

# PBG 结构特性的研究及其在天线中的应用

胡 荣, 张雪霞

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 本文比较了 PBG (photonic bandgap) 结构的三种测量方法, 包括共面微带线法, 振子法和悬置微带线法. 然后以 PVPBG (patch and via PBG) 结构为例研究了 PBG 结构在振子天线、微带天线和 E 形天线中的应用. 仿真和实验结果表明 PBG 结构可以起到改善天线输入阻抗, 增强前向辐射, 抑制后向辐射, 提高天线前向增益的作用. 在缝耦合 PVPBG 结构的基础上, 提出了一种新的交指 PVPBG 结构, 其尺寸为具有相同带隙频率的缝耦合 PVPBG 结构的  $3/4$ .

关键词: PBG 结构; 振子天线; 微带天线; E 形天线; 交指 PVPBG

中图分类号: TN82 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 12-1762-06

## Study of PBG Structure and Its Application in Antennas

HU Rong, ZHANG Xuexia

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

Abstract: In this paper, three measuring methods of the characteristics of PBG structures are compared, including coplanar microstrip line method, monopole method and suspending microstrip line method. Then the PVPBG structure (as a typical example of PBG structures) is applied in monopoles, microstrip antennas and E shape antennas respectively. Simulation and experimental results show that the PBG structure can improve the input impedance of antennas, increase the front radiation, decrease the back radiation and increase the gain of antennas. Based on the Gap-Coupled PVPBG (GCPVPBG) structure, we propose a new PVPBG structure named Inter-crossed Capacitance-Coupled PVPBG (ICCPVPBG) structure. The size of the ICCPVPBG structure is only  $3/4$  of the size of the GCPVPBG structure when they have the same bandgap.

Key words: PBG structure; monopole; microstrip antenna; E shape antenna; ICCPVPBG

### 1 引言

PBG 结构的中文名称为光子带隙结构, 是一种人造周期结构, 主要通过在一中介质中周期性地加入另一种介质来获得. 它能够抑制一定频率范围内的电磁波在其中的传播. 近年来, PBG 结构得到很大的发展, 出现了一维、二维<sup>[1,2]</sup>及三维<sup>[3]</sup>等多种结构, 并且获得了越来越多的应用. 在天线方面的应用<sup>[4,5]</sup>有抑制表面波和利用高阻表面特性提高天线增益, 加强前向辐射, 抑制背瓣和旁瓣, 获得单向辐射的天线以及人身保护手机天线等. 在天线阵列中可以抑制天线各单元互耦. 在电路中<sup>[6,7]</sup>可以提高电子设备的电磁兼容性, 实现电路各部件间的去耦. 具体如抑制放大器的谐波影响, 抑制高速数字信号线间的串扰, 宽带带阻滤波器, 宽带反射器, 高 Q 谐振器, FSS (频率选择表面) 等. PBG 结构研究的主要发展趋势有: (1) 小型化. 随着电子设备集成度越来越高以及可移动设备和便携式设备的发展, 要求电路中各种器件具有小尺寸. 为了适应这种发展趋势, PBG 结构也必须向小型化发展. 最早的 PBG 结构其单元尺寸多为带隙波长的  $1/2$ , 近来提出的许多 PBG 结构单元尺寸都远小于带隙波长的  $1/2$ ; (2) 多层结构的实

现. 现在电路中越来越多的使用多层电路板, 为了在这些电路中使用 PBG 结构, 有必要发展具有多层结构的 PBG.

本文以结构简单、尺寸小的 PVPBG 结构为例先对 PBG 结构的三种测量方法 (共面微带线法, 振子法和悬置微带线法) 进行了比较. 并研究了 PVPBG 结构在振子天线、微带天线和 E 形天线中的应用, PBG 结构起到了改善天线输入阻抗, 增强前向辐射, 抑制后向辐射, 提高天线前向增益的作用. 为了减小 PBG 结构的尺寸, 在缝耦合 PVPBG 结构的基础上, 提出了一种新的交指 PVPBG 结构, 其尺寸仅为具有相同带隙频率的缝耦合 PVPBG 结构的  $3/4$ .

### 2 PVPBG 结构

在文[8]中提出了如图 1 所示的高阻表面的 PVPBG 结构. 在介质上表面周期性地镀有正方形的金属薄膜, 下表面有一层金属地, 每个金属块通过通孔与地相连. PVPBG 结构与其他 PBG 结构相比有两个优点: 一是它的结构简单, 制造方便; 二是它的尺寸小, 选择适当的介电常数及介质板厚度, 可以使其周期只有  $0.1$  倍的介质波长.

