

Abstract

With the rapid increase of the clock frequency of high-speed digital circuits, how to suppress simultaneous switching noise (SSN) has become a key technology in the high speed circuit design. Adding decoupling capacitors to create a low impedance path between power and ground planes is a typical way to suppress the SSN. However, in general, these capacitors are not effective at frequencies higher than 600MHz due to their lead inductance. According to the band gap characteristic of EBG, it provides an new way to effectively suppress SSN.

This dissertation focuses on the characteristic of EBG structure. The dissertation uses the Ansoft HFSS software which is based on the finite element method to simulate the EBG structures. Mushroom-EBG structures and the uniplanar compact EBG (UC-EBG) structures are analyzed. And then, the impact of the structure variation of the EBG on electromagnetic interference is discussed in detail.

According to simulation result of EBG structure which is mentioned above, a new kind of MS-EBG structure is presented. The numerical result shows that this structure has a relatively wide bandwidth. The center frequency of the new structure is 3.2GHz, the stopband range is 0.4GHz ~ 6GHz, and the restrain depth is -30dB. It can effectively inhibit the simultaneous switching noise which is mainly distributed below 6GHz.

**Keywords: PCB Electromagnetic Interference Electromagnetic Band Gap
Simultaneous Switching Noise**

西安电子科技大学

学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 黄小龙

日期 2010.3.16

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密的论文在解密后遵守此规定）

本学位论文属于保密在___年解密后适用本授权书。

本人签名： 黄小龙

日期 2010.3.16

导师签名： 符志敏

日期 2010.3.17

第一章 绪论

1.1 电磁带隙结构的研究背景和意义

光子晶体(Photonic Crystal)的概念,是由美国 UCLA 的 Yabnolovitch 教授在研究如何抑制自发辐射时在 1987 年提出的^[42],几乎在同时, John 在讨论光子局域时也独立提出这个概念^[43]。它是根据传统的晶体概念,类比而来在固体物理研究中发现,晶体中周期性排列的原子所产生的周期性电势对电子有一个特殊的约束作用,从而使得晶体中电子的能量本征值形成一系列的带,能带之间形成无能级的电子带隙(Electronic Bandgap),同样,在介电性质周期变化的光子晶体中,光子的运动类似于电子在周期势场中的运动特性,从而导致能量谱的离散化。在某些频率范围,所有入射方向上电磁波的所有偏振态都被禁止传播,这些被禁止的频率区间即称为“光子带隙”(Photonic BandGap),而具有“光子带隙”的材料则被称为光子晶体。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,所以这种周期性通过缩比关系扩展到了微波领域。对于频率禁带处在微波频段的光子晶体,我们将其称为微波光子晶体(Microwave Photonic Crystal: MPC)、电磁晶体(Electromagnetic crystals: EC)或电磁带隙结构(Electromagnetic Band: EBG)。

电磁带隙 (Electromagnetic Band Gap, 即 EBG)是,具有一种周期性结构,能够使某些频段的电磁波无法从中通过,存在明显的禁带特性,利用这种特性,可以抑制电路的路间耦合,提高谐振器的 Q 值,制作低通滤波器、功分器等微波器件,还可以用来抑制天线旁瓣,提高天线增益和带宽。光子带隙在光学方面的应用比如制造高质量的光镜或者显微孔隙,在设计效率很高的半导体光电发射器和滤波器上是很有用的,但是极小的尺寸使得加工难度非常高。光子晶体在微波波段的实现相对于红外和激光光子晶体结构要容易一些,于是后来的研究向较低的频率发展尤其在现在的微波、毫米波中,即本文中要介绍的 EBG 结构。这种 EBG 结构已用来改善天线的性能,增加功率放大器的效率和输出功率,宽带吸收器以及频率选择表面等。

电磁带隙结构的特性主要有:带阻、慢波、高阻抗,它具有制作简单、体积小、重量轻、便于集成等优点,在微波电路的集成性、重量及成本上都具有不可替代的优势,因而可广泛应用于微波领域。本文将重点介绍用于微波电路中的 EBG 结构。利用 EBG 结构的带阻特性,可以用于设计滤波器、功分器、定向耦合器以

及滤除功率放大器中的高次谐波,提高放大器效率等。传统的慢波系统没有进一步作为无源滤波器的使用主要因其大量的周期重复需要较大的衰减度,同时相应的会引起插入损耗的增大,再者,减少滤波器的尺寸必然会降低滤波器的性能。本文介绍的几种周期性的EBG结构克服了上述的种种缺点,尤其是平面结构的EBG单元,周期性结构完全集成在传输线本身上,尺寸可大大降低,可利用传统的加工工艺进行加工,简单方便。

目前国内外所提出的电磁带隙结构多种多样,一维和二维的电磁带隙结构由于易于实现且便于集成,因而在微波集成电路中得到了广泛的应用。电磁带隙结构的出现改变了传统的设计方法,为设计高性能、高集成度的电路提供了新的途径,带来了微波和毫米波集成电路设计思路的一次变革。将平面带隙结构的研究与各种新的集成工艺结合会使其得到更加广泛的应用,带给微波集成电路更快的发展。

1.2 电磁带隙结构的发展现状

微波频段从理论、制备到实验测试都有相当成熟的技术和仪器设备,所以EBG结构研究快速发展起来,并且不断获得新的成果。

1946年 Brillouin 提出一维周期结构可以用作带阻和带通滤波器的概念。

1987年 Yablonovitch 教授首先构造了世界上第一个三维的周期性EBG结构,该周期性结构可以在所有方向呈现带隙特性。无论来波是从什么方向入射,某些频率的波在该结构中完全被禁止传播,它们因为满足布拉格条件而被反射回去。

1990年美国爱荷华州立大学的 Soujoulis 在他的文章中预测呈菱形排列的球面晶格介质嵌入在空气中,或者介质中蚀刻球状空气腔,在某个条件下将具有完全的带隙。Yablonovitch 据此修改了他先前的设计,来近似菱形结构。如图 1.1 所示,该结构沿菱形的三个轴线开洞,介质材料为介电常数为 13 的树脂玻璃,相邻的圆孔的中心间隔为 1cm,圆孔半径为 0.234cm,这种尺寸的EBG结构工作在 14GHz,阻带带宽 3GHz。该结构被称为关于EBG的经典文献中最重要的范例之一,只需要 8 个周期,大约 8cm 大小,即可提供 50dB 的带内衰减^[9]。

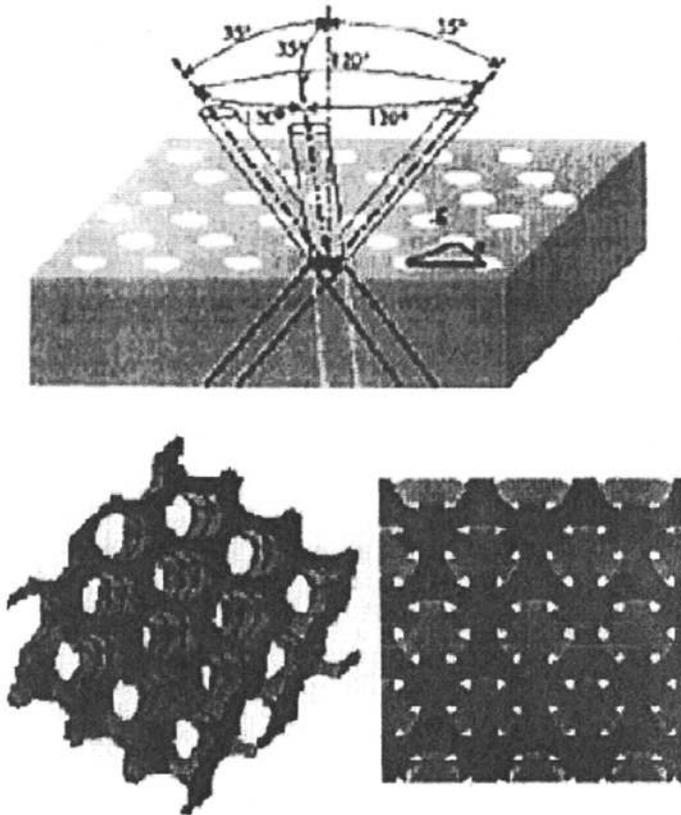


图1.1 Yablonovitch的PBG结构三维视图

和其他 EBG 晶体一样, Yablonovitch 的 EBG 结构的特性可以从理论上通过解 Maxwell 方程获得。如果没有外部激励源, 由麦克斯韦方程可以得到磁场满足的方程:

$$\left[\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \right] \times \vec{H}(\vec{r}) = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{H}(\vec{r}) \quad (1-1)$$

其中, c 是光速, $\vec{H}(\vec{r})$ 是磁场矢量, ω 是角频率。如果 $\varepsilon(\vec{r})$ 是完全周期性的, 该方程的解可以用波向量 \vec{k} 和频段索引 n 来表征。所有允带波向量集合叫做 Brillouin 区域, 所有解的集合被称作带结构 (Band Structure), 图 1.2 所示为上述结构六个最低段的带结构图, 阴影区域就是完全光子带隙。

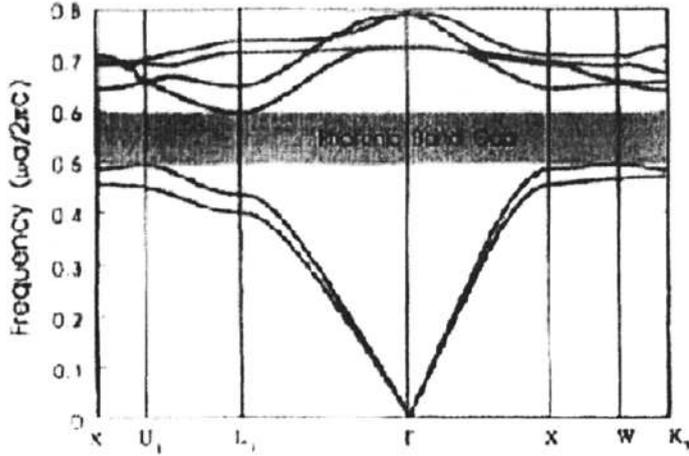
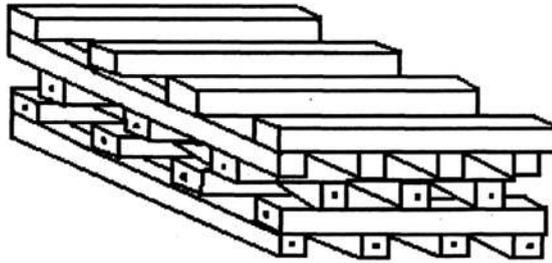


图1.2 Yablonovitch PBG结构的光子带隙

1994年, Joseph W.Haus 提出了简单立方晶格形式的EBG结构的理论计算方法,这个方法可以得出电磁波的显著色散关系。同年, J.B.Pendry 详细描述了对复杂结构EBG的色散关系的数值计算,并计算了传输系数和反射系数。H.S.Sozuer提出了一种新颖的三维EBG结构,即woodpile柴堆型结构,如图1.3所示。它类似于金刚石结构,利用层层叠加把一维结构层层堆积得到三维结构,从而具有三维带阻。这种结构在第三四能带之间能产生宽而完全的光子带隙。实验发现两层的woodpile结构带阻较小,建议采用两层以上结构。



柴堆型 EBG结构

图1.3 柴堆型EBG结构示意图

在微波领域,EBG结构通常采用在介质基片上打孔的方式制作,其典型结构如图1.4所示。

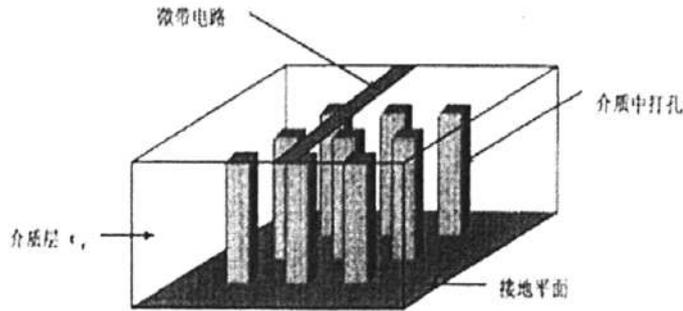


图1.4 三维EBG结构示意图

将这种结构用于微波电路和微带天线的设计，可以利用带隙的特性提高谐振腔的 Q 值，增加功放的输出功率和效率，提高天线增益和方向性系数等许多功能。例如，在 EBG 结构基片上做成的平面蝶形天线，可以完全消除背瓣，得到很好的性能。

1998 年，Yongxi Qian 提出一种新的 EBG 结构形式^[30]，不需要在介质基片上打孔，仅在微带电路的接地平面上光刻出周期阵列小孔，就可以实现带隙特性，这个发现使得应用 EBG 结构在工艺上取得了突破，使其更加实用。图 1.5 给出了这种结构的典型形式，他不需增加额外的电路尺寸，也不用进行复杂加工，只需要把普通微波电路的接地平面加以变化，因此使得 EBG 结构极易应用于微带电路。

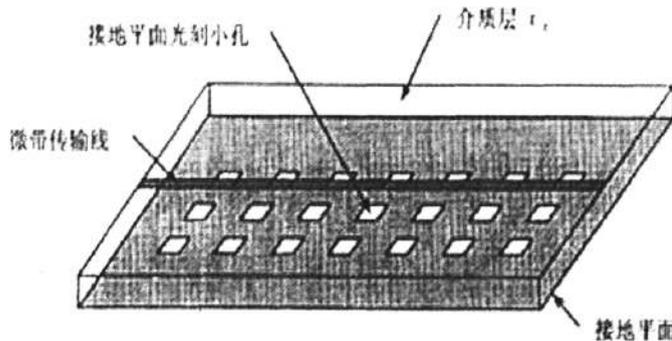


图 1.5 蚀刻底板的 EBG 结构三维视图

1999 年 UCLA 的 D.Sievenpiper 和 E.Yablonovitch 提出一种谐振型 EBG 结构即 mushroom (蘑菇) 形 EBG 结构^[32]，现也被称为高阻抗磁表面 (High Impedance Surface)^[35]，如图 1.6 所示，并成功的应用于微带天线，同样可以抑制天线的表面波，改善天线性能。重要的是这种 EBG 结构是和集成电路工艺相融合的，因此它的制备加工就变得相当容易。也正因为这方面的优点，这种 EBG 结构一经提出，就受到各国科研工作者的广泛关注。

