

利用金属贴片电磁带隙结构在金属波导中 创建准横电磁波

任丽红^{1)2)†} 罗积润¹⁾ 张弛³⁾

1)(中国科学院电子学研究所,中国科学院高功率微波源与技术重点实验室,北京 100190)

2)(中国科学院研究生院,北京 100049)

3)(大唐移动通信设备有限公司,北京 100083)

(2010年9月22日收到;2011年1月5日收到修改稿)

为解决准横电磁(TEM)模波导工作带宽较窄的问题,提出采用金属贴片电磁带隙(EBG)结构在金属波导中创建准 TEM 波.通过理论分析和数值计算,研究金属贴片 EBG 结构创建准 TEM 波对展宽带宽、改善传输特性和增强准 TEM 波电场分布均匀性的作用.模拟结果表明,在频率 14 GHz 附近,金属贴片 EBG 将 TE_{10} 模成功转换成准 TEM 模,转换带宽达到 1.7 GHz,且在波导横截面 83.9% 的面积上电场分布均匀性达到 84.7%.

关键词: 电磁带隙, 金属贴片电磁带隙结构, 磁导体, 准横电磁模波导

PACS: 84.40. Az, 42.70. Qs, 78.20. Bh

1. 引言

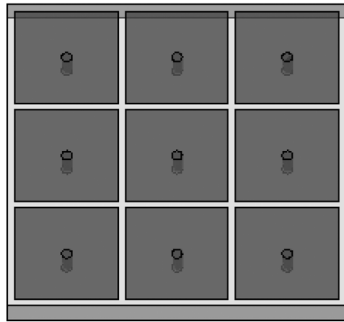
近年来,空间功率合成技术,特别是波导内空间功率合成技术越来越受到人们的关注^[1,2].利用这种技术得到的功率合成器具有辐射损耗小、散热性能良好及合成效率高优点.但由于矩形波导传输模式为 TE_{10} ,横截面上的场分布不均匀,使得经功分器耦合至不同位置放大器输入端的能量不一致,无法保证这些放大器同时达到饱和,从而影响合成效率^[3,4].

光子晶体是一种人造的、具有一定周期性的结构,可以阻止特定频率范围内的光波在其中传播,亦即具有光子带隙(photonic bandgap)特性^[5-7].光子带隙这一概念源于光学领域,后通过缩比关系扩展到电磁波、声波等领域,在微波频段的光子带隙结构也称为电磁带隙(electromagnetic bandgap,简记为 EBG)结构. EBG 结构从理论、制备到实验测试都有相当成熟的技术和设备且发展迅速,目前正在滤波器^[8,9]、微带传输线^[10]、天线^[11]等方面成功得到应用.在金属波导中采用 EBG 结构将 TE_{10} 模转换成准横电磁(TEM)模,能量在波导内分布趋于均

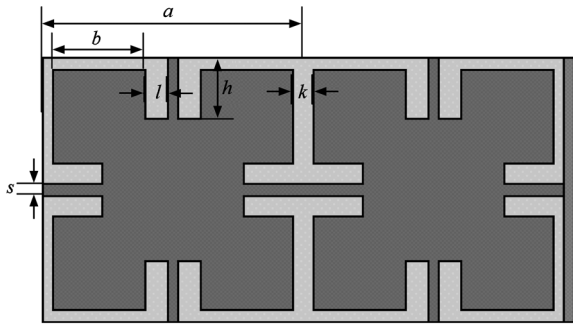
匀,从而推动不同位置的放大器处于同等工作状态,在尽可能不影响系统内电路配置的情况下获得了更好的合成效率和稳定性.

目前,在波导中创建准 TEM 波主要采用 EBG 结构替换金属波导的侧边以形成磁导体,此类结构主要有高阻表面^[12,13]和单面紧凑型电磁带隙(UC-EBG)^[4,14],其结构如图 1 所示.这两种结构的周期单元本身可以等效为谐振特性比较强的并联 LC 电路,单元谐振时电抗无穷大,可以等效为一理想磁导体.但受其本身局域谐振特性较强的影响,这两种结构形成准 TEM 模的带宽都较窄,从而限制了它在一些带宽要求较高领域中的应用.本文针对准 TEM 波导工作带宽较窄这一问题,提出利用金属贴片 EBG 结构在波导中创建准 TEM 波.与 UC-EBG 结构相比,这种金属贴片结构的局域谐振特性较弱,使其能够等效为磁导体的频率范围更宽.以 Ku 波段的标准波导为例,分析这种金属贴片 EBG 结构创建准 TEM 波的工作原理、纵向电场分布、波导中的相速度以及横截面上电场幅值和相位的分布,并与 UC-EBG 结构创建准 TEM 波的一些特性进行比较,研究金属贴片 EBG 结构替换矩形波导侧边形成准 TEM 波的特性.