高阻表面可以等效为二维电容电感网络 (图 1 中的 L 和

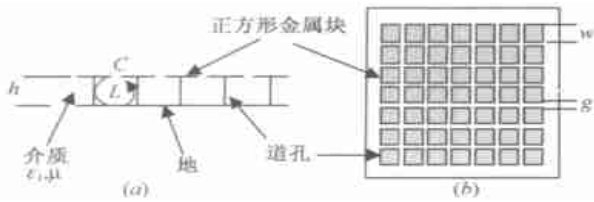


图1 PVPBG结构示意图 (a)侧视图;(b)俯视图

C). 我们将表面阻抗等效为平面谐振电路的阻抗, 表面阻抗在谐振频率附近变得很大. 表面阻抗高的频率范围就是频率阻带, 即光子带隙. 由文[5]知, PVPBG的带隙中心频率及  $3\text{dB}$  带宽可以分别由以下近似公式求得:

$$f_0 = \frac{1}{2P\sqrt{LC}}, \quad \Delta f = f_0 \frac{1}{G} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

其中,  $f_0$  为带隙中心频率,  $\Delta f$  为带隙宽度,  $G = 120P$ , 即自由空间的波阻抗,  $L = L_h$ ,  $C = \frac{W(E_0 + E_1)}{P} \cosh^{-1} \left[ \frac{2W + g}{g} \right]$ .

高阻表面能抑制带隙频率范围内表面波的传播, 当将它作为有接地面的天线的地时, 由于介质截断处不连续引起的表面波辐射将会被抑制, 从而减小天线的背瓣和旁瓣辐射. 高阻表面可以看成人造磁壁<sup>[6]</sup>. 如果水平振子放置在高阻表面上, 由高阻表面引起的水平镜像电流将与振子上的电流同相, 而不是象电壁一样为反相. 所以高阻表面能加强水平振子的

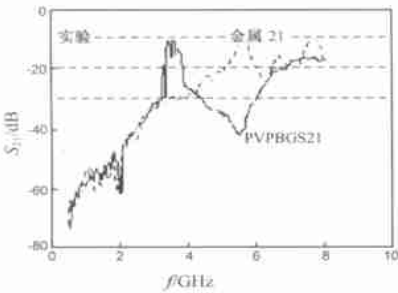


图3 共面微带线法测量得到的PVPBG结构的带隙特性

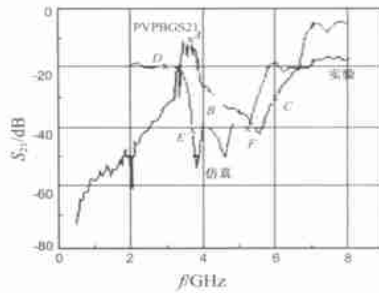


图4 共面微带线法PVPBG仿真与实验带隙特性比较

图4给出了仿真与测量结果的比较. 在该图中, 当  $S_{21}$  曲线下落到比开始呈下降趋势的频点处(图中的A点和D点)的  $S_{21}$  值小  $20\text{dB}$  时的频点(B点和E点)为带隙的低端频点,  $S_{21}$  经过最低点后上升到此数值时的频点(C点和F点)为带隙的高端频点. 即在图4中, 从B点到C点为实验带隙范围, 从E点到F点为仿真带隙范围. 仿真比实验测得的带隙频率偏低, 形状也有一些差别, 这是因为印制板的制作公差以及介质板的介电常数及金属损耗、厚度等与标称值不符; 同时, 由于微带线与PVPBG之间是弱耦合, 所以探针实验结果也有一定的影响.

### 312 振子法

振子法测量PBG结构带隙特性的结构如图5所示, 两个短振子分别作为PBG结构中表面波的激励源和接收端. 垂直振子高度为  $2\text{mm}$ .

### 313 悬置微带线法

图6所示的悬置微带线法中, 微带线置于PBG结构之上,

正面辐射, 而不是象电壁那样将之削弱. 因此, 利用高阻表面可以减小有地的水平振子的高度.

本文中的仿真都是通过Zeland软件用FDTD的方法实现的. 实验测量仪器为HP8510C网络分析仪.

## 3 PBG结构的测量方法

测量PBG结构的带隙特性时, 由于测量结构对带隙特性的影响, 使用不同的结构测量结果可能会有差别, 本节以PVPBG结构为例讨论了共面微带线法、振子法和悬置微带线法. 本节中PVPBG结构的尺寸如下: 金属贴片  $9\text{mm} @ 9\text{nm}$ , 金属贴片间的缝隙  $11.5\text{mm}$ , 介质厚度  $3\text{mm}$ , 介电常数  $21.7$ .

### 311 共面微带线法

图2所示的共面微带线法中,  $508$  微带线中的电磁波通过小缝耦合到PBG结构中. 测量得到的  $S_{21}$  曲线如图3所示. 图中给出了将金属代替PBG结构得到的对比曲线. 在带隙范围内, PVPBG的  $S_{21}$  比金属的  $S_{21}$  小.