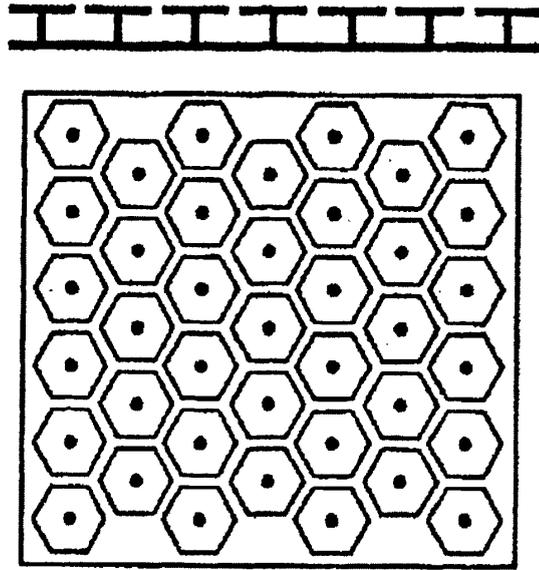


图 1.6 mushroom-EBG (蘑菇状) 结构的侧面图和俯视图

随后, UCLA 的 Yongxi Qian 和 T.Itoh 提出了另外一种谐振型 EBG 结构即共面紧凑型光子晶体 (Uniplanar Compact Photonic Bandgap: UC-PBG) [33]。这种结构与上述高阻抗电磁表面的不同之处在于它不存在导电过孔, 只是其印制金属贴片的形状与前者相比要复杂些, 如图 1.7 所示。它正是利用金属贴片的这种复杂性提供电感和电容, 来构成并联的 LC 谐振电路。由于这种结构不必打孔, 加工工艺更为简单, 现已得到广泛的应用。

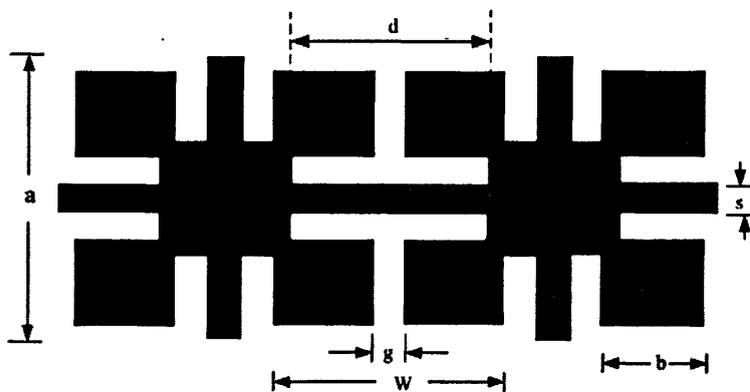


图 1.7 UC-EBG 结构的俯视图

2004 年 GIT 的 Jinwoo Choi 和 Vinu Govind 等提出了一种新型的电磁带隙结构 (AI-EBG) [18], 如图 1.8 所示, 其形成原理和 UC-EBG 是不同的, 它是基于滤波

器的理论形成的电磁带隙结构,也可以叫阶跃阻抗 EBG 或者叫可变阻抗 EBG,它是有一个高阻抗和一个低阻抗级联起来形成的滤波器,阻抗的波动,导致电磁波在某个禁带禁止传播,从而形成阻带,可以用滤波理论去解释其形成的原理。迄今为止,新的理论和观点还在不断的涌现。

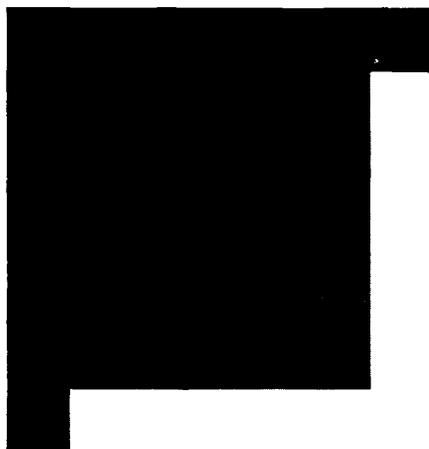


图 1.8 AI-EBG 单元结构图

1.3 研究目标和工作安排

随着高速数字电路和高集成度芯片技术的飞速发展,电路中的电源完整性和电磁兼容性问题日益严重。这些问题的出现给系统硬件设计带来了更大的挑战,高速 PCB 的信号完整性、电源完整性和电磁兼容性设计已经成为系统设计能否成功的主要因素。由于 EBG 结构具有高阻抗特点,在谐振频率范围内,阻止表面波的传播,形成特定的频率带隙,考虑将其应用于抑制电磁干扰、提高系统电磁兼容性的方向成为了可能。

随着 EBG 结构的研究越来越深入,如何实现 EBG 结构的小型化和有效地展宽 EBG 结构的带隙带宽,是目前 EBG 结构研究领域内的重要的研究内容,这也是本论文研究的主要内容。本文主要针对目前微波集成电路中集成化和小型化的要求,比较深入地研究了几种类型的电磁带隙结构的带阻特性,然后介绍了一种新型的 EBG 结构,并且对它进行了建模和详细的分析。

第一章主要介绍了课题的背景和意义,以及 EBG 结构的起源,回顾了电磁带隙材料的发展简史。

第二章简要的介绍了电磁带隙材料的分类和应用。

在第三章、第四章分析了两种适合于平面电路集成化,主要用于微带电路中

的电磁带隙结构，一种是位于金属接地面上方的单层的高阻抗表面（mushroom-EBG 结构）；第二种是共面紧凑 EBG 结构。从得到的散射参数中可以发现这两种 EBG 单元都表现出显著的慢波特性和阻带特性，对产生的电磁干扰进行了有效地抑制；并且除了具有减少尺寸和能抑制不需要的频率之外还具有易于加工的优点。仿真实验中，首先对仿真模型的经典结构进行了详细的描述，同时分别对每一类型的改进结构进行了对比仿真，然后对仿真结果进行比对分析，最终详细讨论了各种共面 EBG 结构对抑制电磁干扰效果的影响。

第五章 在传统的 AI-EBG 结构基础上提出一种新型的 MS-EBG 结构，并对其进行详尽的仿真分析，最后得出新型 EBG 结构的阻带范围为 0.4 GHz~6 GHz，抑制深度为-30dB，能够有效地抑制 6 GHz 以下的同步开关噪声。

第二章 电磁带隙结构概述

2.1 引言

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。后来这种周期性通过缩比关系扩展到微波领域,加工上的难题不复存在。对于频率禁带处在微波频段的光子晶体,我们将其称为微波光子晶体(Microwave Photonic Crystal: MPC)、电磁晶体(Electromagnetic crystals: EC)或电磁带隙结构(Electromagnetic Band: EBG)。微波领域从理论分析、制备到实验测试都有了相当成熟的技术和仪器设备,所以电磁带隙结构在微波波段的研究快速开展起来,不断获得新的成果,电磁带隙结构相关理论及应用的研究已经成了一个重要的研究方向。电磁带隙在微波波段的研究设计滤波器、混合器、谐振器、高效放大器、低损慢波线、谐波抑制器、高性能微波天线、相控阵天线等,覆盖范围非常广泛。

2.2 电磁带隙结构的分类

EBG 结构是具有带阻特性的周期性结构,可以采用金属、介质、铁磁或铁电物质植入基质材料,或者直接由各种材料周期性排列而成。早期的 EBG 结构主要是三维结构,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。

在随后的十几年里,EBG 结构的研究一直是学术界的热点研究课题。EBG 结构根据其不同特点和性能,可分为很多种类,主要分类方法有:按传输线的不同类型分为微带线上、共面线上、槽线上、共面波导上等的电磁带隙结构;按周期性结构的空维数分为一维、二维、三维结构;按周期的形状分为立方形、三角形、面心形、体心形、和钻石形等;按媒质材料分为介质、金属、及金属-介质混合体等;按材料的性质分为各向同性、各向异性、旋波(chiral)媒质、及双各向异性等;按周期单元的结构实现分为接地板蚀孔 PBG 结构(用于微波电路)、及基片上钻孔、介质或金属杆排列(用于天线中)等。尽管 EBG 结构的种类及形式繁多,但其共同基本原理都能有效地抑制阻带范围内的电磁波,借以提高电路元件或天线的性能。

目前国内外提出的 EBG 结构多种多样,比如在介质基板中穿孔,或在介质基板中填充其他材料或金属,在微带电路表面环绕冗余部分形成 EBG 结构,而后一

种类型更适合于集成化的要求。

EBG 结构根据其维数可以分为一维，二维和三维结构，根据其结构特性主要有接地板缺陷型（DGS, Defected Ground Structure），基底打孔型，高阻抗表面型，共面紧凑式（UC, uniplannar compact）EBG 结构四种。现在的研究主要集中在二维和一维结构的 EBG，一维结构主要用于带阻滤波的设计上，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。

综上所述，EBG 结构可以按以下几个方面分类：

1. 按照 EBG 结构的实现和制作方法可以分为：
 - 1) 介质层打孔
 - 2) 掺杂介质层
 - 3) 刻蚀微带线介质衬底的接地板
 - 4) 刻蚀共面结构的接地面或者导带
 - 5) 刻蚀微带传输线接地面或者导带
2. 按照 EBG 结构的周期性可以分为：
 - 1) 周期性结构
 - a) 离散的周期性结构
 - b) 连续的周期性结构
 - 2) 组合型结构
 - a) 串联结构
 - b) 并联结构
3. 按照 EBG 结构中周期单元的分布方向可以分为：
 - 1) 一维结构
 - 2) 二维结构
 - 3) 三维结构

2.3 电磁带隙结构的应用

近年来，随着人们对 EBG 结构的理论及工程应用范围的进一步发展和拓宽，EBG 结构已广泛地应用于微波工程领域。目前根据 EBG 结构的特性将其工程应用可归纳为以下几类：

- (1) 滤波器，定向耦合器，功分器等
- (2) 高 Q 谐振器，宽带放大器，频率选择表面等
- (3) 微带天线，单面天线，天线反射器等

可以主要归纳为电路应用(电磁内问题)和天线应用(电磁外问题)两个方面。

电磁带隙结构的特性主要有：带阻，慢波，高阻抗。利用 EBG 的带阻特性，可以用于设计滤波器，定向耦合器，功分器，宽带谐波调节以及功放中滤除高次谐波，提高放大器效率；利用单元电磁带隙结构作为振荡器中的谐振腔，减少振荡器的相位噪声；利用带阻特性，用于贴片天线中的谐波控制，或者利用高阻抗表面改善天线辐射性能；利用结构周期性被破坏时能量在缺陷中的震荡，实现二维 EBG 结构谐振腔；利用 EBG 结构的慢波传输特性，可以减少微波电路和天线的尺寸；利用电磁带隙结构在阻带内构造磁导体(PMC)表面，并用于波导结构侧壁，构成 TEM 波导；在带状线结构中，为了减少平行板模式下的漏波现象通常用短路端口来解决，但却增加电路的复杂性，并影响到匹配性质，使用电磁带隙结构可以达到抑制漏波能量的作用。

2.3.1 微波电路中的应用

普通的微带线加了电磁带隙结构后在不同的频率范围内可作为低通、带通、带阻、高通滤波器。EBG 微带线的种类较多，但归纳起来无非三种形成方式，即分别在金属导带、金属接地板和介质基板上挖周期性的孔来实现，由于在介质板上挖孔相对较难，且带阻特性的效果不好和不便于微波电路的集成，所以目前形成 EBG 结构通常是分别在金属导带和金属接地板上形成周期结构。影响 EBG 微带线带阻特性的参数有：介电常数、周期、孔的尺寸和周期的比值、周期单元的数目、周期单元的形状、介质板的高度和导带的宽度。早期的常规 EBG 微带线是在接地板上挖圆孔或方孔和在导带上挖方孔，对于在接地板上挖圆孔的情况，孔的直径和周期的比值较大时，带阻特性较明显，但通带的波纹也较大；比值较小时，带阻特性不太明显，此时通带的波纹也较小，比值的优化值是 0.5。由于传输的电磁波局限在金属导带附近，所以一维的 EBG 结构就可以产生明显的带阻特性。随着对 EBG 微带线研究的深入，周期单元的形状有了一定的变化，在接地板和导带上蚀刻较复杂形状的周期单元，可以形成带阻特性和慢波结构，单元中的金属连接带等效为电感 L ，空气空隙等效为电容 C ，通过改变金属连接带和空气空隙的形状和尺寸相当于改变电感 L 和电容 C ，从而改变传播常数 β 。单平面紧凑型光子带隙结构 (Uniplanar Compact Photonic Band-Gap, UC-PBG) 可以实现慢波相移和延迟线的特性。紧凑型光子带隙结构的单元形状较复杂，每个单元有金属连接带，相当于电感 L ；单元之间有介质空隙，相当于电容 C ，通过改变金属连接带和介质空隙的形状和尺寸相当于改变电感 L 和电容 C ，从而改变慢波效应，相对于典型的慢波结构，这是一个显著的优点，UC-PBG 更适合于高频的情况，除了上述提到的两点，UC-PBG 还具有单元结构紧凑、阻带宽、插入损耗低以及能实

现完善“磁导体”(PMC)阻抗表面等优点^[19]。

由于EBG结构具有很好的带阻特性,所以利用EBG结构可以实现性能良好的带阻滤波器。将具有不同阻带中心频率的EBG结构串联^[36]或者并联^[27]起来,利用EBG的宽阻带特性,就可以实现宽阻带的低通或带阻滤波器。传统的平行耦合带通以及其它一些类型的滤波器在谐波频段会有通带产生,这样会影响带通滤波器的整体性能。如果在滤波器中采用EBG结构,它的宽阻带特性可以很好地抑制带通滤波器高次谐波频段上的通带。而且由于EBG结构可以和带通滤波器集成,并不会增加电路的尺寸。利用EBG结构还能实现谐振器的特性。在两组周期性的EBG结构之间添加一段传输线,利用EBG结构的反射作用,就形成了谐振腔。这些传输线可以是微带线^[31],共面波导^[26]等。这些谐振器都有较高的Q值。调整微带线的长度就可以改变谐振点的位置。不仅如此,EBG结构也可以应用在其它的谐振结构中改善它们的特性。例如在镜像波导谐振器中,通过引入一段EBG谐振结构,就可以很好地提高整个电路的Q值^[37]。对于介质谐振腔,EBG结构同样能提高他们的性能。在文献^[28]中,作者在Whispering Gallery(WG)模式的介质谐振器中利用EBG的阻波特性来抑制谐振点频率附近的其它模式,改善了WG模式介质谐振器所具有的高Q值。

双工器在双工无线通信系统里是一个很重要的元件,它是一种让发射和接收可以共享一个天线,而上行和下行工作在不同的频率范围的无源器件。要求双工器能使两路RF信号之间的互相干扰最小,而不降低发信和接收机与天线的传播信号质量。双工器通常由两组滤波器构成,根据所用滤波器的类型可以有不同的形式。大部分情况使用两个带通滤波器,因为这种结构对抑制带外噪声有益;也有一路使用带通,另一路使用低通滤波器的结构;也有两路都使用带阻结构。利用EBG结构的阻波特性,可以设计高隔离度的双工天线,更好地抑制Tx信号,而接收Rx信号,提高Tx和Rx信道间的隔离度^[24]。这样一来,双工天线可以在不同的频段接收和发送信号。

根据EBG结构的带阻特性,我们可以方便地利用它来抑制功率放大器输出端的高次谐波。EBG结构的阻带带宽比一般使用短接线实现的阻带要宽很多,而且设计制造都比较简单,可以很容易地和功率放大器结合起来提高功放的输出特性,与此同时,EBG结构还可以和其它功率放大器中的线性化技术如前馈综合起来,进一步完善功率放大器的线性特性,提高效率。

2.3.2 天线设计中的应用

由于EBG结构的带阻和慢波特性和,它可以方便地应用在各种微波天线中来设计高性能的天线系统。首先可以利用EBG结构的带阻特性来抑制天线中存在的表

面波。表面波的传播是微带天线中的一个重要问题，由于表面波消耗了一部分能量，因此就会降低天线的效率和增益，同时也限制了天线的带宽，增加了后向辐射和交叉极化。

在天线中利用 EBG 结构，表面波就不能在介质中传播，表面波消耗的能量就耦合到空间波中，而且其它的表面波藕合效应也就不存在了。从天线 E 面和 H 面的模式图可以看出天线的后向辐射大大降低，前向辐射的波纹也更小。沿介质层的辐射有很大的减小，天线增益也得到提高。抑制天线表面波可以把 EBG 结构布置在天线贴片的周围。同样，为了减小天线尺寸，可以将天线构造在 EBG 结构形成的衬底上，此外 EBG 结构还可以抑制天线在谐波频率上的辐射^[34]。使用 EBG 结构，不仅使天线基频的带宽变大，而且天线的方向性变得更好，效率也得到了很大的提高。某些特殊的 EBG 结构还有慢波效应^[38]。应用 EBG 结构的慢波效应，就可以设计出更小尺寸的微波电路结构。在天线中，为了减小天线的尺寸可以采用改变贴片尺寸和使用高介电常数衬底的方法，但是这些方法会大大影响天线的效率和增益。在文献^[29]中，作者把具有慢波效应的 EBG 结构应用在天线中，在减小天线尺寸的同时，保持了很好的天线的辐射特性和高效率。EBG 结构还可以作为反射器，用在螺旋天线中来提高定向增益，增加带宽，降低反向辐射，并且抑制表面波在槽天线，它不仅抑制表面波和漏波现象，而且还可以等效为一种理想磁导体(PMC)来减小天线的尺寸。

2.3.3 其他应用

随着电子对抗的不断升级，现代雷达工作的电磁环境日趋复杂，为了确保系统能够稳定的工作，获得军事上的优势，改善系统的电磁兼容性能变得十分重要，而采用频率选择表面(FSS: Frequency Selective Surface)就是有效的方法之一。在系统表面制作一层具有电磁窗的材料构成频率选择表面，可以屏蔽某一频带的电磁波，系统内部对这些频率成分的要求就会显著降低，从而降低系统的复杂度，减少开发和生产成本。而 EBG 结构的提出为频率选择表面的应用提供了更广阔的前景。由于 EBG 结构本身就具有频率选择特性，所以应用于频率选择表面只需设计合理的 EBG 结构就能达到目的。就目前对 EBG 结构的研究表明加工简单、体积小、重量轻、成本低的 EBG 结构材料已经可以实现，如果加以共形技术的应用，EBG 结构材料构成的频率选择表面将成为电子对抗的有力武器之一^[40]。

当电磁带隙结构具有点缺陷时，电磁波将被束缚在缺陷点处而形成谐振腔。利用电磁带隙结构的缺陷态做成的谐振腔可以克服金属材料对电磁波的吸收损耗所带来的谐振腔 Q 值的降低，从而做成具有更高 Q 值的谐振腔。

在光领域，高效率发光二极管是电磁带隙结构(光子晶体)的典型应用之一。

发光二极管发出的光一般是发光体发出的光由其周围的介质多次反射折射而发出的，这样介质会吸收掉很多光能，转化成热能，使二极管的效率降低。将电磁带隙结构材料用在发光体的某些方向上，利用它的无耗反射特性，可以极大地改善二极管的效率，制成高效率发光二极管。采用电磁带隙结构可将发光二极管的效率由 10% 提高到 90%。

除此之外，电磁带隙结构还可以用来制作光子晶体放大器、频率稳定器、光聚焦器等。总之，电磁带隙结构材料在很多领域都有应用价值，是现代新型材料的一种，并且这一概念已推广到了声波领域，随着研究的深入和拓展，它将在更广泛的领域内得到应用和发展。

第三章 改进型 mushroom-EBG 结构

3.1 引言

在微波电路和微带天线方面, 为了达到抑制表面波, 减小各微波集成电路组件之间互耦以及提高天线性能、消除天线阵的扫描盲点等, 以微带基片作为载体的各种 EBG 结构为重点研究对象之一。微带基片是一种平面分层结构, 现提出的以微带基片为载体的多种 EBG 结构中, 除在介质层穿孔形成的介质型 EBG, 以及高阻抗电磁表面等类型外, 在微带基片上周期加载金属贴片的贴片型 EBG, 以及共面紧凑型 UC-EBG 等, 都完全视为一种平面分层结构, 现被统称为平面型 EBG, 该类型 EBG 由于具有易制作、成本低、易集成等优点而得到普遍关注。

3.2 结构描述

目前提出的微波频段的光子带隙结构有很多种。由于一维和二维的平面带隙结构易于实现, 而且便于集成, 因此在微波毫米波领域得到了广泛的应用。二维 EBG 结构主要有两种形式, 一种是共面紧凑型 EBG (UC-EBG) 结构, 另外一种 PV-EBG (pad via) 结构。mushroom-EBG 结构是 PV-EBG 结构中比较典型的一个结构。该结构的电介质上表面周期性地分布着正方形金属贴片, 金属贴片之间有窄缝相隔。每个金属通过一个金属导体柱与电介质下表面的金属底板相连接, 其结构如图 3.1 所示。

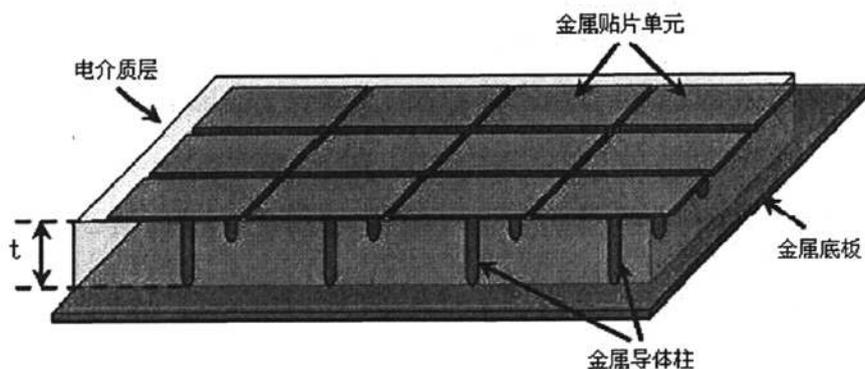


图 3.1 mushroom 结构立体图

由于 mushroom-EBG 结构周期的周期比波长小很多, 所以我们可以用集总参

数波阻抗 Z 来分析它。当电磁波入射到 EBG 结构中时, 金属表面会产生感应电流。电流从一个金属贴片经过通孔和地面流到另一个金属贴片时形成电感, 电荷在金属贴片缝的边缘以及贴片和地面之间积累形成电容。所以该 EBG 结构可等效为二维的平面电容电感网络, 如图 3.2 所示,

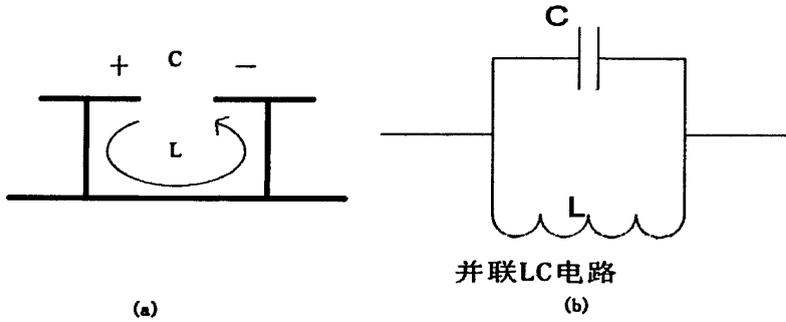


图 3.2 (a) EBG 高阻抗表面图 (b) LC 等效电路图

其等效电容和电感可分别用式 (3-1) 和式 (3-2) 表示:

$$C = \frac{w(\epsilon_0 + \epsilon_1)}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{2w+g}{g} \right) \quad (3-1)$$

$$L = \mu h \quad (3-2)$$

其中 C 是等效电容, L 是等效电感, w 是 mushroom-EBG 正方形金属贴片的边长, g 是正方形金属贴片的间隔大小, ϵ_1 是介质板的介电常数, h 是介质基板的厚度。通过分析上式可以发现, 贴片边缘的长度 w 和缝隙 g 实际上决定了单元等效

电容的大小, 介质的厚度 h 和过孔的直径 d 决定了单元等效电感的大小。

当电磁波的频率等于该电感电容的网络频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 时, Z 趋于无穷大, 形成了高阻抗平面, 此时介质和空气的交界面上的表面波不能沿介质表面传播。通过以上的分析可知, EBG 的工作原理可以由 LC 滤波网络来描述。落在谐振频率内的电磁波将会被高阻表面阻挡而不能传播。因此通过改变等效回路的电容或者电感, 都能导致回路谐振频率的降低, 从而起到减小 EBG 尺寸的作用。

由于带隙中心频率及带宽由下式决定:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (3-3)$$

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\eta} \sqrt{L/C} \quad (3-4)$$

从式 (3-3) 式可以看出, 为了获得紧凑的 EBG 机构, 应该利用各种方法增大单元等效电感和电容, 以降低带隙的中心频率。这也就意味着, 在相同的带隙中心频率下, 具有较大单元等效电感和电容的结构就具有较小的周期和结构尺寸。但从式 (3-4) 式有看出, 带隙宽度与单元等效电容的平方根成反比, 与单元等效电感平方根成正比, 增大电容降低带隙的中心频率的同时会使得带隙宽度变小, 而增大电感降低带隙的中心频率的同时使带隙宽度变大。因此, 最理想的当然是降低中心频率又有较大的带宽, 增大等效电感就成为最好的选择。

本章主要介绍了两种不同形式的增大等效电感的 mushroom-EBG 的改进结构, 图 3.3(a) 是增大等效电感的 Spiral-like EBG 结构, 在表面顶层金属贴片上镂空了螺旋状枝节, 形成共面螺旋电感来增加等效电感, 螺旋状改进结构就是在经典结构的基础上进一步提高了连接枝条的长度, 增大了单元等效电感值, 与过孔电流产生的等效电感相结合, 增加了结构的感性负载使其谐振频率向低端移动。另一种是通过加载缝隙的 S-like EBG 结构, 通过在传统正方形贴片的基础上开槽, 开槽的作用是改变表面电流的流向, 间接增长了贴片的电长度, 从而可以增加单元等效电感值, 降低单元的谐振频率, 获得低频的带隙, 如图 3.3(b) 所示。第 3 节对上述结构的带隙特性做了具体分析。

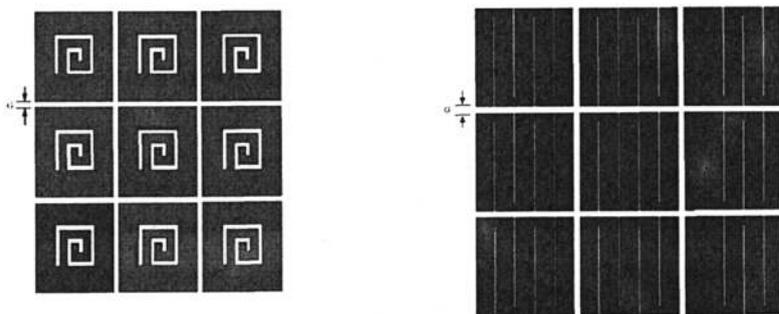


图 3.3 (a) Spiral-like EBG 结构平面图

(b) S-like EBG 结构平面图

作为本文研究的基础, 对 mushroom-EBG 结构按等效电路模型进行初始化设计, 再应用基于有限元法的 HFSS 软件进行验证。设定 mushroom-EBG 结构参数为: 贴片的单元边长为 w , 单元周期为 B , 单元间的缝隙为 G , 金属过孔的直径为 d , 基板材料的厚度为 t , 介电常数为 ϵ_r 。

测试的 EBG 平面对外围的尺寸大小为 $L \times L$, 其中 $L=20\text{mm}$, 板间填充介质为 Duroid(tm), 其介电常数 ϵ_r 为 2.2, 插值损耗为 0.0009。EBG 结构为 3×3 正方形阵列其参数为 $w=6\text{mm}$, $G=0.4\text{mm}$, $t=1\text{mm}$ 。EBG 结构的短导体柱为直径 0.2mm 的通孔, 其导体介质上面与阵列方块相连, 下面与底板相相连。

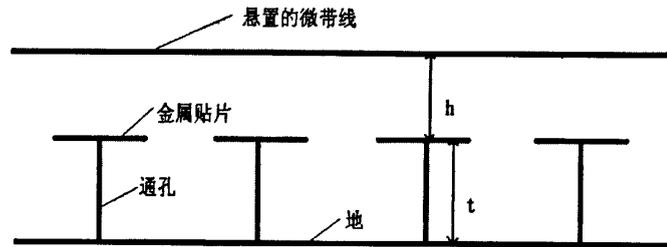


图 3.4 采用悬置微带法测量 mushroom-EBG 结构的侧视图

本文用 Ansoft HFSS 软件采取悬置微带线的方法对 EBG 结构的带隙特性进行测量, 如图 3.4 所示。测量的结构放在微带线与地面之间, 形成“三明治”结构。悬置微带线两边用 SMA 接头连接测量参数。与共面微带线和单极子方法比较, 悬置微带线是一种强耦合结构, 减小了其他寄生传播模式的影响, 能够更加清楚的显示 EBG 结构的带隙特性。微带线与 EBG 结构之间的距离是 $h=0.1\text{mm}$, 支撑介质的相对介电常数是 2.2, 微带线对应于 50Ω 阻抗线的线宽 $L=0.6\text{mm}$ 。