† E-mail: renlihong1221@sina.com



(a)



(b)

图1 创建准 TEM 波的两 种 EBG 结构 (a)高阻表面, (b)UC-EBG

2. 金属贴片 EBG 结构分析

图2给出了金属贴片 EBG 结构的示意图,该结构制作在普通的微带介质基板上,介质基板一侧印制有周期排列的金属贴片,另一侧为地板.金属贴片 EBG 结构属于二维平面微波光子晶体,结构简单,且不需要介质穿孔等复杂工艺.当电磁波在该结构中传播时,金属贴片表面上会产生感应电流,等效为电感 L ,电荷在相邻金属贴片边缘聚集,等效为电容 C ,故该结构可以等效为并联的 LC 谐振电路模型.

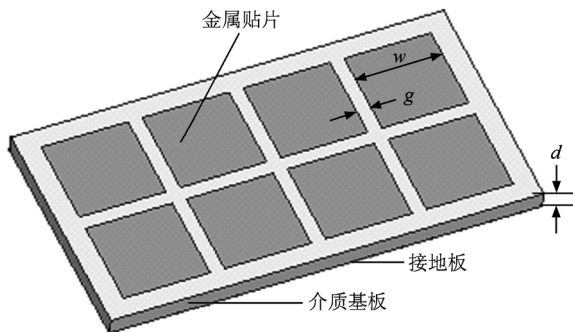


图2 金属贴片 EBG 结构示意图

可将金属贴片 EBG 表面看作是一个表面阻抗为 Z_s 的阻抗表面,其中 Z_s 可以用并联 LC 谐振电路的阻抗来表示,即

$$Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}. \quad (1)$$

谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

根据电磁场原理中的菲涅耳定律,平面波垂直入射在阻抗为 Z_s 的阻抗表面上时,表面的反射系数为

$$\Gamma = \frac{Z_s - \eta}{Z_s + \eta}, \quad (3)$$

式中 η 是自由空间的波阻抗.当 LC 网络发生谐振时,其表面阻抗 Z_s 将趋于无穷大,并且反射系数 $\Gamma = 1$,此时 EBG 结构可以等效为理想磁导体 (PMC),在谐振频率附近,其阻抗也非常大,如图3所示.虽然 EBG 结构不可能在全频段上与 PMC 具有相同的边界条件,但是它会在谐振频率附近的一定频段具有与 PMC 相同的特性,可以看作是人工磁导体.

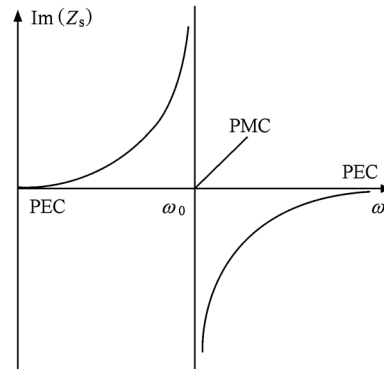


图3 等效谐振电路的阻抗

金属贴片 EBG 结构的谐振频率可以由其反射相位来确定,原理如下:当平面波垂直入射到理想导体 (PEC) 面时,反射系数 $\Gamma = -1$,反射波与入射波相比会产生 180° 的相移.而 PMC 面的反射系数 $\Gamma = 1$,反射波与入射波同相,反射相位为 0° .因此对于相同的外部结构,PMC 与 PEC 的反射波相位差 -180° .计算模型如图4所示,分别放置金属贴片 EBG 结构和 PEC 于相同尺寸的两个波导右端,波导左端为输入端,从而可以计算 EBG 表面和 PEC 表面的相位差 $\phi_{EBG} - \phi_{PEC}$,因此 EBG 表面的反射相位为