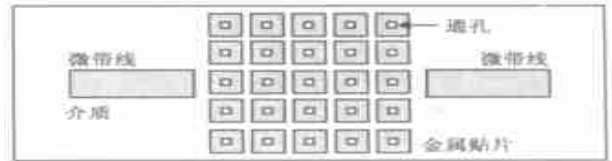


图2 共面微带线法(俯视图)

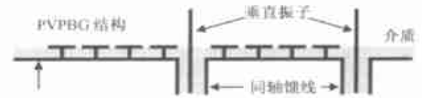


图5 振子法测量PVPBG结构的带隙特性(侧视图)



图6 悬置微带线测量PBG带隙的侧视图

并与PBG结构共地. 悬置微带线介质的介电常数可以与PBG介质的介电常数相同, 也可以不同. 悬置微带线中与PBG结构形成强耦合. 在带隙范围内, 电磁波的传输将受抑制.

表1给出了不同方法得到的带隙特性结果的比较, 其中的近似公式指公式(1). 三种测量方法仿真得到的带隙的中心频率( $f_0$ )基本相等, 与近似公式(1)的计算结果吻合, 但是带隙宽度( $\Delta f$ )有一些差别. 共面微带线实验测量的结果与仿真结果的差异原因已经在311小节中解释过了.

表1 不同方法分析得到的PBG带隙特性比较

	共面微带 仿真	共面微带 实验	悬置微带 仿真	振子仿真	近似公式
$f_0 / (\text{GHz})$	4.5	5.175	4.6	4.6	4.7
$\Delta f / (\text{GHz})$	1.4	1.65	1	1.8	1.4

共面微带线法和振子法中, 激励和接收装置与PBG结构之间的耦合是弱耦合, 而悬置微带线法中微带线和PBG结构

间则是强耦合,受外界干扰较小.振子法中,振子的长度会对测量结果有一定的影响,况且振子比微带线更容易受周围环境影响.但是在悬置微带线法中,悬置微带线的介质会影响带隙的中心频率;同时,微带线与 PBG 结构之间的距离对带隙宽度也有影响,测量时应选择合适的距离<sup>[9]</sup>.

在共面微带线法中,只要微带线的长度足够(一般要求大于 0.5 倍带隙中心频率处的介质波长),共面微带线本身对 PBG 结构的影响不大.在表 1 中,共面微带线法仿真得到的带隙宽度与近似公式(1)计算得到的结果相同.因此我们采用共面微带线的方法来分析 PBG 结构.

#### 4 PBG 结构在振子天线中的应用

##### 4.1 垂直振子

在以金属为地的垂直振子中,表面波传播到金属边缘时由于介质的不连续会产生辐射,形成天线的背瓣辐射.当用 PVPBG 结构代替金属作为垂直振子的地时,由于 PVPBG 结构对表面波的抑制作用,将会减小天线下半空间的辐射,提高上半空间的辐射.在图 7 中,地的大小为  $3K_0@3K_0$ ,其中  $K_0$  为振子谐振频率处的自由空间波长.这种 PVPBG 结构以 5GHz 为中心有一个带隙.

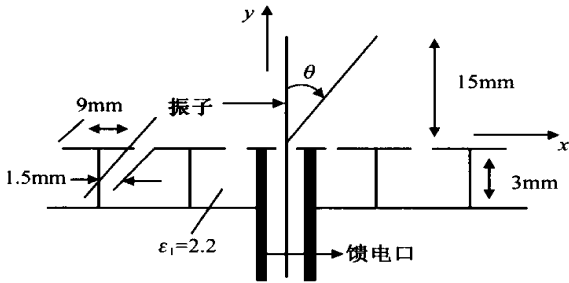


图 7 以 PBG 结构为地的垂直振子天线

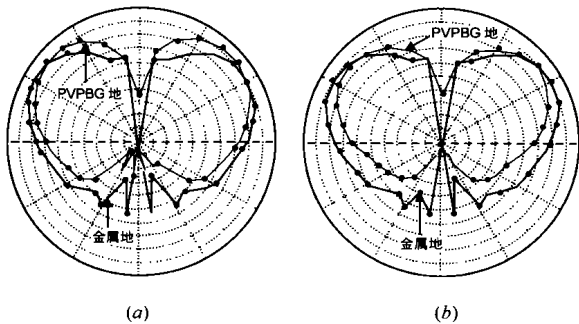


图 8 仿真的垂直振子辐射图 (a) x- y 平面; (b) y- z 平面

从图 8 可以看出,与以同样大小的金属为地的振子天线相比, PVPBG 地的天线下半空间辐射显著减小,并且在  $\theta=90^\circ$  方向上的辐射减小了 4dB. 上半空间辐射加强,且方向图变得比较光滑.

##### 4.1.2 水平振子

在以金属为地的水平振子中,金属对水平电流的反相镜像电流会削弱天线的辐射.为了获得足够大的增益,水平振子必须放置得离金属地面足够高(至少  $1/4$  波长),而 PVPBG 结

构可以看成人造/磁壁<sup>0</sup>,它产生的水平镜像电流同相,能增强水平振子的辐射.所以水平振子可以贴近 PVPBG 地面放置,减小了天线高度.

图 9 中的 PVPBG 结构以 5GHz 为中心存在一个带隙.实验测得的以 PVPBG 结构为地和以金属为地的水平振子在正前方的辐射对比如图 10. PBG 地的水平振子在带隙内正前方的辐射比金属地的正前方辐射大.在  $f=5.15\text{GHz}$  处, PVPBG 地的水平振子正前方的辐射比金属地的水平振子大 12.88dB. PVPBG 地的水平振子正前方辐射比正后方辐射大 10dB(图 11). 仿真得到的辐射图对比如图 12. 仿真结果与实验结果基本相符.

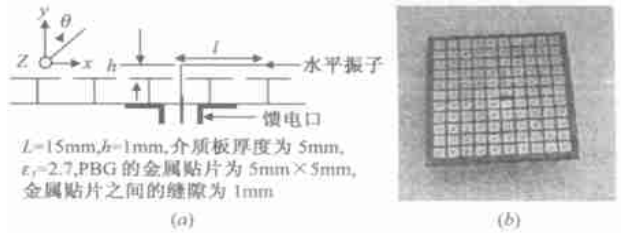


图 9 PVPBG 地的水平振子 (a) 侧视图; (b) 实物照片

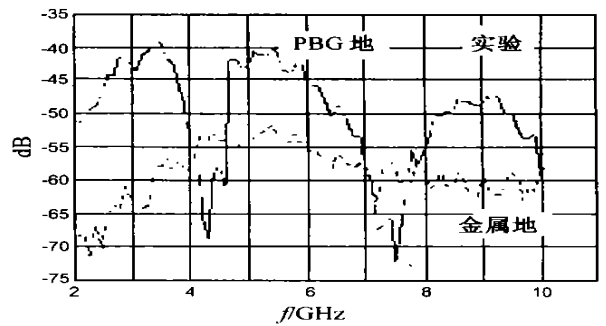


图 10 金属地与 PVPBG 地水平振子正前方辐射比较(实验)

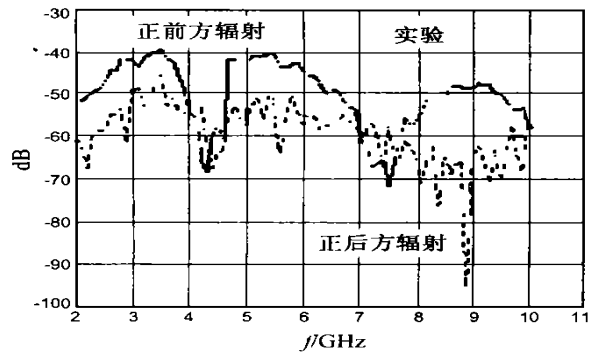


图 11 PVPBG 地水平振子正前方与正后方辐射比较(实验)

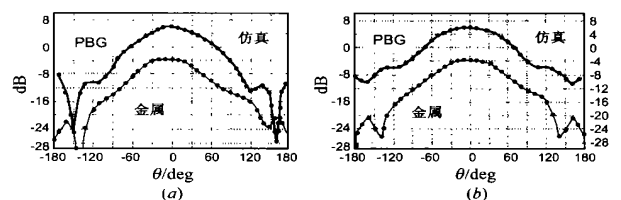


图 12 PBG 地与金属地辐射比较 (a) x- y 面; (b) y- z 面

### 5 PBG 结构在微带天线中的应用

本节研究 PBG 结构在微带天线中的作用. 将 PBG 结构作为微带天线的地时, PBG 结构的位置不同, 对微带天线性能的影响也不相同. 这里讨论了共面微带天线和悬置微带天线两种位置.

#### 5.1.1 共面微带天线

图 13 中, PVPBG 结构与微带天线共面放置. 仔细调节 PBG 结构与微带贴片天线之间的距离, 可以减小 PVPBG 结构对微带天线谐振频率的影响. 微带贴片天线的尺寸为  $L=13\text{mm}$ ,  $W=10\text{mm}$ , 馈电位置为  $(-21.8\text{mm}, 0\text{mm})$ . 介质板厚  $5\text{mm}$ , 介电常数为  $21.7$ , 地的尺寸为  $12\text{cm}@12\text{cm}$ . PVPBG 的参数为: 金属贴片边长  $5\text{mm}$ , 金属贴片之间的缝宽  $1\text{mm}$ , 带隙范围为  $4\sim 61.3\text{GHz}$ . 微带天线的谐振频率为  $51.7\text{GHz}$ , 正好落在带隙内.

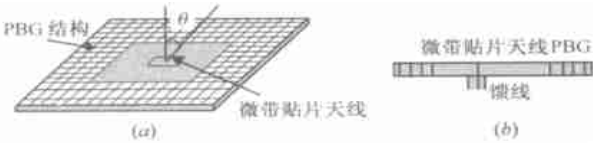


图 13 以 PVPBG 结构为地的共面微带天线

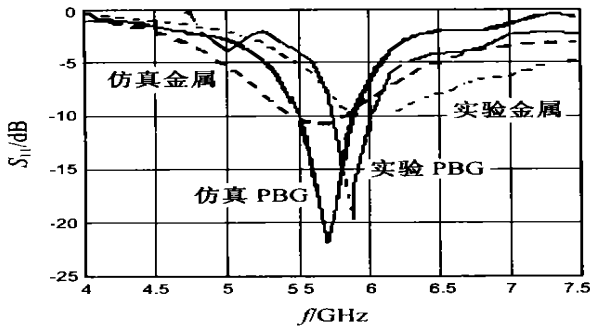


图 14 微带天线的  $S_{11}$  曲线(实验与仿真结果比较)

实验和仿真得到的  $S_{11}$  曲线如图 14 所示. 我们取  $5.5\text{GHz}$  时天线的辐射方向图进行比较. 图 15 (a) 中, E 面方向图关于不对称, 这是因为同轴馈电接头的辐射不对称所致. 在 E 面上, PVPBG 地的微带天线比金属地的微带天线正前方辐射大  $2\text{dB}$ , 在  $H=90^\circ$  方向上小  $5\text{dB}$ , 背瓣辐射小  $8\text{dB}$ . 在 H 面, PVPBG 地的微带天线比金属地的微带天线在整个上半空间的辐射都大, 背瓣辐射小  $8\text{dB}$ . PVPBG 地的微带天线正前方辐射与正后方辐射的比值为  $25\text{dB}$ , 而金属地的微带天线为  $15\text{dB}$ . 这是 PVPBG 结构对表面波抑制作用的结果.

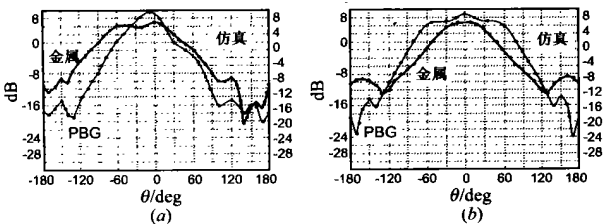


图 15 金属地与 PBG 地微带天线辐射比较 (a) E 面; (b) H 面

#### 5.1.2 悬置微带天线

为了减小 PVPBG 结构对微带天线谐振频率的影响, 我们将微带贴片天线放在 PVPBG 之上(图 16), 此时 PVPBG 与微带贴片天线间的距离可以取得比较小. 图 16 中天线的尺寸及 PVPBG 的参数与图 13 同. 仿真得到的辐射图比较如图 17 所示. PBG 地的悬置微带天线比金属地的微带天线正前方辐射大  $1\text{dB}$ ,  $H=180^\circ$  的辐射小  $5\text{dB}$ . PBG 地的微带天线正前方辐射比正后方大  $24\text{dB}$ .

PVPBG 结构在悬置微带天线中比在共面微带天线中对表面波的抑制作用稍差, 但是悬置微带天线的地比共面微带天线的地面积小. 共面微带天线地的尺寸是  $12\text{cm}@12\text{cm}$ , 而悬置微带天线地的尺寸只有  $71.5\text{cm}@7\text{cm}$ .



图 16 悬置 PBG 微带天线 (a) 及金属地微带天线 (b)

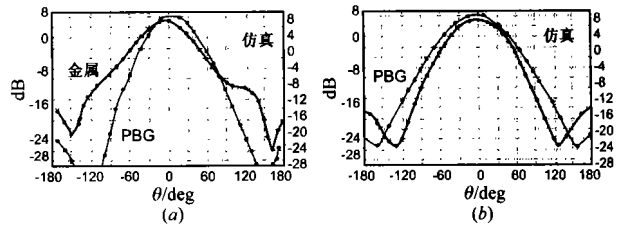


图 17 PBG 地与金属地辐射方向图比较 (a) E 面; (b) H 面

### 6 PBG 结构在 E 形天线中的应用

E 形微带天线(图 18)的带宽可以达到  $30\%$  以上<sup>[10]</sup>. 将 PBG 结构用做 E 形天线的地, 可以得到宽带低背瓣的微带天线.