3.3 对比分析

由于 mushroom-EBG 结构表面紧凑, 其单元尺寸远小于工作波长, 所以它的电磁特性可以用 LC 并联电路来等效。改进的 Spiral-like EBG 结构和 S-like EBG 结构中, 单元等效电容来自相邻贴片之间的缝隙电容, 单元等效电感来自于流过中心过孔电流和流过贴片表面的电流。所以其结构形式必然对带隙的特性有影响。其抑制带隙的中心频率以及带隙宽度与电介质的厚度、电介质的介电常数 ϵ_r 、正方形金属贴片的尺寸、金属导体柱的半径等 EBG 结构的参数有着密切的关系。本文将主要分析讨论 Spiral-like EBG 结构和 S-like EBG 结构对带隙特性的影响。

3.3.1 Spiral-like EBG 结构

Mushroom-EBG 结构中的电感主要来自于顶层金属贴片通过金属过孔与接地面之间的电流。由于在实际应用中, 金属过孔的直径 d 受加工技术的限制, 通过改变 d 的大小来改变 EBG 结构中电感 L 没有太大的实际意义。所以, 在应用中主要是通过加大金属贴片与接地面之间电流的路径来增大 EBG 结构的电感 L , 图 3.5 是一种具有螺旋电感的 EBG 结构^[17]。

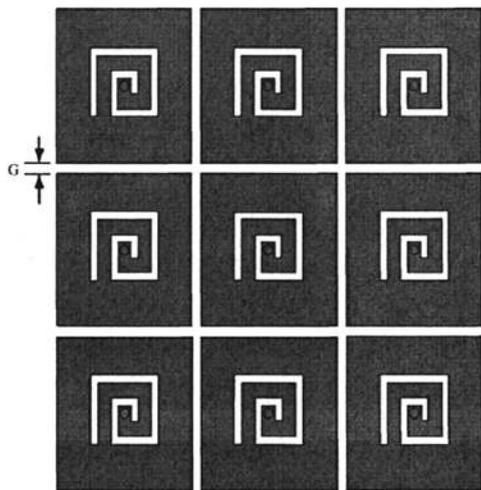


图 3.5 Spiral-like EBG 结构俯视图

在 mushroom-EBG 结构中，等效电感 L 主要由电流在金属贴片之间流动而引起，电流的等效路径越长则等效电感就会越大。因此，如果能够设法增加电流回路，就能增大等效电感。在金属贴片的表面引入螺旋电感就能增加电流的回路，也就增加了 EBG 结构的等效电路模型中的等效电感。

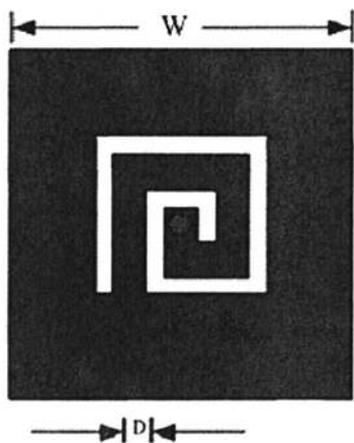


图 3.6 新型螺旋电感 EBG 单元结构图

如上图 3.6 所示,在金属贴片上蚀刻了一些螺旋状矩形的槽,从而就形成了一个平面螺旋电感。该平面螺旋电感的引入,在一定程度上增加了贴片单元的等效电感,我们注意到,单元贴片由于开槽导致其电流的回路面积减少,因而将会导致等效电容的减小,但是一般来讲,平面螺旋结构所引入的等效电感量在一定程度上弥补了电容减小带来的负面效应,因此从整体上来看,等效电感 L 和等效电容 C 的乘积 LC 在增加。此外,平面螺旋结构的自由度较多,可以通过改变螺旋线的宽度和匝数来调节等效电感,这样就使得灵活调节带隙特性成为可能。这对于在 EBG 结构中,通过调节螺旋电感的尺寸来调节 EBG 结构的带隙特性的方法是有重要价值的。在 mushroom-EBG 结构中,带隙特性由等效电感和等效电容所决定。因此,调节螺旋电感的尺寸就能调节表面螺旋电感的值,进而调节整个电路的等效电感,最终调节带隙特性。

为了验证加入螺旋电感后对带隙特性的影响,对经典 mushroom-EBG 结构和改进的 Spiral-like EBG 结构进行了对比仿真。仿真参数设置如下:金属贴片的边长均为 $W=6\text{mm}$,贴片间距分别为 0.4mm ,过孔半径均为 0.2mm ,介质板的相对介电常数均为 2.2 ,介质的厚度均为 1mm ,阵列大小均为 3×3 ;其中螺旋的宽度 $D=0.6\text{mm}$;在 Ansoft HFSS 软件中用悬置微带测量法进行仿真,仿真结果如图 3.7 和图 3.8 所示。

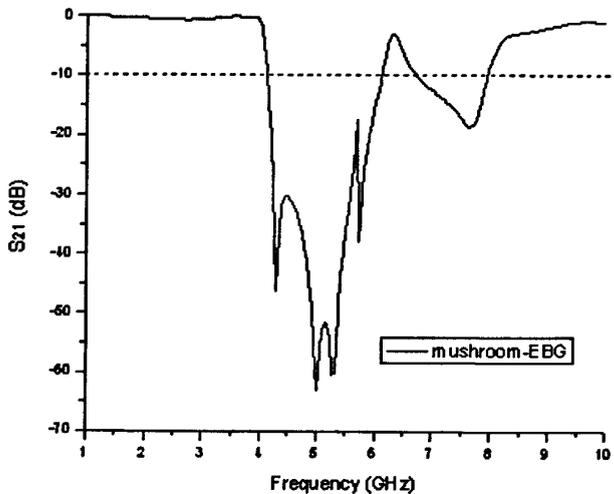


图 3.7 mushroom-EBG 结构带隙特性图

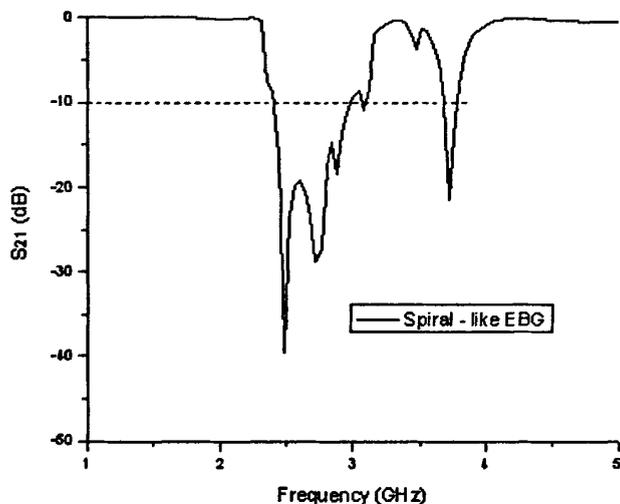


图 3.8 螺旋电感 EBG 结构带隙特性图

表 3.1 两种 EBG 结构带隙特性参数对比

EBG 结构/带隙特性	中心频率/GHz	阻带范围/GHz	带宽/GHz
mushroom-EBG	5.1 GHz	4.1 GHz~6.1 GHz	2 GHz
Spiral-like EBG	2.7 GHz	2.4 GHz~3 GHz	0.6 GHz

从图 3.7 中我们可以看到, mushroom-EBG 结构的中心频率为 5GHz 的带宽内有明显的阻带,抑制深度为-10dB 频率范围为 4.1 GHz~6.1 GHz;对于改进型螺旋 EBG 结构,如图 3.8 中心频率为 2.7 GHz 的带宽内有明显的阻带,抑制深度为-10dB 频率范围为 2.4 GHz~3 GHz。可以看出,螺旋电感的引入能使 EBG 结构的谐振频率降低,从而实现 EBG 结构的小型化。

3.3.2 S-like EBG 结构

Mushroom-EBG 结构中的等效电感 L 主要由电流在金属贴片之间流动而引起,电流的等效路径越长则等效电感就会越大。因此,如果能够设法增加电流回路,就能增大等效电感。在金属贴片的表面引入开槽,通过改变表面电流的流向,从而增加电流的回路,也就是增加了 EBG 结构的等效电路模型中的等效电感,相应的等效电感有了大幅度提高。图 3.9 是一种开槽结构的 EBG 结构。

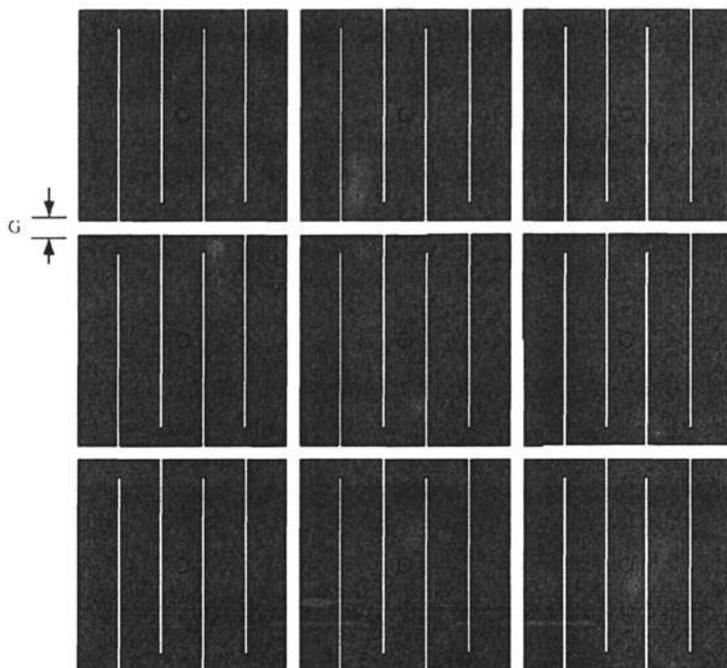


图 3.9 S-like EBG 结构俯视图

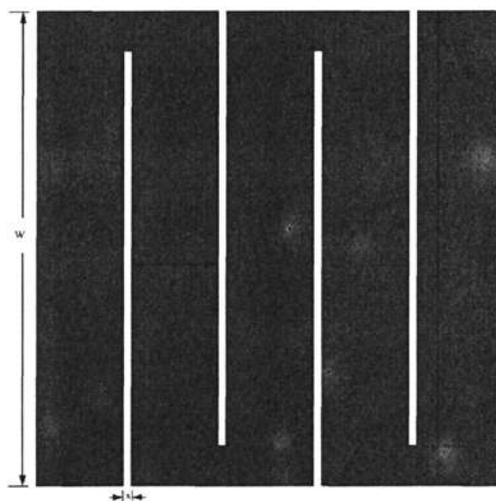


图 3.10 新型开槽 S-like EBG 结构单元图

如上图 3.10 所示，在金属贴片上开槽，形成缝隙，从而改变了表面电流的流向，间接的增长了贴片的电长度。但是，我们注意到，单元贴片的结构变得稍微复杂了，而且由于开槽导致其电流的回路面积减少，因而将会导致等效电容的减

小,从而导致中心频率升高,但是从某种程度上来说,电感的增加抵消了电容减小对频率的影响,保持了一定的中心频率,从而一定程度上弥补了电容减小带来的负面效应。因此从整体上来看,等效电感 L 和等效电容 C 的乘积 LC 在增加,从而降低阻带中心频率,扩展了带宽,起到微化 EBG 的作用。此外,开槽的长度和宽度可以自由的调节,还可以通过改变槽的长度和宽度来调节等效电感,这样就使得灵活调节带隙特性成为可能。

为了验证加入 S-like 对带隙特性的影响,对经典型 mushroom-EBG 结构和改进的 S-like EBG 结构进行了对比仿真。仿真参数设置如下:金属贴片的边长均为 6mm,贴片间距分别为 0.4mm,过孔半径均为 0.2mm,介质板的相对介电常数均为 2.2,介质的厚度均为 1mm,阵列大小均为 3×3 ;其中 $S=0.1\text{mm}$, $L=5.5\text{mm}$, $d=1.12\text{mm}$;在 Ansoft HFSS 软件中用悬置微带测量法进行仿真,仿真结果如图 3.11 和图 3.12 所示。

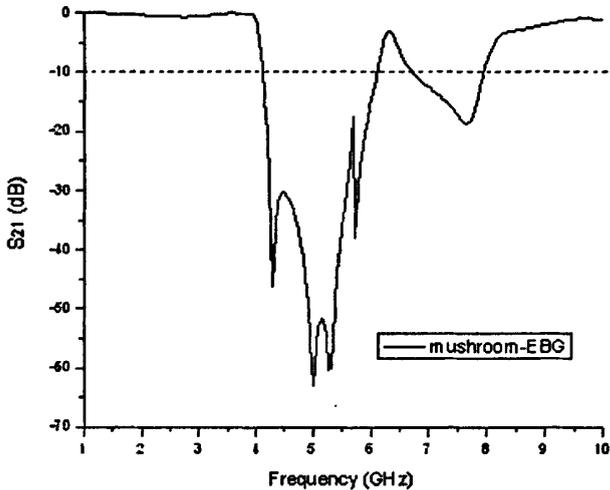


图 3.11 mushroom-EBG 结构带隙特性图

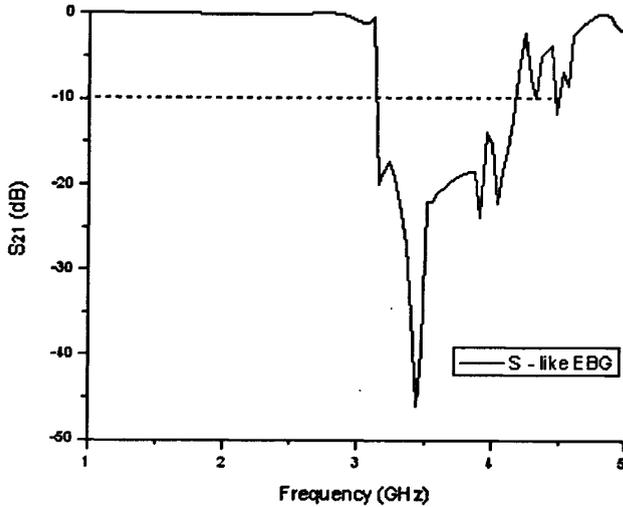


图 3.12 S-like EBG 结构带隙特性图

表 3.2 两种 EBG 结构带隙特性参数对比

EBG 结构/带隙特性	中心频率/GHz	阻带范围/GHz	带宽/GHz
mushroom-EBG	5.1 GHz	4.1 GHz~6.1 GHz	2 GHz
S-like EBG	3.65 GHz	3.1 GHz~4.2 GHz	1.1 GHz

从图 3.11 中我们可以看到, mushroom-EBG 结构的中心频率为 5GHz 的带宽内有明显的阻带,抑制深度为-10dB 频率范围为 4.1 GHz~6.1 GHz;对于改进型 S-like EBG 结构,如图 3.12 中心频率为 3.65 GHz 的带宽内有明显的阻带,抑制深度为-10dB 频率范围为 3.1 GHz~4.2 GHz。可以看出,开槽的引入能使 EBG 结构的谐振频率降低,从而实现 EBG 结构的小型化。