$$\phi_r = \phi_{EBG} - \phi_{PEC} + 180^\circ. \quad (4)$$

设计 Ku 波段的金属贴片 EBG 结构参数如下: 贴片宽度 $w = 2.16 \text{ mm}$, 贴片间隙 $g = 0.25 \text{ mm}$, 周期 $a = w + g = 2.41 \text{ mm}$. 选用 RT/Duriod 6010 型介质基板, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 10.2$, 厚度 $d = 0.635 \text{ mm}$. 计算得到该金属贴片 EBG 结构的反射相位曲线如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 在 14 GHz 处其反射相位为 0° , 说明此时 EBG 结构可以等效为 PMC, 此频率点即为该结构谐振点. 一般认为 EBG 结构的反射相位在 0° 附近 $\pm 90^\circ$ 的范围属于同相反射 (in-phase) 区域^[15] (也称反射相位带隙), 在这一范围内 EBG 可等效为磁导体, 亦即该 EBG 结构可以用作磁导体的频率范围为 13.20—14.90 GHz, 相对带宽为 12.2%. 由此可知, 在理论上是可以实现宽带的准 TEM 模波导的.

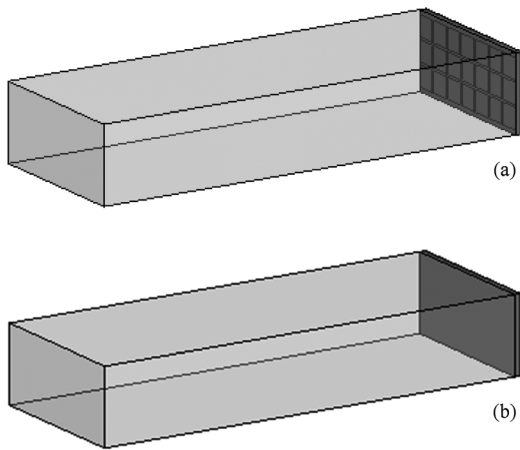


图 4 反射边界模型 (a) 金属贴片 EBG 结构, (b) 理想导体

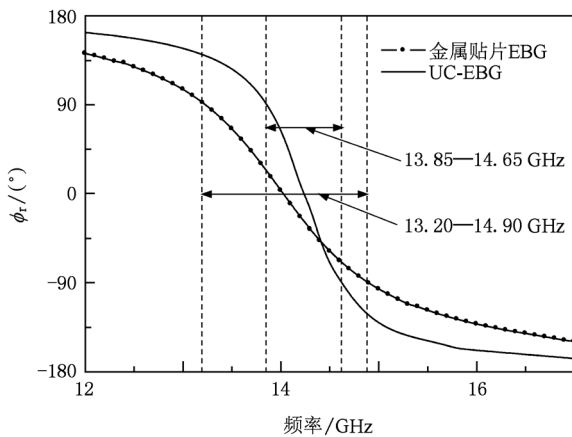


图 5 EBG 结构的反射相位

对于图 1(b) 所示的 UC-EBG 结构, 当其结构尺寸为 $a = 3.04 \text{ mm}$, $b = 1.08 \text{ mm}$, $l = k = 0.25 \text{ mm}$, $s = 0.13 \text{ mm}$, $h = 0.70 \text{ mm}$, 且采用的介质基板与金

属贴片 EBG 结构相同, 其反射相位曲线也在图 5 中给出. 将所设计的金属贴片 EBG 结构与之进行比较, 结果表明: 金属贴片 EBG 结构的反射相位曲线变得更加平坦, 可以等效为磁导体的频率范围增大, 而 UC-EBG 反射相位 $\pm 90^\circ$ 对应的频率范围为 13.85—14.65 GHz, 因此金属贴片 EBG 结构的带宽较 UC-EBG 结构的带宽增加了约 1 倍. 除了带宽优势外, 金属贴片 EBG 结构的周期约为 UC-EBG 结构周期的 4/5, 可以做得更为紧凑. 这不但可以满足带宽要求, 还可满足器件的小型化要求.