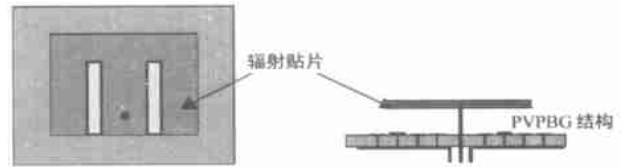


图 18 以 PVPBG 为地的 E 形微带天线

从辐射图(图 19)上可以看出, 无论 E 面还是 H 面, 加上 PVPBG 结构的 E 形天线背瓣辐射都减小了  $6\text{dB}$ . PBG 地的 E 形天线上半空间的最大辐射比正后方辐射大  $30\text{dB}$ . 金属地的 E 形天线和 PVPBG 地的 E 形天线在最大辐射方向上的辐射相等. 仿真得到的  $S_{11}$  曲线如图 20 所示.

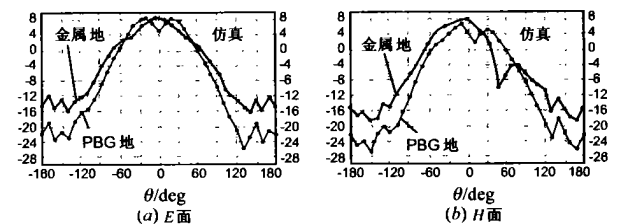


图 19 金属地与 PBG 地 E 形天线辐射图比较

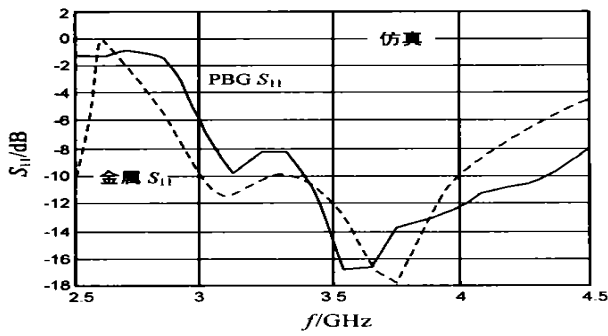


图 20 以金属为地和以 PVPBG 为地的 E 形天线 S<sub>11</sub> 参数

### 7 交指 PVPBG

PVPBG 结构的优点之一是尺寸小, 当选择介电常数较大, 厚度比较厚的介质时, 其单元的长度可以只有 0.1 倍带隙中心频率处的介质波长。但是, 当带隙的中心频率降低时, PVPBG 结构的尺寸变大。本节提出了尺寸更小的交指 PVPBG 结构。

由带隙中心频率与电容电感的关系  $f = 1 / \sqrt{2P \sqrt{LC}}$  知, 电容增大, 带隙中心频率减小。PVPBG 的金属贴片之间通过缝电容耦合, 当用相同尺寸下电容量较大的交指电容来代替缝电容, 则可以获得较低频率的带隙。也就是说, 要获得相同频率的带隙, 用交指电容的 PBG 结构具有较小的尺寸。下面我们将交指电容耦合的 PVPBG 结构简称为交指 PVPBG, 而将缝电容耦合的 PVPBG 结构简称为缝耦合 PVPBG。在本节中, 我们采用共面微带线法(见 3.1 节)来测量和仿真 PBG 结构的带隙特性。

交指 PVPBG 的结构及尺寸见图 21 和图 22。缝耦合 PVPBG 结构的尺寸为: 金属贴片 9mm@9mm, 金属贴片之间的缝隙 11.5mm。本节中所有 PVPBG 的介质参数都相同: 介质板厚 3mm, 介电常数 21.7。

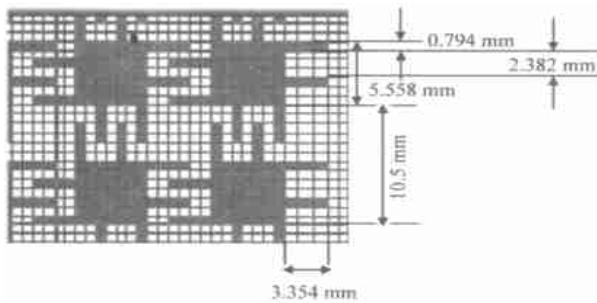


图 21 交指 PVPBG 结构尺寸

图 23 给出了实验得到的交指 PVPBG 和缝耦合 PVPBG 的带隙特性。图中带隙范围的界定方法与 3.1 节相同。从图 23 中可以看到, 缝耦合 PVPBG 的带隙范围为 4.45GHz~5.95GHz, 而交指 PVPBG 的带隙范围为 3.8GHz~5.5GHz, 它的中心频率比缝耦合 PVPBG 带隙的中心频率小 800MHz, 低端带隙频率低 650MHz。交指 PVPBG 的 S<sub>21</sub> 曲线在高频端起伏较大, 这是因为交指电容结构比较复杂, 测量时电磁波的多径反射造成的。

