03-04

\* The project supported by the Major Fundamental Preliminary Research Foundation for National Security(No. 51307)

Received 2001-09-06, revised 2002-03-04

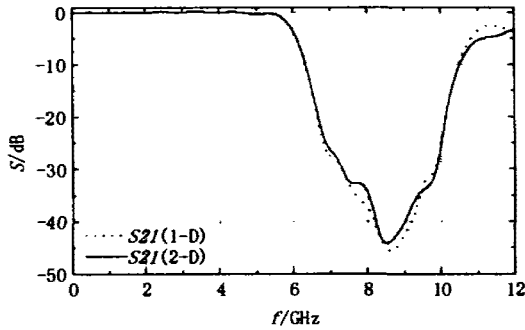


图2 1-D与2-D PBG的计算结果的比较(阻带中心频率设计为8.5 GHz,1排 $\times$ 9个周期, $r/a=1/4$ ,方形孔)  
Fig.2 Comparison of calculational results of 1-D and 2-D PBG(the designed central frequency of stopband is 8.5 GHz, 1 row $\times$ 9 periods,  $r/a=1/4$ , square hole)

由于光子晶体的理论源于电子的能带理论,所以PBG结构的设计也要依靠光学原理.PBG周期结构可近似为光学的Bragg反射体来进行分析,其阻带的中心频率满足Bragg条件

$$2 \cdot k = k_{\text{Bragg}} = 2\pi/a, \quad (1)$$

式(1)中 $k$ 为导波模的波数, $a$ 为PBG结构的周期.由式(1)可以推出

$$\lambda_g = 2 \cdot a, \quad (2)$$

也即PBG结构的周期为波导波长的二分之一.其实应用PBG结构以后,微带线上的波导波长的计算变得十分复杂,但有研究表明,对于 $r/a$ 较小的情况,在设计PBG结构时,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.

制作电路板所用基片的介电常数为2.65,厚度为1 mm,微带线为普通的50欧姆阻抗线,线宽为2.711 mm.

## 2 计算和实验结果

本文中所设计的PBG结构,其阻带中心频率都是依据波导波长近似为普通微带线的波导波长来计

算的.单元形状采用方形和圆形两种,并比较了二者的区别;单元的大小设计了四种尺寸,以分析单元尺寸对阻带的影响.计算结果是用FDTD数值计算方法计算所得,应用PML吸收边界条件.微带线深入到PML内部,加高斯脉冲激励,然后进行Fourier变换,进而得到其S参数.电路实验数据是用Wilton 5447A标量网络分析仪测量而得.

### 2.1 单元尺寸的影响

用FDTD分析了1-D PBG结构周期保持不变(12.12 mm)时,不同 $r/a$ 比值对阻带(中心频率设计为8.5 GHz)的影响,单元采用方形孔,沿微带线方向设有9个周期,其结果如图3所示.在极限 $r/a=0$ 也即没有PBG结构的情况下,就是普通的微带传输线,肯定不会存在阻带现象.随着单元尺寸的不断增大,阻带现象变得非常明显,但对于较大的单元尺寸,在高频端已经难以传播,所以折衷一下,较为理想的情况为 $r/a=1/4$ .

图4是 $r/a=1/4$ 情况下(阻带中心频率设计为8.5 GHz)的计算结果.从图中可以看出,阻带的中心频率的确为8.5 GHz左右.但在其谐波频率(17 GHz左右)处也存在一个阻带,另外,当频率大于22 GHz以后,场已经基本不能在其中传播,其原因在于频率太高时,孔的尺寸相对于波长已经很大(已大于四分之一波长),能量泄漏非常大,致使波不能在其中传播.

### 2.2 周期个数的影响

阻带中心频率仍为8.5 GHz,保持周期不变(12.12 mm), $r/a=1/4$ ,用FDTD分析了不同周期个数对阻带的影响(1-D情况),结构如图5所示.由结果可见周期个数影响着阻带的深度和宽度,但并非周期越多阻带特性越好,对应用15个周期的PBG结构进行计算,发现阻带深度反而减小,并且随着周期的增加,电路尺寸也会增大,计算结果表明,取7~9个周期为宜.

