

## UC-PBG 结构创建准 TEM 波导的仿真分析

张弛<sup>①②</sup> 罗积润<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(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)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 光子带隙(Photonic BandGap, PBG), 是指人造的周期性电介质结构, 它使得在一定频率范围内的电磁波是禁止传播的, 而单平面紧凑型光子带隙结构(UC-PBG)是一种以微带基片为载体的周期性平面光子带隙结构。该文用 UC-PBG 结构置换标准矩形波导窄边, 可在 UC-PBG 结构的谐振频率点附近将  $TE_{10}$  模转变成准 TEM 模。通过对整个系统进行仿真计算, 证实了此方法切实有效, 在 Ku 波段转换带宽达到 450 MHz。

**关键词:** 光子带隙; UC-PBG 结构; 理想磁导体; 准 TEM 波导

中图分类号: TN814

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)02-0454-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00111

## Analysis and Simulation of the Quasi-TEM Waveguide by Using UC-PBG Structure

Zhang Chi<sup>①②</sup> Luo Ji-run<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Photonic BandGap (PBG) is man-made periodic dielectric structure, which may control the propagation of electromagnetic waves in certain frequency range. And the Uniplanar Compact Photonic BandGap (UC-PBG) is a periodic photonic bandgap on a conductor-backed dielectric substrate. This paper introduces a waveguide using the UC-PBG structure, which replace the two bilateral sides of a rectangular waveguide. The simulations with Ansoft HFSS indicate that the  $TE_{10}$  mode can be converted to quasi-TEM mode in the range of 15.15 GHz–15.60 GHz with the UC-PBG structure.

**Key words:** