

## 二维电磁带隙结构研究的新方法

樊明延 胡荣 郝清 张雪霞 冯正和

(清华大学电子工程系,微波与数字通信国家重点实验室,北京,100084)

**摘要** 应用悬置微带线方法(SMM)对二维EBG结构进行了测量和计算.对二维电小EBG(UC-EBG和PV-EBG)的特性用SMM法进行了统一的实验和仿真分析.与其他方法对比,由于采用了“强耦合”结构,更能显现出二维电磁带隙结构的特性.同时提出了新型的悬置微带贴片的EBG天线,该天线结构紧凑,更利于EBG的实际应用.

**关键词** 悬置微带线法,光子带隙,电磁带隙.

## NEW METHOD FOR 2D-EBG STRUCTURES' RESEARCH

FAN Ming-Yan HU Rong HAO Qing ZHANG Xue-Xia FENG Zheng-He

(E&E Department Tsinghua University, State Key Labs on Microwave and Digital Communications, Beijing 100084, China)

**Abstract** The two-dimensional (2D) EBG structure is measured and calculated by using of the suspending microstrip method (SMM). The characteristics of UC-EBG and PV-EBG are firstly measured and simulated by using of SMM. Comparing with other methods, the characteristic of 2D-EBG is exhibited more obviously owing to use the strongly coupling structures. The novel suspending patch EBG antenna is also presented. The compact structure of the antenna is more advantageous for EBG applications.

**Key words** suspending microstrip method, PBG, EBG.

### 引言

微波、毫米波频段中,电磁波在周期性结构传播中存在的电磁带隙(Electromagnetic Band Gap)被认为是与半导体中光子带隙(Photonic Band Gap)的对应特性,已经得到了较为深入的研究.具有电磁带隙特性的人造材料被应用到天线,谐振腔,滤波器等器件上,用以改善提高其性能.

早期的EBG结构主要是三维结构<sup>[1]</sup>,EBG的实现是由对介质进行化学腐蚀,激光打孔或离子束刻蚀;或者约束球形或条形电介质在液体或气体中的有序排列等方法实现.现在的研究主要集中在二维和二维结构的EBG,二维结构主要用于抑制微带天线的表面波,改善匹配,提高天线辐射性能等方面<sup>[2,3,5,6]</sup>.在实际实用中,传统的EBG结构的周期一般是带阻波长的一半,因此低频尺寸过大限制了EBG的应用.当前,EBG的电小化是EBG研究的重要课题.

电小EBG主要有两种形式:PV-EBG(Pad and Via-EBG)<sup>[3]</sup>和UC-EBG(Uniplanar Compact-EBG)<sup>[4,5]</sup>.这两种结构由于其结构设计紧凑,对微带天线的表面波具有很好的抑制作用,因此,它们在天线上的应用研究日益得到关注.

然而,由于PV-EBG和UC-EBG结构复杂,给理论分析和实验测量都带来了很大的问题.目前的仿真和实验对于验证PV-EBG和UC-EBG均有不同的问题和缺陷.本文提出了悬置微带线法用于测量和计算二维的EBG结构,并把该方法用于PV-EBG和UC-EBG的分析和实验中.理论和实验结果均证明了该方法的有效性,与其他方法对比显示了悬置微带线法的优越性.

### 1 悬置微带线法介绍

悬置微带线的测量结构如图1所示.二维的EBG材料放置在微带线和平板地之间,形成“三明治”结构.在微带线和EBG材料之间放置支撑微带

\* 国家自然科学基金(批准号69971013,60171015)和973国家重点基础研究基金(批准号G1999033105)资助项目

稿件收到日期2002-03-19,修改稿收到日期2002-10-20

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 69971013, No. 60171015) and the National "973" Basic Research Key Foundation of China (No. G 1999033105)