数值分析表明, 这种金属贴片 EBG 结构的反射相位带隙宽度与其自身结构参数有关. 若贴片边长 w 增大, 则等效电容 C 增大, 谐振频率 ω_0 和带隙宽度 ω_b 均减小 (ω_b 正比于 $\sqrt{L/C}$); 若贴片边长 w 减小, 则等效电容 C 减小, 谐振频率 ω_0 和带隙宽度 ω_b 均增大. 而相对介电常数 ϵ_r 对带隙宽度 ω_b 的影响与贴片边长 w 对带隙宽度 ω_b 的影响相同, 贴片间隙 g 对带隙宽度 ω_b 的影响则与贴片边长 w 对带隙宽度 ω_b 的影响相反. 若介质基板厚度 d 增加, 则等效电感 L 增大, 谐振频率 ω_0 减小, 带隙宽度 ω_b 增大; 若介质基板厚度 d 减小, 则等效电感 L 减小, 谐振频率 ω_0 增大, 带隙宽度 ω_b 减小.

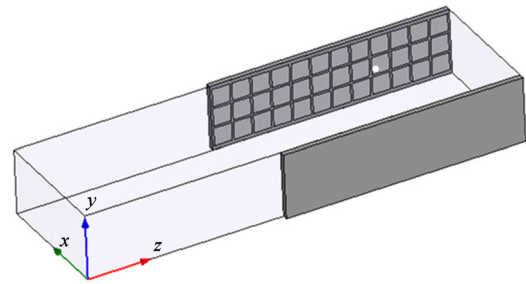


图 6 金属贴片 EBG 替换金属波导侧边模型

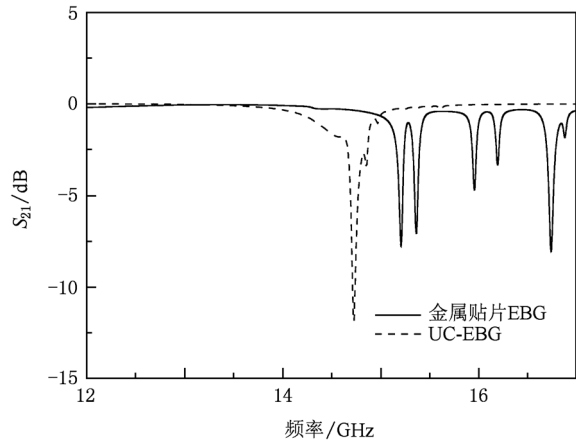


图 7 Ku 波段准 TEM 波导传输曲线

等效电感 L 主要由介质基板的厚度 d 决定, 当制作金属贴片 EBG 的介质基板确定以后, L 的值就基本上确定了. 若要改变带隙的位置和宽度则应调整等效电容 C , 而等效电容 C 的值则与参数 w, g 和 ϵ_r 均有关系. 若要获得宽带隙的 EBG 结构, 则应该选择低介电常数和厚度较大的介质基板, 同时增大单元之间的间距. 这会使结构的尺寸增大, 因此需要综合考虑.

3. 金属贴片 EBG 结构创建准 TEM 模仿真

基于上述理论分析, 采用全波分析软件 Ansoft HFSS 对图 6 所示模型进行仿真, 选用 Ku 波段 WR-62 型标准波导 (15.8 mm × 7.9 mm). 通过观察场图发现, 对于 TE_{10} 波输入, 金属贴片 EBG 结构在不同