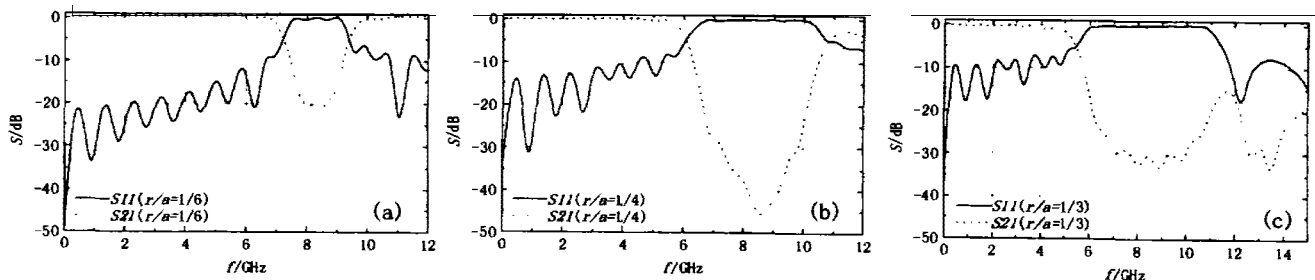


图3 孔的尺寸对阻带特性的影响 (a)  $r/a=1/6$  (b)  $r/a=1/4$  (c)  $r/a=1/3$

Fig.3 Effect of the size of holes on stopband characteristics (a)  $r/a=1/6$  (b)  $r/a=1/4$  (c)  $r/a=1/3$

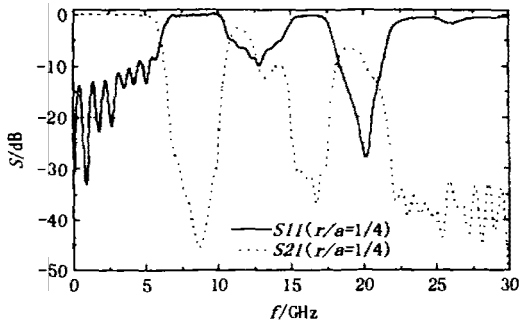


图 4 1-D PBG 结构的阻带特性

Fig. 4 Stopband characteristic of 1-D PBG structure

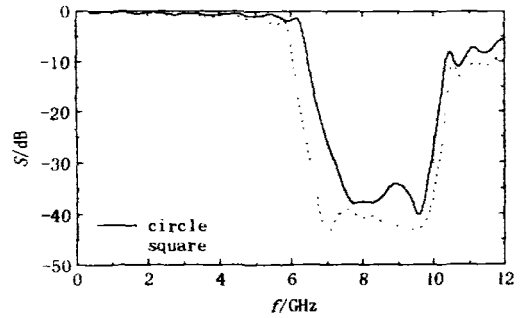


图 6 单元形状的比较

Fig. 6 Comparison of circular PBG and square PBG

### 2.3 实验结果

为分析单元形状对阻带的影响,制作了圆形孔和方形孔两种 1-D 的 PBG 结构电路.阻带中心频率设计为 8.5 GHz,沿微带线设有 7 个周期,  $r/a = 1/4$ ,测试结果如图 6 所示.由结果可见,方形孔和圆形孔基本没什么太大的区别,但是圆形孔的 PBG 结构在通带的损耗较小,方形孔的 PBG 结构阻带的带宽较宽.

同时还制作了 2-D PBG 结构电路以与 1-D 进行比较,与 1-D PBG 结构电路设计原则一样,只是多用了两排孔,结构如图 7 所示.实验结果也表明,对于微带线来说,应用 1-D PBG 结构已经足以获得很好的阻带特性.

### 2.4 计算结果与实验结果的比较

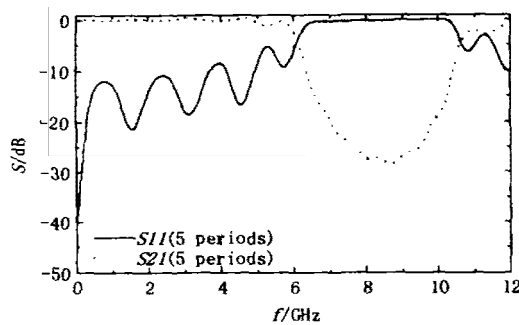
用 FDTD 计算了实验结果部分中叙述的 1-D PBG 结构的 S 参数,并与实验测量结果进行了比较,结果如图 8 所示.结果表明二者基本相符.图 9 为 2-D PBG(3 排  $\times$  7 周期的结构)结构实验得到 S 参数,实验结果中高频端损耗比较大,这是由于微带线本身在很高频率(大于 10 GHz)时损耗较大造成的.