Received 2002-03-19, revised 2002-10-20

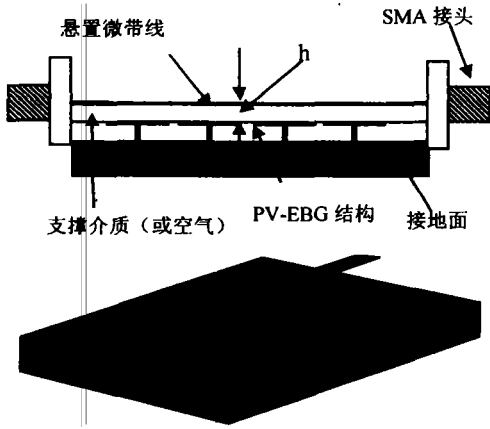


图 1 悬置微带线法结构示意图  
 Fig.1 Sketch of the suspending microstrip method structure

线用的介质板. 并在微带线的两端接入 SMA 接头, 以便进行 S 参数测量. 相对于传统的表面波电磁带隙的测量, 这是一种“强耦合”的测量方法, 可以在微带线和地之间激励起较强的传播模式的场, 可使同样位于微带线和地之间二维 EBG 结构显现出更明显的带隙特性. 该测量方式的优点在于, 较强信号的耦合可以减小其他寄生模式的影响, 使电磁带隙特性更为显著; 并且这种“强耦合”结构有利于进行数值全波分析, 对数值误差有很好的抑制作用.

对 UC-EBG 和 PV-EBG 的二维 EBG 结构而言, 微带结构的“带阻”特性可以直接从微带传输的场结构来解释. 图 2 为典型的微带线电场和磁场的示意图. 地面上覆盖一层二维 EBG 结构后, 则在 EBG 的带隙频率内, 该二维 EBG 结构可以近似等效为磁壁, 这样就破坏了原来微带线内的场结构, 为了满足磁壁的边界条件, 磁场必须与磁壁垂直, 地上不再有纵向(y 方向)的电流存在, 这样 EBG 结构的对地电流的“扼流”作用抑制了该模式场的传播.

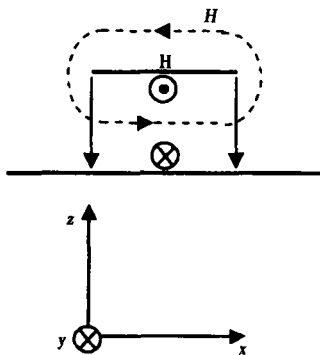


图 2 微带线横截面示意图  
 Fig.2 Sketch of corss section of microstrip

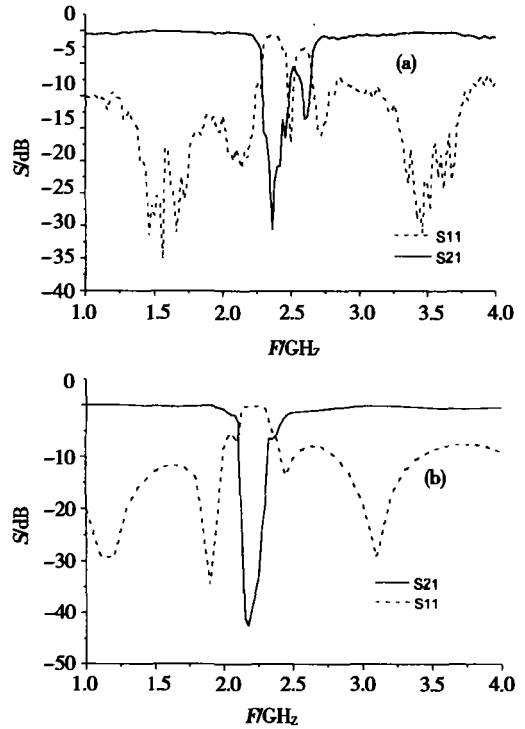


图 3 PV-EBG 的实验(a)和仿真计算结果(b)对比  
 Fig.3 Comparison between the measurement (a) and simulation (b) of PV-EBG