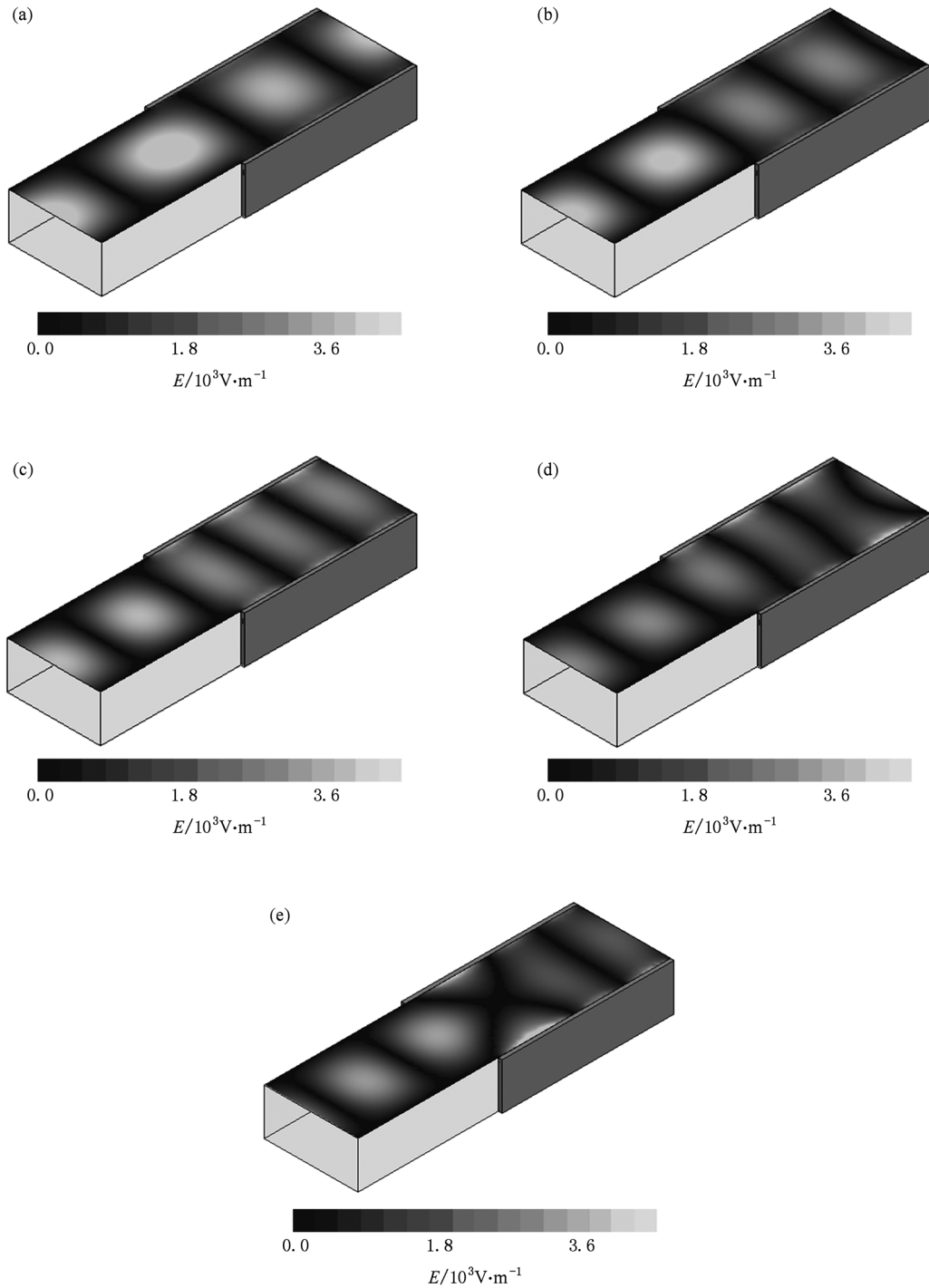


图 8 不同频率对应的 x - z 面电场 E 的分布 (a) 12 GHz, (b) 13.2 GHz, (c) 14.5 GHz, (d) 14.9 GHz, (e) 15.2 GHz

的频率范围表现出不同特点,图 7 和图 8 分别给出了波导内的传输系数 S_{21} 和不同频率点对应的 x - z 面电场分布. 传输曲线表明,在 12—15 GHz 波导内的传输良好,而当频率高于 15 GHz 时,波导内的传输特性变差,出现反射谐振点. 当频率低于 13.2 GHz 时,金属贴片 EBG 结构的反射相位 ϕ_r 趋于 180° ,可以等效为 PEC 面,因此波导内的场结构基本保持不变,传输的模式为 TE_{10} ,12 GHz 时 x - z 面电场分布如图 8(a) 所示. 当频率在 13.2—14.9 GHz 之间时,由上述对图 5 的分析可知,在此频段金属贴片 EBG 结构可以等效为磁导体,从而输入的 TE_{10} 模在金属贴片 EBG 结构区域被转换成准 TEM 模向右传播. 这与将在 14 GHz 附近产生准 TEM 波的预期结果相符. 13.2, 14.5, 14.9 GHz 时 x - z 面电场分布如图 8(b), (c), (d) 所示. 从图 8 可以看出,在未加金属贴片 EBG 结构的波导前半部分,场的模式为 TE_{10} ,而在放置了金属贴片 EBG 结构的波导后半部分,电场分布趋于均匀,即在金属贴片 EBG 结构谐振频率附近, TE_{10} 模被转换成准 TEM 模,转换带宽达 $14.9 - 13.2 = 1.7$ GHz. 在 15 GHz 以上,EBG 结构表现为谐振特性,波导的匹配特性变差,特别是在 15.2 GHz 时波导内发生谐振,使得波导内的传播变差,15.2 GHz 时 x - z 面电场分布如图 8(e) 所示. 此外,UC-EBG 结构形成准 TEM 模波导的传输曲线也在图 7 中给出,在 13.8—14.4 GHz 的频带内形成了准 TEM 模. 不过,UC-EBG 结构在转换频带内传输特性也比金属贴片 EBG 结构差.