## 3 结论

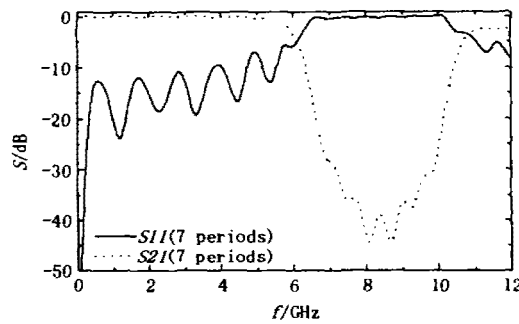
通过用 FDTD 数值计算方法的计算以及对实际电路的测试,对微带电路应用的 PBG 结构得出如下结论:

周期长度决定着阻带的中心频率,周期尺寸越小,阻带的中心频率越高.

对于微带线来说,应用 1-D PBG 结构已经能足



(a)



(b)

图 5 周期个数对阻带的影响

(a) 5 个周期 (b) 7 个周期

Fig. 5 Effect of the number of periods on stopband

(a) 5 periods (b) 7 periods

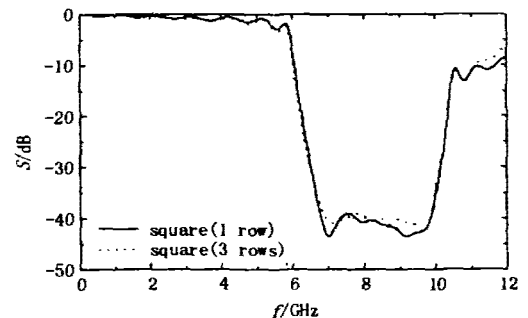


图 7 1-D 与 2-D PBG 实验结果的比较

Fig. 7 Comparison of experimental results of 1-D and 2-D PBG

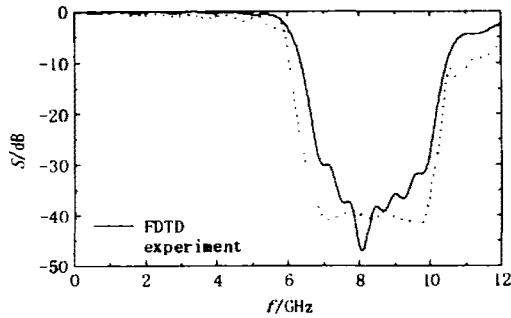


图8 计算结果与实验结果的比较  
Fig.8 Comparison of calculational  
and experimental results

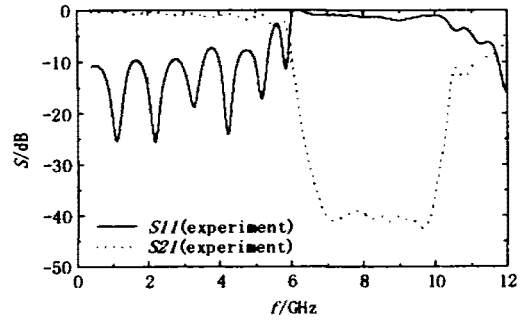


图9 实验结果(3排×7周期,方形孔)  
Fig.9 Experimental results  
(3 rows×7 periods, square hole)

以获得很好的阻带性能。

只要单元尺寸设计合理,单元形状影响基本不大。

周期个数影响着阻带的深度和宽度,但并非越多越好,并且考虑到电路尺寸的关系,采用7~9个周期为宜。

阻带的深度和宽度更依赖于单元的电尺寸,为获得较好的性能,取  $r/a = 1/4$  为佳。

#### REFERENCES

[1] Radisic Vesna, Qian Yongxi, Coccioni Roberto, *et al.*

Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines.

*IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1998, **8**(2):67—71

[2] Horii Yasushi, Tsutsumi Makoto. Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna. *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 1999, **9**(1):13—15

[3] Lopetegi Txema, Falcone Francisco, Martinez Beatriz, *et al.* Improved 2-D photonic bandgap structure in microstrip technology. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1999, **22**(3):207—211

[4] HE Chong-Jun, HAN Yong-Ning, YUAN Nai-Chang, *et al.* *Microwave Circuits*. Changsha: NUDT Press(赫崇骏,韩永宁,袁乃昌,等.微波电路.长沙:国防科技大学出版社),1999