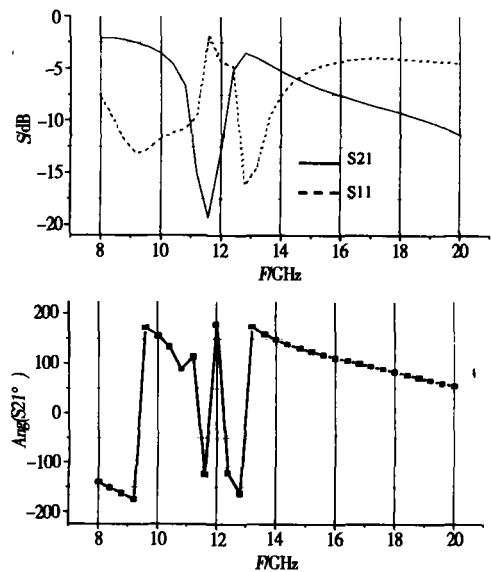


图 4 同文献[3]结构尺寸相同的 EBG 结构计算  
 Fig.4 Simulation of EBG structure with the same dimension of reference[3]

1.1 用悬置微带线法对 PV-EBG 结构的分析计算  
 首先我们来验证本方法在 PV-EBG 分析中的有

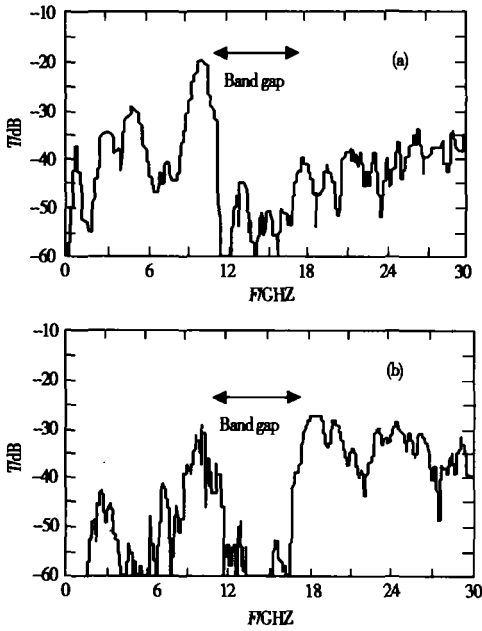


图5 文献[3]中的 TM 模式表面波 (a) TE 模式表面波在 PV-EBG(b) 结构中传播特性  
Fig.5 In reference [3] transmission characteristics of TM mode surface (a) and that of TE mode surface (b)

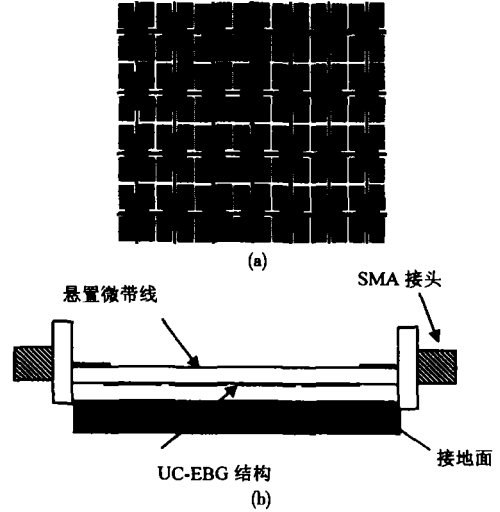


图7 UC-EBG 示意图 (a) 和 UC-EBG 采用悬置微带线法测量示意图 (b)  
Fig.7 Sketch of the UC-EBG (a) and the SMM method in UC-EBG (b)

效性. 这里采用 PV-EBG 的尺寸为: 正方形边长 17mm, 间距 0.5mm, EBG 板厚 0.8mm. 悬置微带线宽度 2.2mm, 加载的支撑介质厚度 0.8mm. 我们采用矩量法对该结构进行全波仿真, 理论和实验结果见图 3(a) 和图 3(b). 从理论和实验的对比可以看到, 实验和仿真得到的结果基本一致, 在中心频率 2.25GHz 附近出现了明显的电磁带隙. 计算带隙比测量结果稍低, 因为实际测量中, 支撑介质和 PV-EBG 结构存在空气间隙造成的. 我们还将悬置带线和 PV-EBG 间加载介质去掉进行仿真计算, 和原结

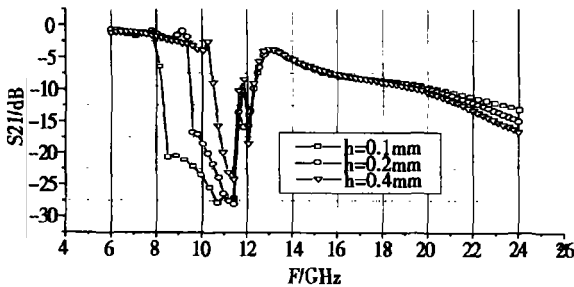


图6 不同悬置微带线高度下的带隙计算情况 PV-EBG 结构如文献[3]  
Fig.6 In reference [3], transmission characteristics of TM mode surface (a) and that of TE mode surface (b)

果对比发现, 加载介质的情况, 电磁带隙降低 90MHz. 这是由于加载介质增大了 PV-EBG 的等效分布电容. 在下面的分析中, 我们均将加载的介质设为空气.

我们对文献[3]用悬置微带线的结构进行仿真分析见图 4. 悬置微带线宽度为 1.5mm, 距离 PV-EBG 的高度为 0.8mm, 中间为空气介质. 可以明显的看到在中心频率 12GHz 附近存在电磁带隙. 图 4 中的图 b 为其传输系数的相位, 可以看到在 12GHz 附近出现了相位从  $-180^\circ$  的跳变, 这样也证明了电磁带隙的存在.

文献[3]中采用了垂直于 PV-EBG 的小探针激励起 TM 模式的表面波, 并在另一端采用同样的探针接收. 由于从发射到接收的耦合极弱, 两端口间的信号衰减在 20dB 以上. 图 5 为文献[3]TM 表面波在该 PV-EBG 结构上的传输特性的测量结果. 从图 5 中可以观察到, 除了中心频率 12GHz 有阻带外, 还存在其他频率的阻带, 电磁带隙的现象不如图 4 的仿真结果明显.

图 6 结果显示了不同悬置微带线高度下的带隙计算情况. 可以看出, 随着微带线的高度  $h$  降低, 电磁带隙变宽. 但是微带线距离 EBG 结构过近, 会增大 PV-EBG 的等效分布电容, 使计算频带向低端偏移, 因此计算过程中要取适当的微带线悬置高度, 以保证仿真结果的准确性.

### 1.2 用悬置微带线法对 UC-EBG 结构的分析计算

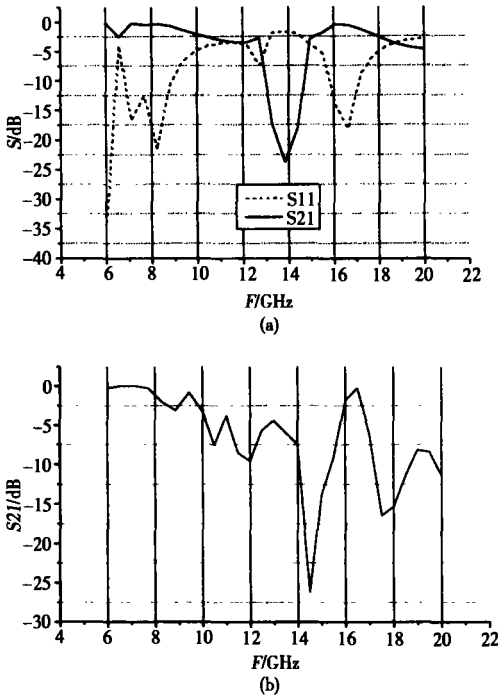


图 8 悬置微带线结构分析(a)和直接采用 UC-EBG 作为地的仿真结果(b)对比

Fig. 8 Comparison between the simulation by SMM method (a) and the simulation where the UC-EBG is used as ground (b)

对于 UC-EBG 结构,我们取文献[4]中的数据  
进行仿真分析,在悬置微带线与接地板之间放置尺寸  
如文献[4]中的 UC-PBG 材料. 悬置微带线宽度  
为 45cm,距离 UC-EBG 的高度为 15cm,中间为空气  
介质.