4. 准 TEM 模波导的特性分析

4.1. 相速度

图 9 给出的是使用金属贴片 EBG 结构的波导后半部分相速度的计算结果,同时还给出了 Ku 波段标准金属波导相速度的理论值,图中得到的相速度 v_p 是对光速 c 的归一化值. 数据显示,在整个 Ku 波段,EBG 波导的相速度较金属波导有不同程度的降低,相速度减小幅度明显. 这是由于加 EBG 结构以后,沿波导纵向不再是均匀结构而是一种周期结构,周期结构本身所具有的慢波特性和使得电磁波在其中传输时速度降低. 特别是在 14.5 GHz 时,EBG 波导的相速度达到了最小值,为 3.16×10^8 m/s,比相同频率下金属波导的相速度 (3.96×10^8 m/s) 降

低了 20.2%.

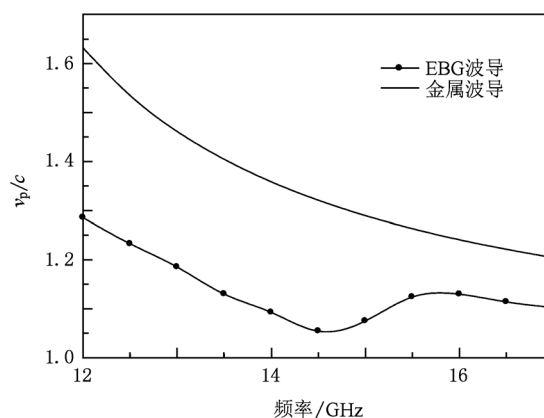


图 9 准 TEM 波导和金属波导的相速度比较

4.2. 横截面电场幅值和相位分布的均匀性

图 10(a) 为 14.5 GHz 时输入端的电场分布,图中曲线为电场强度在横截面上的分布. 从图 10(a) 可以看出,这是标准 TE_{10} 模的电场分布,横截面中心电场强度为 3818.8 V/m,越偏离中心位置电场强度越弱. 图 10(b) 是放置金属贴片 EBG 结构的波导后半部分某一截面上准 TEM 模的电场分布,其横截面中心电场强度为 2222.3 V/m,而处在距左右两壁 1.27 mm 的虚线框内同一量级区域,电场强度最小为 1882.4 V/m,与横截面中心最大场强之比为 84.7%. 而对应于图 10(a) 中相同区域,电场强度最小为 949.2 V/m,与横截面中心最大场强之比仅为 24.9%. 通过比较可知,在准 TEM 模横截面 83.9% 的面积上电场分布是趋于均匀的. 图 10(c) 是使用 UC-EBG 结构形成准 TEM 模的横截面电场分布,电场在横截面 71.3% 的面积上分布比较均匀,因此金属贴片 EBG 结构可以在横截面上更大的区域得到均匀的电场分布.

图 11 是金属贴片 EBG 形成的准 TEM 模的相位分布,同样处于距横截面上左右两壁 1.27 mm 的虚线框内同一量级区域,相位的最小值是 110.23° ,最大值是 110.49° ,相差 0.24%. 这说明波导横截面上的相位分布和标准金属波导一样是均匀的.