3.4 仿真结果分析

传统的 mushroom-EBG 结构作为一种空间结构,可以被设计成二层结构和多层结构,其空间上的结构形式必然对其带隙的特性有着重要的影响,mushroom-EBG 结构主要由金属贴片、过孔、介质板和金属地等部分组成,相应地,影响带隙特性的结构参数就与这些组成部分密切相关,其阻带的中心频率以及阻带带宽与电介质的厚度、电介质的介电常数 ϵ_r 、正方形金属贴片的尺寸有着密切的关系。随着这些参数的改变,阻带的中心频率以及带宽都会发生变化。然而在实际工程中,由于这种结构尺寸太大,这种结构的应用较少。所以我们提出了新

的小型化紧凑型 EBG 结构，我们提出了通过在金属贴片上引入共面螺旋电感和开槽来改变电流的流向，从而改变电流回路的方法，间接的增长了贴片的电长度。对于相同的介质，介质厚度，贴片尺寸和周期结构，和 mushroom-EBG 相比，改进型的 Spiral-like 的谐振频率降低了约 49%，此外，我们还可以通过改变螺旋的匝数和宽度来实现紧凑型结构。同样，提出的加载缝隙的 S-like EBG 结构和原来的 mushroom-EBG 相比，频率也降低了约 28%，并且我们可以通过改变开槽的长度，宽度，数目来实现紧凑型 EBG 结构。

第四章 共面电磁带隙结构

4.1 引言

在过去的近十年中,电磁带隙 EBG(Electromagnetic Bandgap)结构成为微波和毫米波领域中一个研究的热点课题,它的带隙形成机理和在电磁各个领域的应用都得到了广泛的理论和实验研究,证实了其在改善微波器件和天线性能方面具有明显的作用。然而,在一些实际工程应用中,存在有限设备结构空间与电磁带隙结构尺寸太大的矛盾,这就要求必须缩小 EBG 结构的尺寸,或者减小 EBG 结构的周期。早期的 EBG 结构由于物理尺寸的原因,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,比如 mushroom-EBG 结构和 Uniplanar Compact EBG(UC-EBG)结构, AI-EBG 结构^[18]以及 AI-EBG 的优化结构等。mushroom-EBG 结构是由 Sievenpiper 等提出的,这种类型的 EBG 结构制作起来比较复杂,接地板打孔带来了封装问题,打孔接地板必须远离金属面以保证开孔起作用,且开孔处存在电磁辐射,故能量损耗较大,介质基板打孔制造工艺复杂。UC-EBG 结构是 F.Yang 等提出的, AI-EBG 结构是由 Georgia Tech 的教授们提出来的,他们同属于共面电磁带隙结构,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,另外它的周期长度可以缩短到三分之一波长,有的甚至可以缩短到四分之一波长。因此,共面电磁带隙结构越来越多地引起了人们的广泛关注。

4.2 结构描述

本小节主要介绍了两种属于集总 LC 参数阵列结构,用于微波集成电路的新型的共面电磁带隙结构,它与上一章所讲的 mushroom-EBG 结构的带隙形成机理是一样的,都是基于局域谐振,在谐振频率的范围内,EBG 结构的表面波阻抗非常高,阻止表面波的传播,从而形成特定的频率带隙。只不过共面电磁带隙的金属贴片的形状要复杂些,其本质是依靠单元贴片之间的耦合提供电感和电容,这样可以充分发挥单元的局域谐振特性,以降低带隙的位置,加强整个 EBG 结构的紧凑性。由于这种 EBG 结构也是一种平面型 EBG 结构,采用的是平面微带电路工艺,所有的图案都采用印刷电路板工艺印制在微波基板上,没用采用导电过孔的技术,因此理论上讲,这种结构在制备方面要简单一些,成本也更加低廉,现已

应用到微波电路，微带天线等多方面。

对于含导体底面的 UC-EBG 结构，除了能得到好的频率带隙外，另外还有一个重要特性，那就是对垂直于入射的平面波具有同相位反射的效果，即反射波与入射波的相位没有发生变化。由于金属表面会使反射波产生 180 度的相位变化，这种零反射相位特性类似于理想磁导体的特性，所以具有这种特性的结构又被称为人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)。自然界中不存在理想磁导体，但可以通过在金属表面上制备周期结构来获得这种特性。UC-EBG 就是一类特殊的 AMC，如图 4.1 所示。

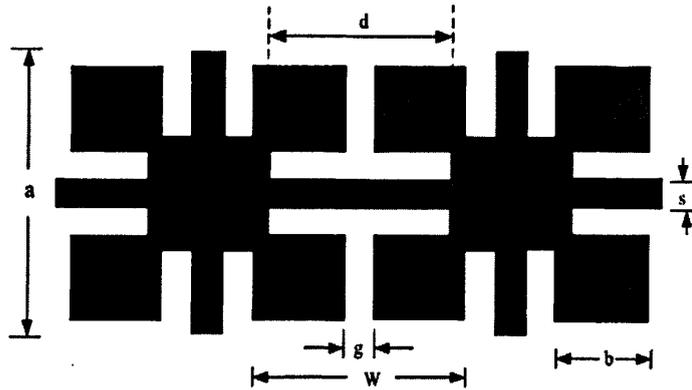


图 4.1 UC-EBG 结构的示意图

这些作为连接的窄的枝节提供了额外的电感，相邻贴片之间的间隙增大了电容。这种结构具有平面紧凑，损耗低的特点，更重要的是可以抑制表面波在介质基底的各个方向的传播。单元贴片的局域谐振特性可等效为一谐振电路，如图 4.2 所示。

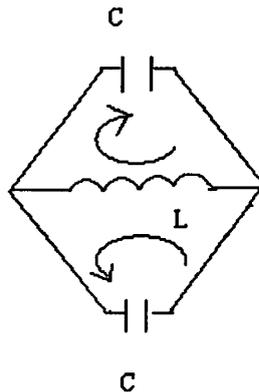


图 4.2 UC-EBG 结构的 LC 等效模型

UC-EBG 的带隙中心频率及带宽可以分别由以下近似公式求得：

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (4-1)$$

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\eta} \sqrt{L/C} \quad (4-2)$$

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 $\eta = 120\pi$ 。通过研究 UC-EBG 结构的经典形式和以上公式可以发现, 贴片边缘的长度实际上决定了单元等效电容的大小, 相邻单元连接枝条的长度决定了单元等效电感的大小。这些串联电感和并联电容决定了传输系数。

对于 UC-EBG 结构, 周期结构的周期间距决定着结构的中心截止频率, 因此有了中心截止频率就可以反推出结构的周期间距。截止频率与周期间距的关系可以用下面这个方程表示

$$f_{stop} = c / \left(2a \frac{\beta}{\beta_0} \right) \quad (4-3)$$

C 是光的传播速度, β 为周期结构中的传播常数, β_0 为在自由空间中的传播常数, a 为周期间距, f_{stop} 为中心截止频率。 β 近似于等于没有周期结构的普通微带线的 β 值。

从总体效果来看, 通过在微带基片上直接刻蚀金属垫片, 并用枝节进行连接形成的等效 LC 网络, 这种 UC-EBG 结构中不需要通孔和多层基底, 而且在很宽的频带内表现出明显的带阻特性。UC-EBG 的引入, 使得在不增加额外的元器件的情况下, 很大的改善了带通滤波器的传输特性, 简化了电路, 减弱了高次谐波的影响, 能满足实际电路的设计使用, 为小型化电路的设计提供了一种设计思考。

AI-EBG 的形成原理和 UC-EBG 是不同的, 它是基于滤波器的理论形成的电磁带隙结构, 也可以叫阶跃阻抗 EBG 或者叫可变阻抗 EBG, 它是有一个高阻抗和一个低阻抗级联起来形成的滤波器, 阻抗的波动, 导致电磁波在某个禁带禁止传播, 从而形成阻带, 可以用滤波理论去解释其形成的原理。图 4.3 是其单元结构图。



图 4.3 AI-EBG 单元结构图

其中大的金属贴片可以等效为一个电容，两边小的金属条树枝可以等效为电感。从而电路可以等效为 LC 滤波电路。

4.3 三种 EBG 结构讨论分析

在高速数字电路设计上，利用电源隔离技术和去耦电容的技术来抑制同步开关噪声，应用都非常普遍。电源隔离的优点在于隔绝不同层板间的干扰信号以及提供不同的电源层分布；但是，事实上，特定共振频率的干扰信号仍可以通过耦合的方式传到高速电路中去，去耦电容可有效的抑制低频的噪声信号。但是其实际工作的频率范围，常常受到结构本身寄生电感的限制，因此，本小节主要讨论高速电路中几种抑制同步开关噪声的 EBG 结构。

在本节中，为了便于分析对比，我们建立模型的 EBG 平面对外围的尺寸大小全为 $90\text{mm} \times 90\text{mm}$ ，板间填充介质为 FR4， $\epsilon_r = 4.4$ ， $\tan \delta = 0.02$ ，介质厚度为 0.4mm 。EBG 结构为 3×3 阵列。为了比较好的测试新型 EBG 的带隙特性，采用 50Ω 标准同轴激励。端口 1, 2, 3 的位置位于 $(45\text{mm}, 45\text{mm})$ ， $(75\text{mm}, 45\text{mm})$ ， $(75\text{mm}, 75\text{mm})$ ，并且其带隙抑制深度都为 -30dB 以下。

4.3.1 UC-EBG 结构

首先，我们来分析 UC-EBG 对带隙宽度的影响。仿真的参数设置如下：单元周期为 $a=30\text{mm}$ ，其他参数如图 4.1 所示，介质选择介电常数为 4.4 的 FR4，介质的厚度均为 0.4mm 。采用 Ansoft HFSS 软件进行仿真，仿真的结果如图 4.5 所示。

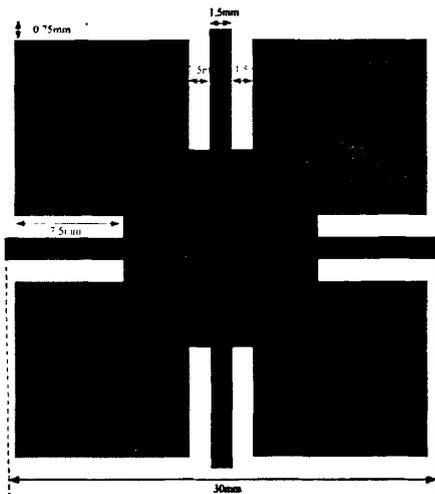


图 4.4 UC-EBG 的单元结构图

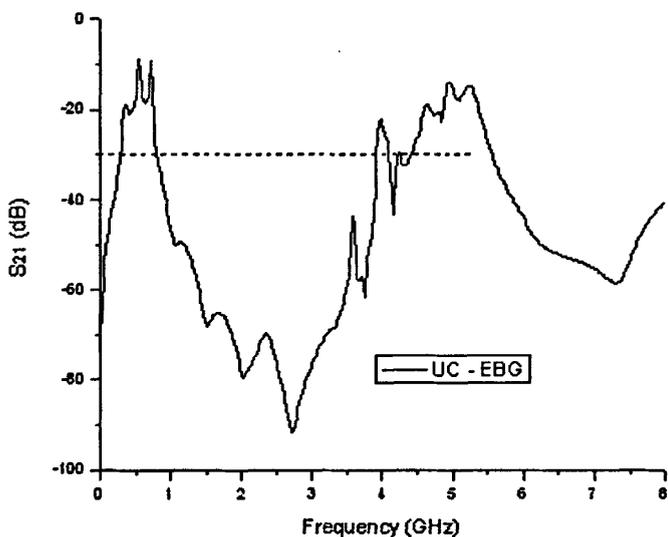


图 4.5 UC-EBG 的带隙特性

表 4.1 不同的介质所对应的带隙特性参数对比

结构/带隙特性	中心频率/GHz	阻带范围/GHz	带宽/GHz
UC-EBG	2.35 GHz	0.8 GHz~3.9 GHz	3.1 GHz

4.3.2 AI-EBG 结构

AI-EBG 的工作原理是利用大贴片在微波传输中相当于电容,小贴片微波传输中想当于电感,从而组成等效滤波电路。

为了验证此结构的带隙特性,我们设计了新的单元结构,仿真的参数设置如下:单元周期为 $a=30\text{mm}$,其他参数如图 4.6 所示,介质选择介电常数为 4.4 的 FR4,介质的厚度均为 0.4mm 。采用 Ansoft HFSS 软件进行仿真,仿真的结果如图 4.7 所示。

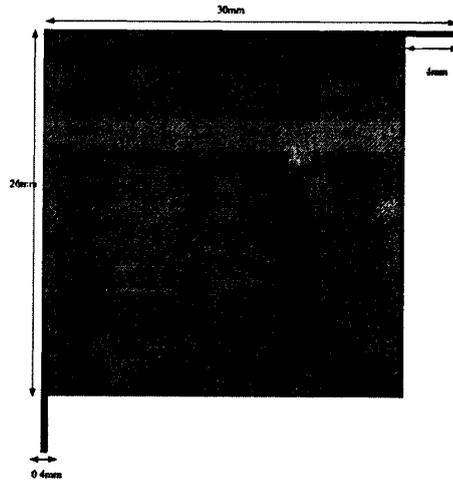


图 4.6 AI-EBG 单元结构图

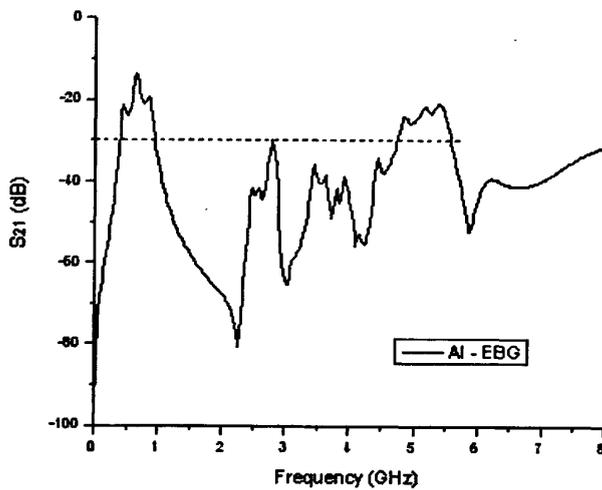


图 4.7 AI-EBG 结构的带隙特性

表 4.2 AI-EBG 结构的带隙特性

结构/带隙特性	中心频率/GHz	阻带范围/GHz	带宽/GHz
AI-EBG	2.8 GHz	0.9 GHz ~ 4.7 GHz	3.8 GHz

4.3.3 L-bridged EBG 结构

在 AI-EBG 结构中，金属贴片的面积越大，则等效电容越大，等效电感 L 主要由作为连接的窄的金属枝节来决定，这两者之间的等效路径越长则等效电感就会越大。因此，如果能够设法增大该路径，就能增大等效电感。改变枝节的形状可以改变电感大小，从而间接影响到了带隙的特性。所以，在本节中介绍一种 L-bridged EBG 结构^[14]，如图 4.8 所示，这种结构采用了类似 L 形矩形窄带来取代之前的直线连接枝节，也就增加了 EBG 结构的等效电路模型中的等效电感，改善了 EBG 结构的带隙特性^[8]。