该结构的仿真结果如图 8(a)所示,可以看到在  
中心频率 14GHz 附近有明显的电磁带隙存在. 而在  
文献[4]中,是将 UC-EBG 直接做为地放置到微带  
线的下面. 图 8(b)为用 UC-EBG 直接作为地的仿  
真结果,此结果和文献[4]中的结果是一致的,同样  
可以观察到,在 14GHz 中心频率附近有电磁带隙,  
但频率大于 17GHz 以后,由于直接采用 UC-EBG 作  
为地会引入较大的寄生效应,导致入射波出现较大  
的衰减,不利于 UC-EBG 电磁带隙特性的显现. 以  
上结果可以看到,将 UC-EBG 直接做为微带线的地  
的结构,会对 UC-EBG 的带隙特性产生干扰;而本文



图 9 共面结构的 PV-EBG 天线  
Fig. 9 Coplanar PV-EBG antenna

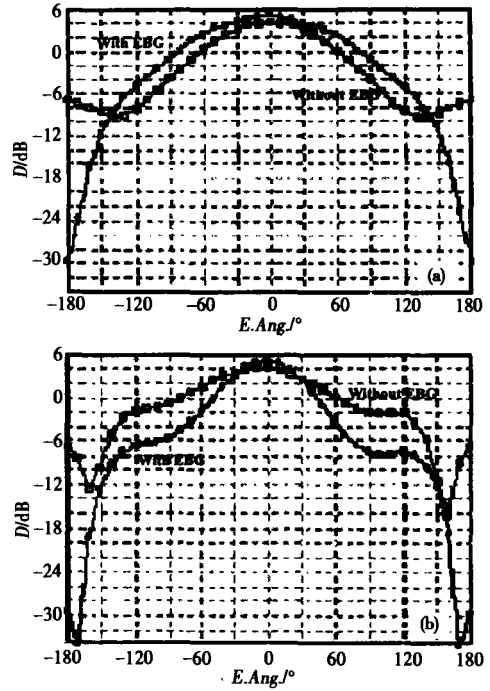


图 10 共面结构的 PV-EBG 天线辐射方向图与  
普通天线对比 (a) 天线 H 面辐射特性比较 (b)  
天线 E 面辐射特性比较

Fig. 10 Comparison between the coplanar PV-EBG  
antenna's radiation and typical microstrip antenna's  
(a) comparison of antenna's radiation in H-plane  
(b) comparison of antenna's radiation in E-plane

提出的悬置微带线法中,UC-EBG 没有直接接地,对  
光子带隙带外的场传播模式影响较小,可以较好的  
反映电磁带隙特性.

## 2 二维电磁带隙结构在微带天线中的应用

在微带天线中,采用 EBG 结构形成的高阻表面  
可以抑制表面波,有效的改善天线前后比,减小多径  
干扰. 对于厚基板的微带天线而言,有效地抑制表  
面波,还可以提高效率,改善驻波比. 本文以 PV-  
EBG 为例,给出两种设计结构,一种是普通的共面  
微带贴片结构文献[3],另一种为本文提出的新型  
悬置微带贴片结构.

### 2.1 共面微带贴片加载 PV-EBG 天线

如图 8 所示. 微带天线的辐射单元距离 PV-



图 11 新型悬置微带贴片 PV-EBG 天线  
Fig. 11 Novel suspending patch PV-EBG antenna

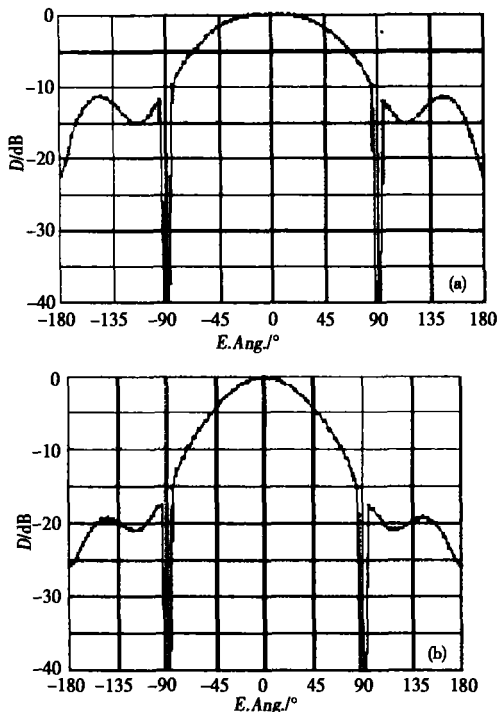


图 12 新型悬置微带贴片 PV-EBG 天线辐射特性与普通天线对比 (a) 普通地板悬置微带贴片的 E 面辐射特性 (b) 新型悬置微带贴片 PV-EBG 的天线 E 面的辐射特性