通过对横截面上电场和相位的分析可知,采用金属贴片 EBG 结构后,波导内的场结构发生变化,横截面上的电场分布由 TE_{10} 模的正弦电场分布变成趋于均匀的准 TEM 模分布,而横截面上的相位依然保持均匀分布,能够满足波导内功率合成对电场

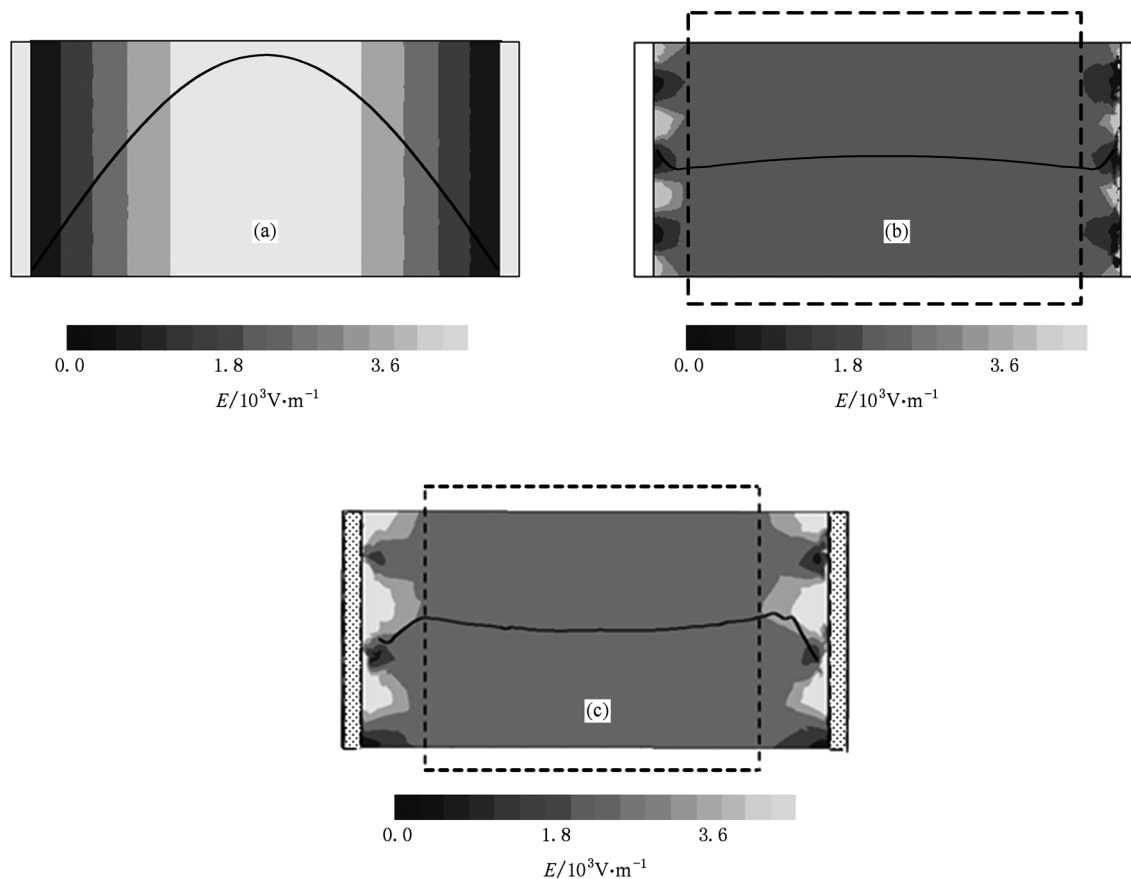


图 10 横截面电场 E 的分布 (a) 输入端 TE_{10} 模, (b) 金属贴片 EBG 形成的准 TEM 模, (c) UC-EBG 形成的准 TEM 模

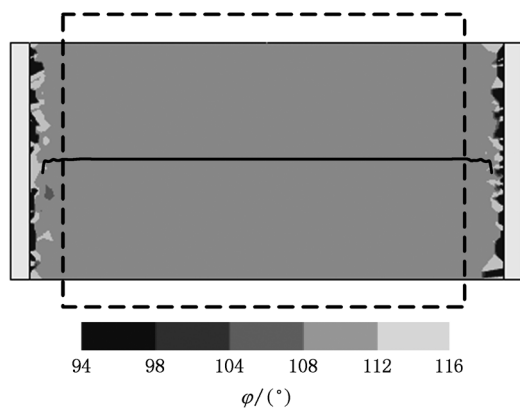


图 11 准 TEM 模的相位 φ 的分布

幅值和相位的要求.