图 24 给出了仿真得到的交指 PVPBG 与缝耦合 PVPBG 的

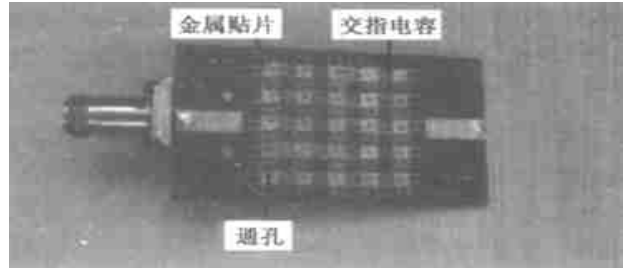


图 22 交指 PVPBG 带隙特性测量结构(实物照片)

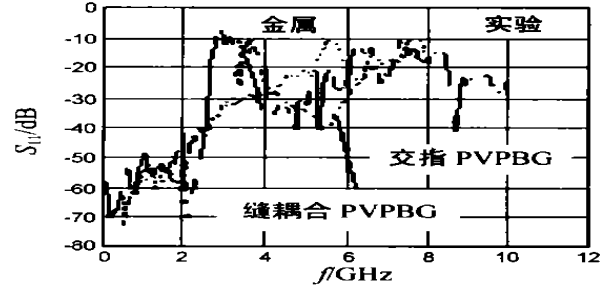


图 23 缝耦合 PVPBG 与交指 PVPBG 带隙特性比较(实验)

S<sub>21</sub> 比较。仿真得到的缝耦合 PVPBG 的带隙范围是 31.8GHz~51.2GHz, 交指 PVPBG 的带隙范围是 31.4~41.2GHz。交指 PVPBG 的带隙中心频率比缝耦合 PVPBG 低 700MHz。实验与仿真之间的误差原因如 3.1 节所述。

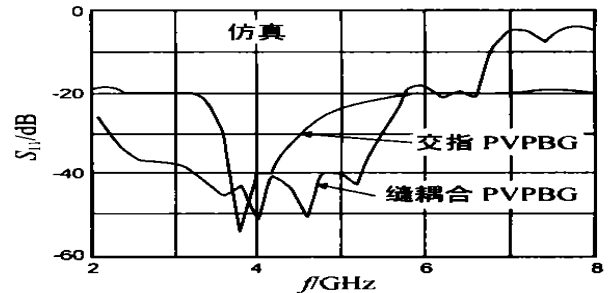


图 24 缝耦合 PVPBG 与交指 PVPBG 带隙特性比较(仿真)

仿真和实验结果都表明, 尺寸相同的交指 PVPBG 的带隙频率比缝耦合 PVPBG 低。

为了进一步研究交指 PVPBG 结构的带隙特性, 我们将交指 PVPBG 和缝耦合 PVPBG 分别用作水平振子的地, 水平振子距地面 1mm, 振子长度为  $f = 3.6\text{GHz}$  时自由空间波长的 1/4。仿真得到的金属地、交指 PVPBG 地和缝耦合 PVPBG 地的水平振子的辐射方向图比较如图 25。在  $f = 31.6\text{GHz}$  时, 交指 PVPBG 地的水平振子比金属地的水平振子正前方辐射大 11dB, 而缝耦合 PVPBG 地的水平振子只比金属地的水平振子大 4dB, 这说明 3.6GHz 在交指 PVPBG 的带隙内, 而不在缝耦合的 PVPBG 的带隙内。交指 PVPBG 地水平振子的正前方辐射比正后方大 16dB。

要得到与交指 PVPBG 相同中心频率(3.8GHz)的带隙, 需要的缝耦合 PVPBG 的尺寸为: 金属贴片 12mm@12mm, 金属贴片间的缝隙 1.8mm, 即 PBG 单元的周期为 13.8mm。仿真得到的带隙特性与交指 PVPBG 比较如图 26 所示, 两种 PBG 结构

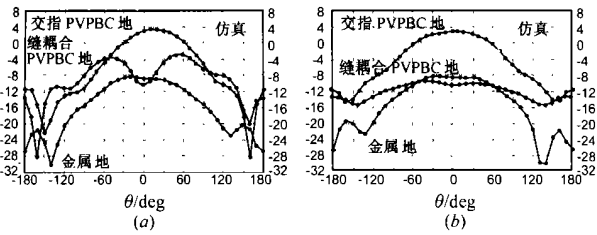


图 25  $f = 3.6\text{GHz}$ , 金属地、交指 PVPBG 地和缝耦合 PVPBG 地的水平振子的辐射方向图

(a) x- y 平面; (b) y- z 平面

的带隙中心频率相等, 而交指 PVPBG 的单元周期为  $10.5\text{mm}$ , 仅为缝耦合 PVPBG 的单元周期的  $3/4$ .