Fig. 12 Comparison between the radiation characteristic of the novel suspending patch PV-EBG antenna and that of typical antenna (a) radiation characteristic of suspending Patch antenna with ordinary ground plate in E plane (b) radiation characteristic of suspending Patch with PV-EBG plate in E plane

EBG 的金属贴片之间间隔 10mm, 这样可以减小 PV-EBG 结构对微带天线阻抗匹配特性的影响. 微带天线辐射单元的尺寸为  $L = 7\text{mm}$ ,  $W = 4\text{mm}$ . 介质板厚度为 2.54mm, 介电常数为 10.2, 地的尺寸为  $52\text{mm} \times 52\text{mm}$ . PV-EBG 的尺寸为: 金属贴片边长 2.5mm, 金属贴片之间的缝宽 0.5mm. 该 PV-EBG 结构在 5~6.7GHz 范围内存在电磁带隙. 微带天线的谐振频率为 5.4GHz.

我们用同样尺寸的地的普通微带天线作为参照进行对比计算, 结果如图 10 所示. 从理论计算的结果看出, PV-EBG 形成的高阻表面对表面波有很好的抑制作用, 从而改善了前后比, 增大了天线增益.

## 2.2 新型悬置微带贴片 PV-EBG 天线

普通的共面加载 PV-EBG 结构, 虽然对表面波

有很好的抑制作用. 但是, 共面 PV-EBG 加载增大的天线尺寸, 不利于 PV-EBG 的实际应用. 因此, 本文提出了新型的悬置微带贴片加载 PV-EBG 结构, 该结构可以有效地减小 EBG 天线的整体尺寸. 该 PV-EBG 的尺寸为: 正方形边长为 17mm, 间距 0.5mm, PBG 板厚为 0.8mm. 天线辐射单元的尺寸为  $L = 46.5\text{mm}$ ,  $W = 52\text{mm}$ , 支撑介质的厚度为 0.8mm, 介电常数为 2.7. 我们同样采用了相同尺寸的地的普通微带天线作为参照进行对比计算. 图 12 是两个天线 E 面辐射方向图, 可以发现, 悬置贴片的 PV-EBG 结构同样可以有效的抑制微带天线的背瓣.

## 3 结论

本文提出了用于二维 EBG 结构测量和计算的悬置微带线方法, 首次将二维电小 EBG (UC-EBG 和 PV-EBG) 进行了统一的实验和仿真分析. 通过理论和实验对比, 验证了本方法的有效性; 同时和其他文献对比, 则体现了该方法的准确性和合理性. 该方法的提出对二维 EBG 的测量和应用有着较大的指导意义. 本文最后, 在设计普通共面的微带 PV-EBG 天线结构同时, 还提出了新型的悬置微带贴片的 PV-EBG 天线, 该设计有结构紧凑, 更利于 PV-EBG 的实际应用.

## REFERENCES

- [1] Yablonovitch E, Gmitter T J. Photonic band structure: the face-centered-cubic case. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, 7(9): 1792—1800
- [2] Yablonovitch E. Engineered omnidirectional external-reflectionivity spectra from a one-dimensional layered interference filters. *Opt. Lett.*, 23(21): 1648—1649
- [3] Dan Sievenpiper, Lijun Zhang, Romulo F Jimenez Broas. High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band. *IEEE Trans. MTT*, 1999, 47(11): 2059—2074
- [4] Fei-Ran Yang, Yongxi Qian. A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC-PBG) Structure and Its Applications for Microwave Circuits. *IEEE Trans. MTT*, 1999, 47(8): 1509—1514
- [5] Roberto Coccioli, Fei-Ran Yang. Aperture-Coupled Patch Antenna on UC-PBG Substrate. *IEEE Trans. MTT*, 1999, 47(11): 2123—2130
- [6] Brown E R, Parker C D. Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, 10(2): 404—407