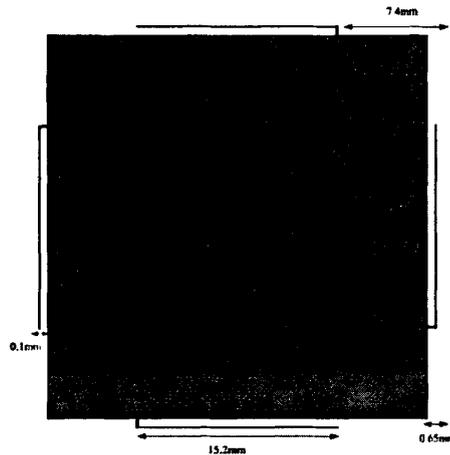


图 4.8 L-bridged EBG 结构示意图

改进的 L-bridged EBG 结构的单元周期 $a=30\text{mm}$ ，其他参数如图所示，介质基板厚 $h=0.4$ ，介质的介电常数为 4.4。利用 Ansoft HFSS 仿真，图 4.9 给出了带隙特性图。

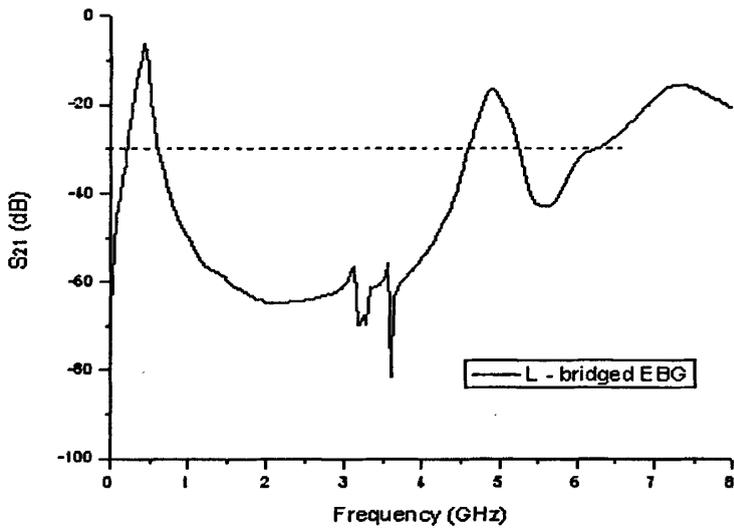


图 4.9 L-bridged EBG 结构的带隙特性

表 4.3 L-bridged EBG 结构的带隙特性

结构/带隙特性	中心频率/GHz	阻带范围/GHz	带宽/GHz
L-bridged EBG	2.6 GHz	0.6 GHz ~ 4.6 GHz	4 GHz

4.4 仿真结果比对分析

通过上述的仿真结果，我们可以得出结论，在相同尺寸的结构下，L-bridged EBG 的性能最好，在高频和低频处都得到了好的抑制效果。UC-EBG 的抑制效果不是很好，大约 3.1GHz 带宽，AI-EBG 次之，抑制带宽大约 3.8GHz，而 L-bridged EBG 的带宽最好，达到 4GHz。

图 4.10, 4.11, 4.12 分别是 UC-EBG, AI-EBG, L-bridged EBG 和参考平面的对比图。通过图 4.13，我们可以看出，在相同尺寸下，UC-EBG 的低频性能稍优于 AI-EBG，而高频性能 UC-EBG 不如 AI-EBG。通过图 4.14，我们也可以看出，相同尺寸下，L-bridged EBG 的低频和低频性能都优于 UC-EBG。通过图 4.15，我们同样可以看出，L-bridged EBG 的低频和高频性能也都优于 AI-EBG。

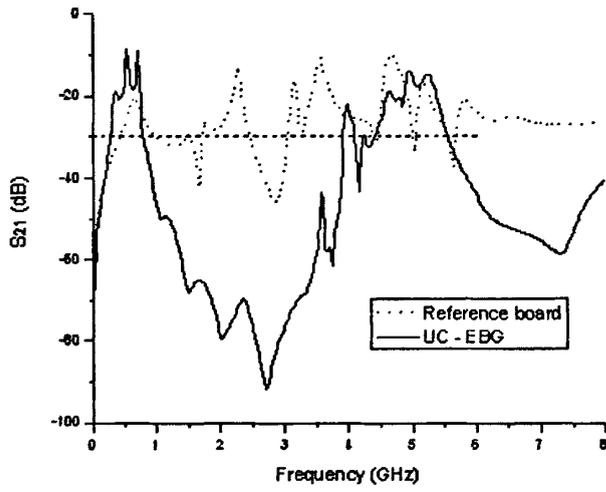


图 4.10 UC-EBG 电源层和参考平面的对比图

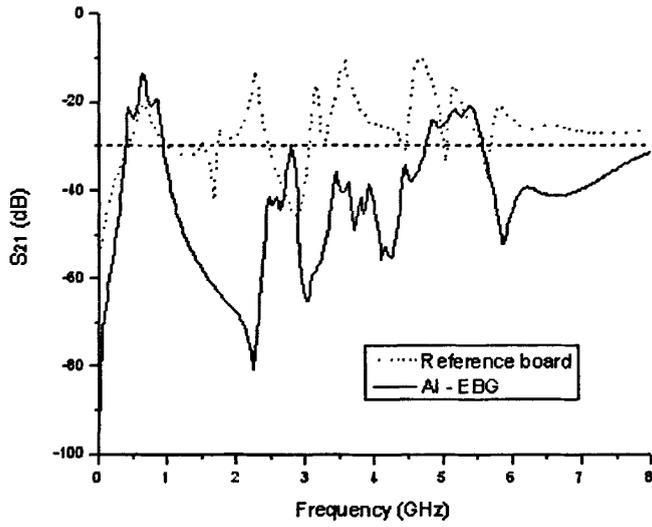


图 4.11 AI-EBG 电源层和参考平面的对比图

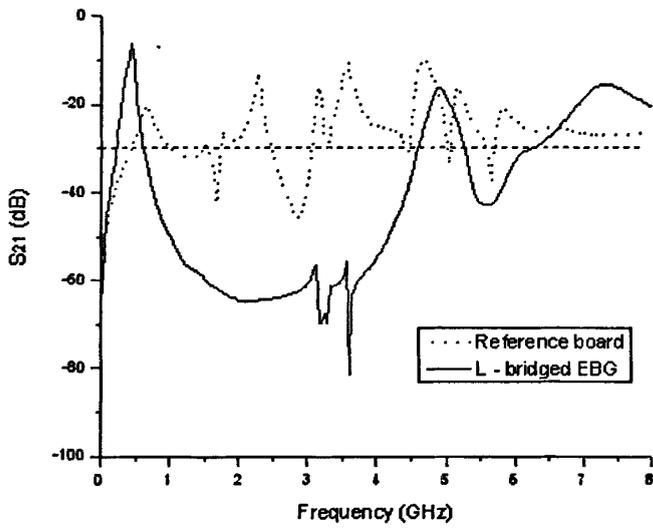


图 4.12 L-bridged EBG 电源层和参考平面的对比图

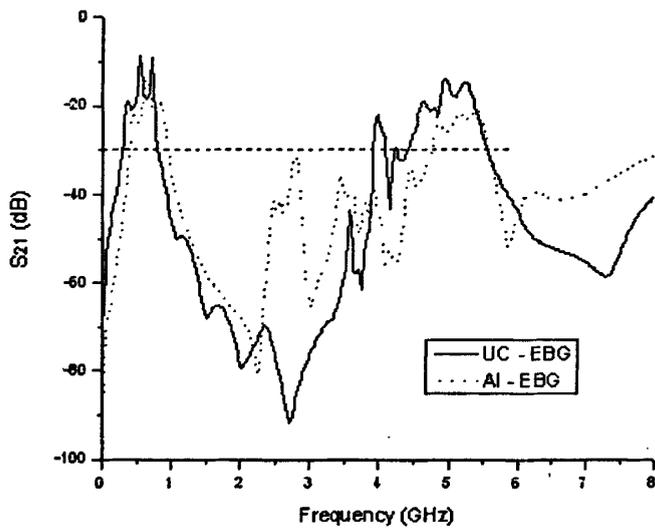


图 4.13 UC-EBG 和 AI-EBG 的对比图

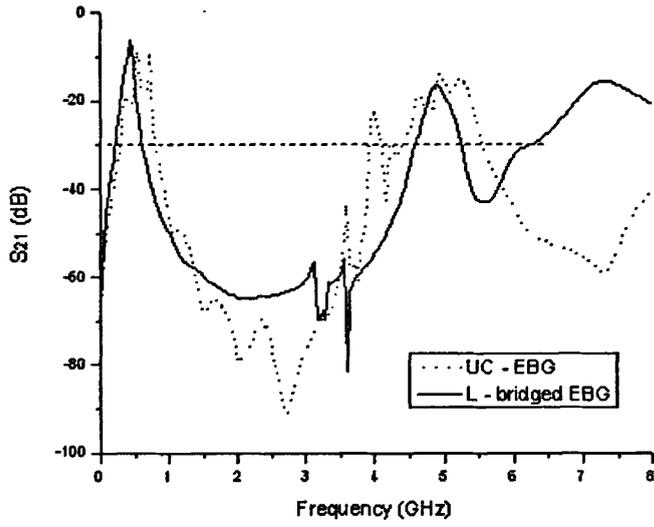


图 4.14 UC-EBG 和 L-bridged EBG 的对比图

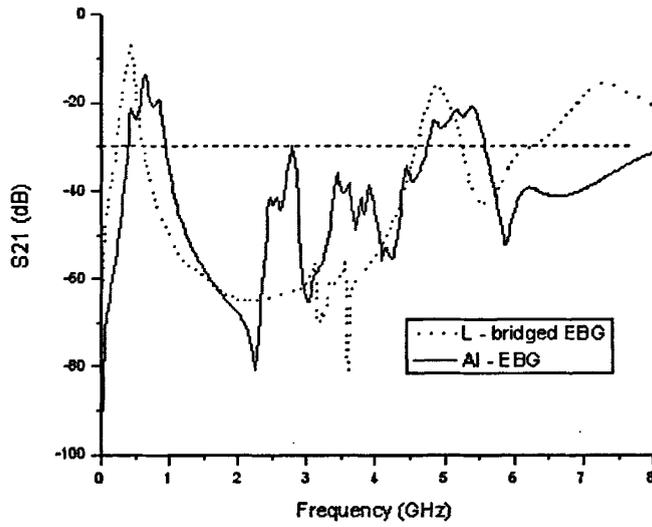


图 4.15 AI-EBG 和 L-bridged EBG 的对比图

第五章 新型 MS-EBG 结构

5.1 引言

随着高速数字电路的迅猛发展以及射频电路与数字电路集成化等等,在高频时需要考虑电磁波的传播以及产生谐振的情况,微波电路系统可以看成很多电感和电容构成的 T 型网格,也可以看作为谐振腔,存在谐振效应,影响阻抗的大小,产生很大的电磁骚扰,SSN (simultaneous switching noise 同步开关噪声,亦称为 GBN: ground bound noise 地弹噪声)成为了电路设计中一个很重要的因素。因此如何能成功的抑制 SSN,同时又不影响信号完整性,成为目前设计者所重视的一个问题。

EBG 结构具有在一定的带宽范围内禁止电磁波传播的特性,因此可以考虑在电路设计中利用 EBG 结构来抑制谐振,达到在谐振频率点附近抑制阻抗尖峰产生从而抑制噪声产生的目的。

上两章提出的 mushroom-EBG 结构和 UC-EBG 结构以及这两种的改进结构都有很好的带阻特性。然而,SSN 主要分布在 6GHz 以下的低频处,上述两种结构都不能很好的抑制 SSN。因此需要设计一种抑制低频噪声的 EBG 结构。

本章提出了一种新型平面型 EBG 结构,其在电磁干扰抑制深度为-30dB 时阻带范围为 0.4GHz 到 6GHz,带宽达到了 5.6GHz,低频抑制效果较为理想,而且同时保证了高速电路中的信号完整性,取得了与预期吻合比较好的效果。本章在分析了如何具有较低的中心频率和较宽的阻带的 EBG 结构的理论依据后,进行了一系列仿真实验,最终得出了一种比较理想的结果,并与其他类似的研究结果做了比对。

5.2 新型 EBG 结构的设计和分析

本章以 AI-EBG 结构作为基础,提出了一种新型 EBG 结构,其与 AI-EBG 的带隙形成机理相似,完全通过局域谐振以确定带隙所在,只是其带隙位置更低,可以视为对 AI-EBG 结构的一种优化,这种新的结构称为 MS-EBG 结构。

5.2.1 设计思路和结构描述

根据目前已有文献的理论分析,EBG 结构的带隙形成机制可分为两种:一种

是 Bragg 散射机制, 包括介质基底钻孔和接地面腐蚀两种结构类型; 另一种是局谐振机制, 包括 mushroom-EBG 结构和 UC-EBG(Uniplanar Compact Electromagnetic Bandgap)结构。由于带隙形成机制的不同, 在 EBG 结构紧凑设计方法上也就有所不同^[7]。

1. Bragg 散射型 EBG 结构

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:

$$a = \lambda_g / 2 \quad (5-1)$$

$$\lambda_g = c / f_0 \sqrt{\varepsilon_e} \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad \left(\frac{w}{h} \geq 1 \right) \quad (5-3)$$

其中 c 为光速, ε_r 和 ε_e 分别为介质的相对介电常数和 EBG 结构的有效介电常数, h 为介质厚度, w 为微带线对应于 50Ω 阻抗线的线宽, λ_g 是 EBG 带隙频率对应的导波波长。从可以看出, 要想设计在某一频率处的 Bragg 型 EBG 结构, 其周期 a 主要与它的相对介电常数有关。利用高介电常数介质基底可以减小它的周期, 但这种减小是非常有限的, 而且在实际工程中, 由于其结构太大, 这种类型的 EBG 结构应用相对较少, 因此这里只作简单介绍。

2. 局域谐振型 EBG 结构

与 Bragg 散射机理不同, 在这种类型的 EBG 结构中, 周期单元本身的谐振效应在带隙形成中起主要作用。这种 EBG 往往通过对单元结构的特殊设计, 使得其单元可等效为局域谐振特性比较强的并联 LC 电路, 以增加单元的谐振性能, 然后利用单元谐振时电抗无穷大的特性, 阻止谐振频率附近的电磁波传播, 以形成频率带隙。这种谐振型 EBG 的频率阻带可以设计在微波和毫米波范围内, 而其结构尺寸可以达到波长的五分之一到十分之一, 甚至更小。带隙的中心频率和带宽由下式决定:

$$\omega = 1/\sqrt{LC} \quad (5-4)$$

$$BW = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{1}{\eta} \sqrt{L/C} \quad (5-5)$$