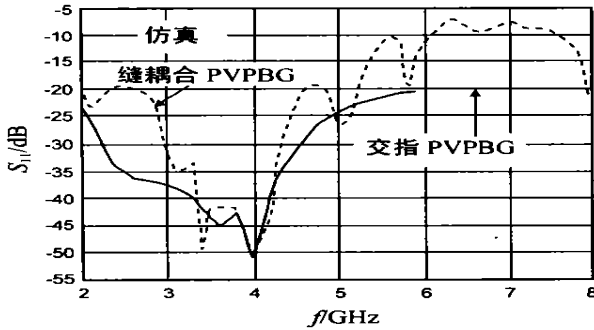


图 26 周期为  $10.5\text{mm}$  的交指 PVPBG 与周期为  $13.8\text{mm}$  的缝耦合 PVPBG 带隙特性比较

## 8 结论

本文首先对 PBG 结构的几种测量方法(共面微带线法, 悬置微带线法和振子测量法)进行比较, 并选择共面微带线法作为本文后几节的仿真方法。

接着, 以 PVPBG 结构为例研究了 PBG 结构在振子天线中的应用。当 PBG 结构被用作垂直振子和垂直振子阵列的地时, 能够增强天线上半空间辐射, 减小下半空间辐射。用作水平振子的地面, 当水平振子距地面  $0.02$  自由空间波长, 振子长度为  $1/4$  自由空间波长时, 天线正前方辐射比金属地的水平振子正前方辐射增加了  $12.88\text{dB}$ , 正前方辐射比正后方辐射大  $10\text{dB}$  以上。并且以 PBG 结构为地时, 水平振子可以贴近地面放置, 与以金属为地的水平振子相比, 减小了整个天线的高度。

PBG 结构使贴片微带天线的正前方辐射增加  $1\sim 2\text{dB}$ , 背瓣辐射减小  $8\text{dB}$ 。将 PBG 结构应用在 E 形天线中可以获得宽带、低背瓣辐射的微带天线。

虽然本文中的仿真和实验结果都以 PVPBG 结构为例, 由于其他的 PBG 结构同样具有高阻表面及等效为磁壁的特性, 因此本文中有关的结论对其他的 PBG 结构仍然适用。

本文最后提出了一种新的交指 PVPBG 结构, 用电容量更大的交指电容代替缝耦合 PVPBG 结构中的缝耦合电容, 在相同的尺寸下降低了带隙的中心频率。实验结果表明, 当两种结构尺寸相同时, 交指 PVPBG 的带隙中心频率比缝耦合 PVPBG 小  $800\text{MHz}$ 。如果要获得相同中心频率的带隙, 交指 PVPBG 的

单元周期只有缝耦合 PVPBG 的单元周期的  $3/4$ 。

## 参考文献:

- [1] V Radisic, Y Qian, R Coccio, T Itoc. Novel 2D photonic bandgap structure for microstrip lines[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Lett., 1998, 8(2): 69-71.
- [2] FeiRan Yang, KuangPing Ma, Yongxi Qian, Tatsuo Itoh. A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic bandgap (UCPBG) structure[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2092-2098.
- [3] E Yablonovitch, T J Gmitter. Photonic band structure: the face centered cubic case[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1990, 7(9): 1792-1800.
- [4] R Brown, C D Parker. Radiation properties of a planar antenna on a photonic crystal substrate[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1993, 10(2): 404-407.
- [5] Fan Yang, Yahya Rahmat Samii. Mutual coupling reduction of microstrip antennas using electromagnetic bandgap structure[A]. IEEE AP2s Digest[C]. USA: IEEE, 478-481.
- [6] Yasushi Horii, Makoto Tsutsumi. Harmonic control by photonic bandgap on microstrip patch antenna[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Lett., 1999, 9(1): 13-15.
- [7] V Radisic, Y Qian, T Itoc. Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Lett., 1998, 8(1): 13-14.
- [8] D Sievenpiper, L Zhang, R F J Broas, N G Alexopolous, E Yablonovitch. High impedance electromagnetic surfaces in a forbidden frequency band[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [9] 胡荣. PBG 结构特性的研究及其在天线中的应用[D]. 北京: 清华大学电子工程系, 2002.
- [10] Yang F, Xue Xia Zhang, Xiaoning Ye, Rahmat Samii Y. Wideband E shaped antennas for wireless communications[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2001, 49(7): 1094-1100.

## 作者简介:



胡荣女, 1977 年生于广西, 分别于 1999 和 2002 年毕业于清华大学电子工程系电磁场与微波技术专业, 获学士和硕士学位。



张雪霞女, 1936 年生于广东省, 清华大学电子工程系教授, 多年来从事天线电磁场与微波技术方面的教学和科研工作。