由图 8 和图 10(b) 均可看到在波导两侧壁附近有白色区域, 说明这些区域电场强度较高. 这是因为金属贴片 EBG 结构是在微带线导体带上刻蚀出周期结构, 因此会在导体带与接地面之间形成杂模, 当金属贴片 EBG 结构发生谐振时杂模的能量存储于金属贴片 EBG 结构当中不能传输, 便形

成了上述现象. 这一现象与图 10(c) 的 UC-EBG 结构很相似. 不过, 仿真结果表明金属贴片 EBG 结构的白色区域要小很多, 亦即杂模的电场强度相对较弱.

5. 结 论

本文提出采用金属贴片 EBG 结构在金属波导中创建准 TEM 波的方法, 在理论分析和数值模拟的基础上, 构建了 Ku 波段金属贴片 EBG 波导结构模型. 仿真结果表明, 在中心频率 14 GHz 附近, 准 TEM 模的转换带宽达到 1.7 GHz (相对带宽为 12.2%), 在波导横截面 83.9% 的面积上电场分布均匀性达到 84.7%、相位均匀性良好. 与 UC-EBG 结构相比, 创建的准 TEM 模电场分布的均匀性及范围明显增加、金属贴片 EBG 表面杂模的电场强度大为减弱、带宽增加了一倍以上. 此外, 这种金属贴片 EBG 结构简单, 还具有易加工、结构紧凑、同相反射区域宽等特点.

- [1] Harvey J, Brown E R, Rutledg D B, York R A 2000 *IEEE Microwave Mag.* **48** 48
- [2] Delisio M P, York R A 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **50** 929
- [3] Jia P C, Chen L Y, Alexanian A, York R A 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **50** 1355
- [4] Belaid M B, Wu K 2003 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **51** 684
- [5] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [6] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [7] Ni P G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 340 (in Chinese) [倪培根 2010 物理学报 **59** 340]
- [8] Falcone F, Lopetegi T, Sorolla M 1999 *Microwave Opt. Tech. Lett.* **22** 223
- [9] Liu H W, Sun X W, Li Z F, Qian R, Zhou M 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3082 (in Chinese) [刘海文, 孙晓玮, 李征帆, 钱蓉, 周旻 2003 物理学报 **52** 3082]
- [10] Yang F R, Ma K P, Qian Y, Itoh T 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 1509
- [11] Coccioli R, Yang F R, Ma K P, Itoh T 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2123
- [12] Jim M, Hacker J B, Sailer A L, Kim S, Sievenpiper D, Higgins J A 1999 *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* **47** 543
- [13] Xin H, Chen T C, Kazemi H 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 166
- [14] Yang F R, Ma K P, Qian Y, Itoh T 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2092
- [15] Sievenpiper D, Zhang L, Broas R F J, Alexopolous N, Yablonovitch E 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2059

A quasi transverse electromagnetic mode waveguide developed by using metal-patch electromagnetic bandgap structure

Ren Li-Hong^{1)2)†} Luo Ji-Run¹⁾ Zhang Chi³⁾

1) (Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Datang Mobile Communications Equipment Company Limited, Beijing 100083, China)

(Received 22 September 2010; revised manuscript received 5 January 2011)

Abstract

To solve the narrow operation-band of the electromagnetic bandgap (EBG) waveguide, a quasi transverse electromagnetic (TEM) mode waveguide using the metal-patch EBG structure as sidewall is proposed in this paper. Theoretical analysis and numerical calculation show that broader bandwidth, better transportation property, and more uniform electric field distribution of the quasi-TEM mode can be reached. Simulation results using Ansoft HFSS indicate that the metal-patch EBG structure can convert TE_{10} mode into quasi-TEM mode in the central frequency of 14 GHz with a bandwidth of 1.7 GHz and the uniformity of electric field distribution reaches 84.7% in 83.9% cross section area.

Keywords: electromagnetic bandgap, metal-patch electromagnetic bandgap structure, magnetic conductor, quasi transverse electromagnetic mode waveguide

PACS: 84.40. Az, 42.70. Qs, 78.20. Bh

† E-mail: renlihong1221@sina.com