从(5-4)式中可以看出, 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, 在相同的带隙中心频

率下，具有较大单元等效电感和电容的结构就具有较小的周期和结构尺寸。最理想的就是既降低带隙中心频率又有较大的带隙宽度，这也是本章的主要目标。第四章中提到的 L-bridged EBG 结构即引入 L 枝节增大等效电感从而降低了中心频率。因此，我们可以从这个角度出发，来降低中心频率。

从(5-5)式得出提高等效电感还可以增加相对带宽，所以，新型 EBG 结构即从增大等效电感出发，从而降低带隙位置。图 5.1 是 MS-EBG 结构的单元贴片，在传统 L-bridged EBG 结构金属贴片的介质上面引入蛇形线和开矩形槽，从而改变贴片上电流的分布，从而就可以增大单元贴片的等效电感，起到增加等效电感的作用。整个新型 EBG 结构中通过局域谐振特性形成的带隙位置将有明显偏低。MS-EBG 结构和 L-bridged EBG 结构一样，两者都制作在普通的微带基片上，只是 MS-EBG 结构在原来的 L-bridged EBG 基础上，金属贴片的结构稍微变得复杂了。根据单元贴片的形状，即可就两者的带隙形成机理做出解释。

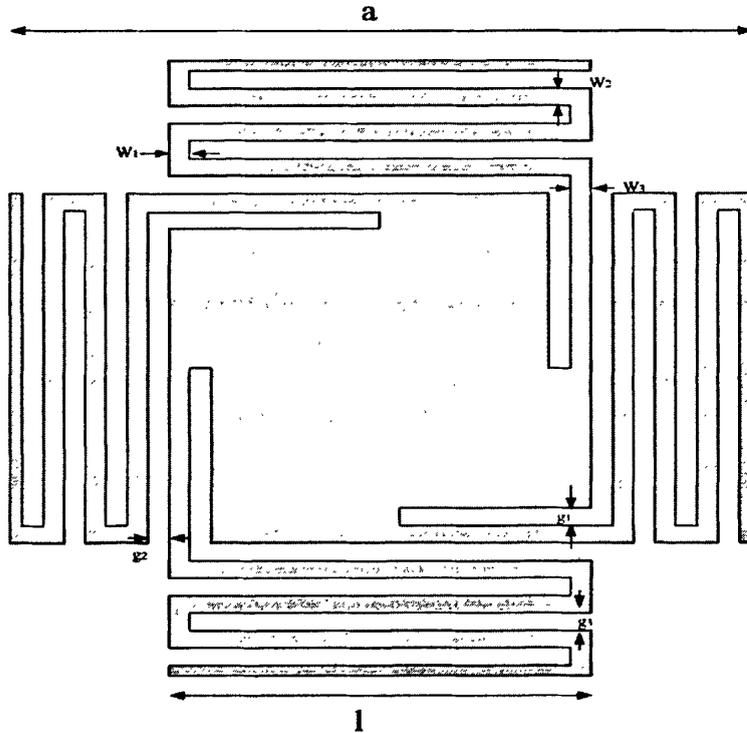


图 5.1 新型 EBG 结构单元图

5.2.2 新型 EBG 结构的带隙特性分析

新型的 EBG 结构是在电源层的金属表面上面光刻或腐蚀出周期性结构。该结构可以看作由各个单元的连接支路（等效电感部分）以及单元与单元之间的空隙

(等效电容部分)级联而成的二维 LC 网络。与 L-bridged 相比,这种结构通过改变贴片上的电流分布,从而可以增大单元贴片的等效电感,从而在单元周期相同的情况下,可以获得更低的带隙和相对大的带宽。

下面验证现提出的新型结构相对于 L-bridged EBG 结构的带隙特性的优化。我们以文献^[15]中的 L-bridged 作为比较对象。现取新型结构的具体参数见图 5.1,图 5.2 是新的 EBG 结构作为电源层的俯视图,利用 Ansoft 公司的 HFSS 软件仿真此电磁带隙结构的阻带特性。首先,建立模型。测试的 EBG 平面对外围的尺寸大小为 $90\text{mm}\times 90\text{mm}$,板间填充介质为 FR4, $\epsilon_r = 4.4, \tan \delta = 0.02$,介质厚度为 0.4mm 。其单元贴片的长度 $a=30\text{mm}$,折线宽度 $W_1 = W_2 = W_3 = 0.2\text{mm}$,折线长度 $l=27\text{mm}$,缝隙宽度 $g_1 = g_2 = g_3 = 0.2\text{mm}$ 。此 EBG 结构为 3×3 阵列。为了比较好的测试新型 EBG 的带隙特性,采用 50Ω 标准同轴激励。端口如图 5.2 所示,其 1, 2, 3 端口的位置位 $(45\text{mm}, 45\text{mm})$, $(75\text{mm}, 45\text{mm})$, $(75\text{mm}, 75\text{mm})$ 仿真后,原点位于图 5.2 的左下方,1 端口是输入端,2, 3 端口是输出端口。其 S_{21} 参数如图 5.3 所示。得到了深度为 -30dB 时,带宽为 5.6GHz 的带隙。

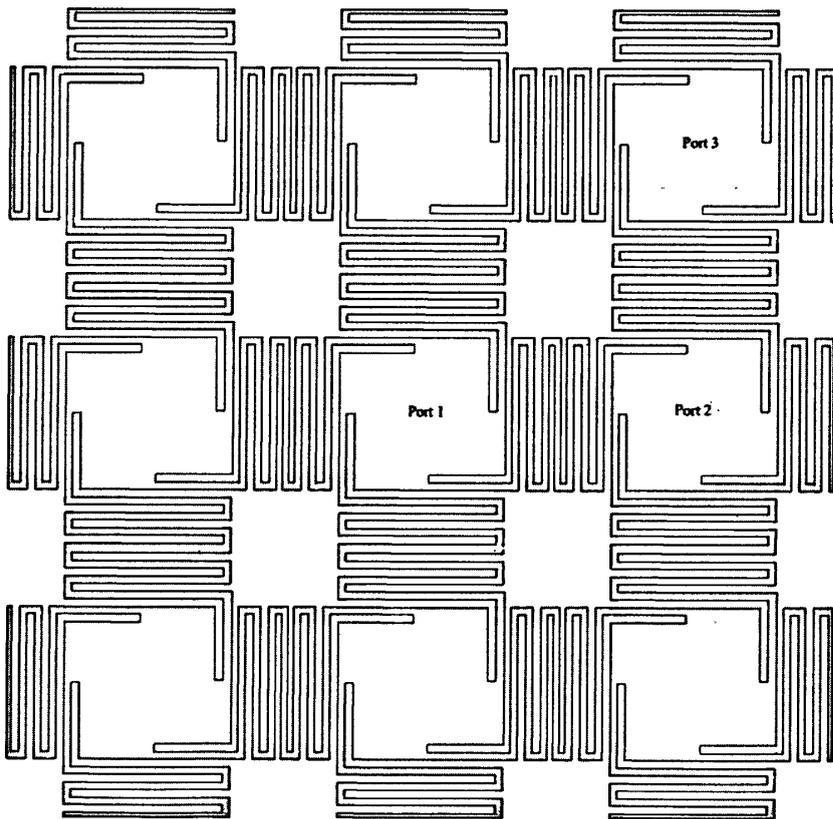


图 5.2 新型 EBG 电源层俯视图

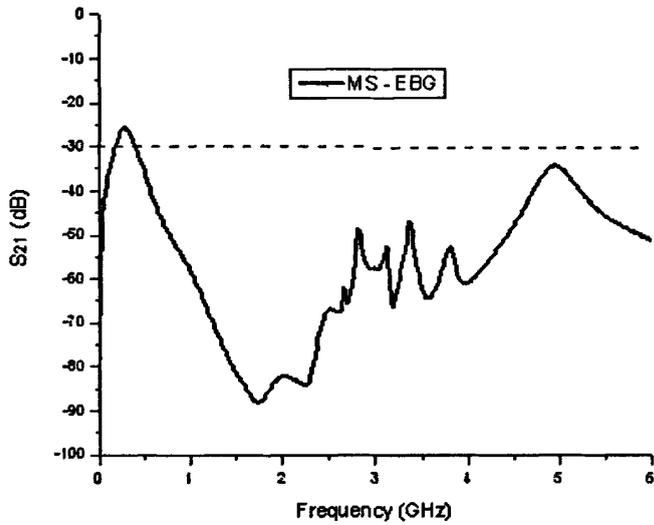


图 5.3 新型 MS-EBG 结构的频响参数图

通过改变折线的数目和折线宽度，缝隙的宽度对 MS-EBG 结构的带宽和抑制深度进行讨论分析。

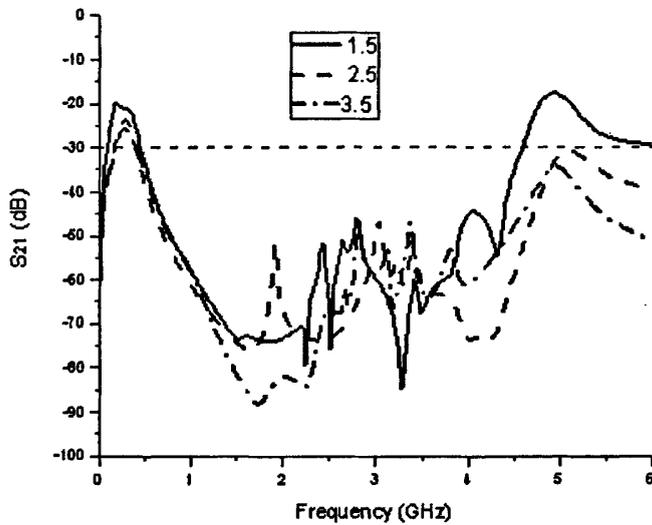


图 5.4 改变 MS-EBG 结构的折线数目的频响参数图

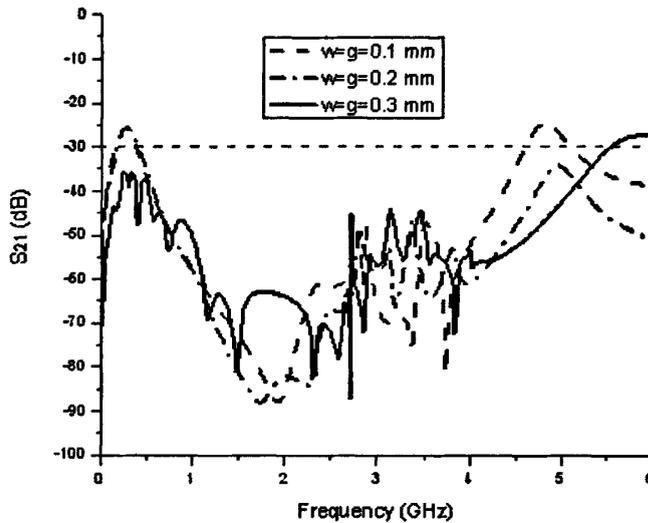


图 5.5 同时改变折线宽度和缝隙宽度的频响参数图

通过上图 5.4，可以看出，在其它参数保持不变的前提下，随着折线数目的增加，阻带带宽越来越大，而且，其起始频率基本保持不变，截止频率升高了，平均抑制深度基本保持不变。

从图 5.5，可以看出，同时改变折线的宽度和缝隙宽度，可以改变电磁带隙结构的阻带带宽。

通过上面的优化分析，我们得出结论，当折线的数目为 3.5 时， $w = g = 0.2\text{mm}$ ，阻带带宽最大，达到 5.6 GHz。

5.3 实验结果比对

为了更为有效的抑制 SSN，使 EBG 结构的带隙特性向低频扩张，许多学者都做了大量研究。降低带隙的中心频率或者扩大阻带带宽是最基本的出发点。最为常见的做法有：将贴片单元之间的连接枝节由直线改为折线，利用高介电常数的介质，研究低周期的共面 EBG 结构，将不同阻带范围的 EBG 结构级联，这些做法所得到的带隙范围要么不足以覆盖 SSN 的频率范围，要么影响了高速信号的完整性。

T.L. Wu, Y.H. Lin, and S.T. Chen 在“A novel power planes with super-wideband elimination of ground bounce noise on high speed Circuits,”文中提出一种 L-bridged

EBG 结构, 采取改变枝节的电长度, 引入折线电感的方法来抑制低频 SSN。得到了抑制深度为-30dB 时带宽从 0.6GHz 到 4.6GHz, 带宽为 4GHz。我们提出的新型 EBG 机构得到抑制深度为-30dB 的带宽从 0.4GHz 到 6GHz。图 5.6 是新型 EBG 结构作为电源层和连续电源层平面结构的对比。图 5.7 是新型 EBG 结构和参考文献中的 L-bridged EBG 结构的对比图。

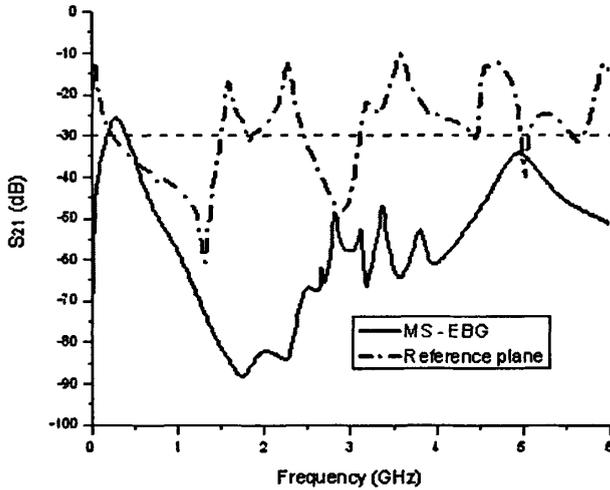


图 5.6 新型 EBG 结构与连续平面结构做为电源层对比曲线图

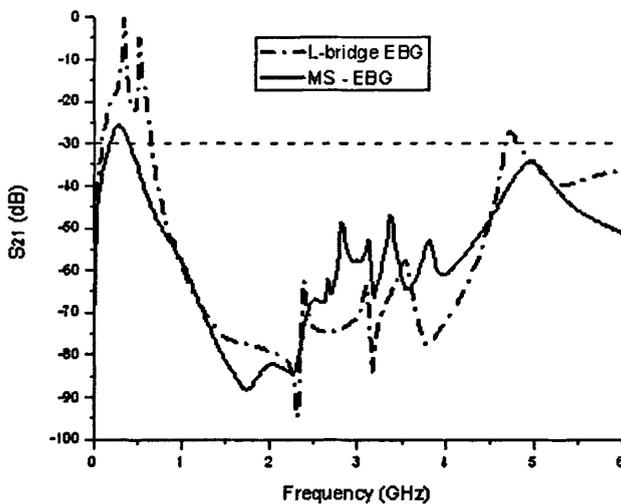


图 5.7 新型 MS-EBG 结构和 L-bridged 结构的频率响应对比图

不同输出端口的传输特性的对比,通过分析不同位置的传输特性,从而验证本文提出的新型结构的有效性,如图 5.8 所示,在相同激励的情况下,2,3 端口的 S 参数特性曲线基本相同,从而可以得出在整个电源层表面其 SSN 噪声都可以得到抑制。

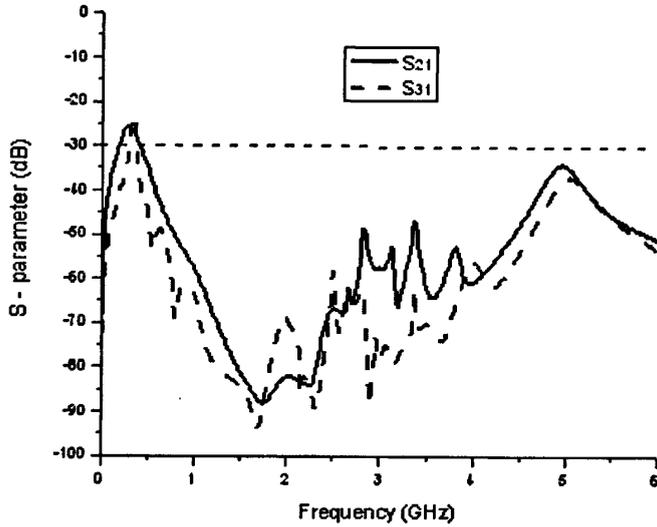


图 5.8 不同端口的 S 参数特性对比曲线图

结束语

本文首先详细介绍了 EBG 结构的来源、发展、原理以及应用。对电磁带隙结构原理及其性质进行了简要的分析然后详细地讨论分析了 EBG 结构的几种解析方法,采用有限元(FEM)法对电磁带隙(EBG)结构进行了详细地数值计算,结合有限元(FEM)法使用 Ansoft HFSS 软件。通过对目前几种比较典型的 EBG 单元的分析,在此基础上设计了一种新型的 MS-EBG 单元。

本论文根据 EBG 结构抑制表面电流传播的高阻抗以及高频带阻特性,分析了多种 EBG 结构的电磁带隙性能。仿真实验结果显示 EBG 结构有效地抑制了电磁干扰,取得了理想的效果。我们又根据 EBG 的结构特性,设计了一种用于抑制同步开关噪声的新型的共面紧凑型 EBG 结构,通过仿真分析以及参数讨论,证明此 MS-EBG 结构能够很好的抑制电磁干扰。从而,为 EBG 结构在抑制电磁干扰方面的应用提供了理论上、方法上的论证。

随着国内外学者对 EBG 结构研究的深入,更多阻带宽,结构简单、体积小、实现工艺简单的 EBG 结构被提出,使其在微带电路、天线设计、高速 PCB 设计、系统电磁兼容以及抑制电磁干扰等方面将会有更广泛的应用。

致谢

衷心感谢导师路宏敏教授，本文在路老师的悉心指导和督促下才得以顺利完成。从最初的选题到最终论文的完成，路老师都给予了极大的指导和帮助，帮助我学会如何清晰的分析问题、解决问题；在生活中以宽厚亲切的态度细心帮助着我。无论是学习、科研、生活方面，导师的言传身教都将使我受益终生。导师渊博的学识、锐意求新的治学风范、严谨务实的治学态度、孜孜追求事业的精神为我树立了榜样。导师时刻以其人格魅力感染着他的学生，其积极开朗的人生观，宽厚的性格始终教育和激励着我，使我更加懂得在学习和工作中所应具备的积极态度和宽厚待人的为人处事之道。在学习之余，还经常和我一起探讨做人的道理、人生事业的规划，对我今后的工作和生活都很有意义。在相处的两年多时间里，我深切感受到路老师渊博的知识和高尚的人格，以及严谨的治学态度，他的言传身教对我的影响将是终生的。

在此还要感谢梁昌洪、王家礼、朱满座、史小卫等老师认真的教授我专业课程，为我今后的学习奠定了坚实的基础。

感谢师兄李竞波、张栋、吴保义、刘国强和师姐张新丽、黄河清在学习和生活上给我的帮助。感谢同实验室罗朋、冯艳斌、纪腾腾、张江峰、张丽等同学以及张骅、张磊、崔杨、张卫东、滑瑞霞等师弟师妹们，感谢他们给予我的支持和鼓励，以及莫大的帮助。

感谢西安电子科技大学电子工程学院研 2-077 班上的全体同学，是他们陪我度过了美好的研究生阶段。

感谢 98 号宿舍楼 401 室的张金峰、赵晶晶同学，她们平时在生活上和学习上给我许多帮助，在这里表示深深的感谢。

感谢我的家人和关心我的亲人在生活和学习上给予我的关心和支持。求学路上，他们始终无条件地支持着我，使我无所羁绊地泛舟于无涯学海。

最后，向所有评阅此论文的各位专家和教授致以深深的谢意。

参考文献

- [1] B.Kim and D.-W.Kim; Bandwidth Enhancement for SSN Suppression Using a Spiral-Shaped Power Island and a Modified EBG Structure for a $\lambda/4$ Open Stub. ETRI Journal, Apr. 2009, vol. 31, no.2. pp. 201-208
- [2] B.Kim and D.-W.Kim;Spiral-shaped electromagnetic bandgap structure for simultaneous switching noise suppression. Electronics Letters. Feb. 2009, vol.45, no.5.pp.1-2
- [3] Ting-Kuang Wang, Tzu-Wei Han, and Tzong-Lin Wu. A Novel Power/Ground Layer Using Artificial Substrate EBG for Simultaneously Switching Noise Suppression. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.May. 2008, vol. 56.no. 5.pp.1164-1171.
- [4] Qiu-Rong Zheng, Yun-Qi Fu, and Nai-Chang Yuan. A Novel Compact Spiral Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structure. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. June. 2008, vol. 56. no. 6. pp. 1656-1660.
- [5] WeiWang, Xiang-yu Cao, Wan-yin Zhou. A Novel Compact Uni-planar Electromagnetic Bandgap(UC-EBG) Structure. GSMM2008 Proceeding.
- [6] 王伟,曹祥玉,王帅等.平面型紧凑微波光子晶体研究.激光与红外.2008,9,38(9).910-312.
- [7] 刘涛,曹祥玉,文曦等.紧凑型电磁带隙结构的设计方法分析.电子技术应用. 2008, 5, 38(9).90-92.
- [8] M.F.Abedin, M.Z.Azad and M.Ali. Wideband Smaller Unit-Cell Planar EBG Structures and Their Application. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Mar. 2008, vol. 56. no.3. pp. 903-908.
- [9] Yoshitaka Toyota, Kengo Iokibe, Ryuji Koga. Miniaturization of Electromagnetic Bandgap (EBG) Structures with High-permeability Magnetic Metal Sheet. 1-4244-1350-8/07/\$25.00 ©2007 IEEE.
- [10]B.Mohajer-Iravani, O.M.Ramahi Suppression of EMI and Electromagnetic Noise in Packages Using Embedded Capacitance and Miniaturized Electromagnetic Bandgap Structures With High-K Dielectrics.IEEE Transactions on advanced Packaging. Nov. 2007, vol. 30.no.4. pp. 776-788.
- [11]Ki Hyuk Kim, José E. Schutt-Ainé. Design of EBG Power Distribution Networks With VHF-Band Cutoff Frequency and Small Unit Cell Size for Mixed-Signal Systems. IEEE Microwave and Wireless Components Letters.

- July. 2007, vol. 17. no. 7. pp. 489-491.
- [12]曹锐,王卓,孙振鹏. UC-PBG 结构分析及在雷达系统中的应用. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2006, 29(6). 725-727.
- [13]Jie Qin, O.M.Ramahi. Wideband SSN Suppression and EMI Reduction from Printed Circuit Boards using Novel Planar Electromagnetic Bandgap Structure. 1-4244-0293-X/06/\$20.00 (c) 2006 IEEE.
- [14]T.L.Wu, Y.Y.Lin and C.C.Wang. Electromagnetic bandgap power/ground planes for wideband suppression of ground bounce noise and radiated emission in high-speed circuits IEEE Trans.Micro.Theory Tech. Sep. 2005, vol. 53. no.9. pp. 2935-2942.
- [15]T.L. Wu, Y.H. Lin, and S.T. Chen. A novel power planes with super-wideband elimination of ground bounce noise on high speed Circuits," IEEE Microwave Wireless Components Letters. March.2005, vol.15. no.3. pp.174 - 176.
- [16]Ki Hyuk Kim and Jose E. Schutt-Aine. Design of EBG power Distribution Networks With VHF-Band Cutoff Frequency and Small Unit Cell Size for Mixed-Signal Systems. IEEE Microwave And Wireless Components Letters. Jul. 2007, vol.17.no.7. pp. 489-491.
- [17]Li Yang, Mingyan Fan, Zhenghe Feng. A Spiral Electromagnetic Bandgap (EBG) Structure and its Application in Microstrip Antenna Arrays. 0-7803-9433-X/05/\$20.00 ©2005 IEEE.
- [18]Jinwoo Choi Govind, V. Swaminathan, M. A novel electromagnetic bandgap (EBG) structure for mixed-signal system applications. IEEE Radio and Wireless Conference, Sep.2004. pp.243-246
- [19]张友俊,侯继红,李英. PBG 结构在微波领域的应用. 电视技术. 2004, 12-17.
- [20]胡荣,张雪霞. PBG 结构特性的研究及其在天线中的应用. 电子学报. 2003, 31(12). 1765-1770.
- [21]樊明延,胡荣,郝清等. 二维电磁带隙结构研究的新方法. 红外与毫米波学报. 2003, 22(2). 127-131.
- [22]张文梅,李小卫,毛军发等. 平面带隙结构在微波和毫米波集成电路中的应用. 纳米器件与技术. 2003, 4. 12-17.
- [23]吴大刚,王蕴仪. 一种新型微带光子带隙结构的优化设计. 微波学报. 2002, 18(13). 49-51.
- [24]Y.Hao and C.G Parini. Isolation enhancement of PBG microstrip diplexer patch antenna. Eleventh International Conference on Antenna and Propagation. Apr.2001, vol.1. pp 86-89.

- [25]Huang Yu David Yang. Surface waves of printed antennas on planar artificial periodic dielectric structures, *IEEE Trans. Antennas Propagation*. Mar.2001, vol. 49. pp. 444-450.
- [26]TY.Yun and K.Chang. Uniplanar one-dimensional photonic-bandgap structures and resonators. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Mar. 2001, vol.49. no.3, pp .543-549.
- [27]T.Kim and C.Seo. A novel Photonic Bandgap Structure for low-pass filter of wide stopband. *IEEE Microwave Guided Wave Letter*. Jan. 2000, vol.10.no.1. pp.13-15.
- [28]J .Yu, S.Yao and L.Maleki. High-Q whispering gallery mode resonator filter with photonic bandgap spurious mode suppressing. *Frequency Control Symposium and Exhibition, Proceeding of the 2000 IEEE /EIA International*.2000, pp.471-474.
- [29]M,K.Fries and R.Vahldierk. Small microstrip patch antennas using slow-wave structure. *Antennas and Propagation Society, IEEE International Sym*. 2000, vol. 2. pp .770- 773.
- [30]Y.Qian, R.Coccioli, D.Sievenpiper, Radisic V, et al. A microstrip Patch Antenna Using Photonic-Bandgap Structures. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Jan.1999, vol.42.no.1. pp. 66-76
- [31]F .Yang, Y.Qian, R .Coccioli and T.Itoh. Analysis and application of photonic Band gap (PBG) structuer for microwave circuits. *Electromagnetics*.1999, pp .241-254.
- [32]D.Sievenpiper, Lijun Zhang and Romulo F.Jimenez Broas. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, Nov.1999, vol. 47.no.11. pp. 2059-2074.
- [33]F.R.Yang, K.P.Ma, Y.X.Qian. A uniplanar compact photonic bandgap (UC-PBG) structure and its applications for microwave circuit, *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1999, pp. 1509-1514.
- [34]Y.Horii and M.Tsutsumi. Harmonic Control by Photonic Bandgap on Microstrip Patch Antenna. *IEEE Microwave Guided Wave Lett*. Jan.1999, vol.9, no.1, pp.13 -15.
- [35]D.Sievepiper. High-impedance electromagnetic surfaces, Ph.D. Dissertation, University of California at Los Angles, 1999.
- [36]L .Rumsey P.M .Melinda, and P.K.Kelly. Photonic Bandgap structure used as filter in microstrip circuits. *IEEE Microwave Guided Wave Letter*, Oct.1998,

- vol.8.no.10. pp .336-338.
- [37]F.Yang, Y.Qian and T.Itoh. A novel high-Q image guide resonator using Band gap structures. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.Dig. Jun.1998, vol.3, pp. 1803-1806.
- [38]F.R.Yang, Y.Qian, R.Coccioli, and T.Itoh. A novel low loss low-wave microstrip structure. IEEE Microwave Guided Wave Letter. Nov.1998, vol.8, no.6, pp .258-260.
- [39]United States Patent. Highly efficient planar antenna on a periodic dielectric structure, Patent number: 5386215, 1995.
- [40]E.R.Brown, C.D.Parker and E.Yablonovich. Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate, Opt. Soc.Amer.B. Feb.1993, vol.10. no.2. pp. 404-407.
- [41]张开明, 顾昌鑫. 计算物理学. 第一版. 上海: 复旦大学出版社 1987, 第一版.80-107.
- [42]Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Phys. Rev. Letter. May.1987,vol.58.no.20 pp.2059-2062.
- [43]S. John, Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices, Phys.Rev. Letter. Jun.1987,vol.58.no.23. pp.2486-2489.

研究成果

在硕士研究生期间取得的研究成果如下：

一、参加科研情况

1. 参与“某控制系统单机电磁兼容设计研究”的科研项目，主要负责 PCB 电路板信号完整性分析。
2. TDW-26 电磁波传感器的电磁环境诊断与电磁加固。

二、发表论文情况

- [1] 黄小龙, 石大鹏, 谢 斌. 一种抑制同步开关噪声的新颖电磁带隙结构, 电子科技, 2010 年第 9 期, 录用待刊
- [2] 张江锋, 赵惠莲, 黄小龙. 抑制船载天线互耦方法的研究, 电子科技, 2010 年第 6 期, 录用待刊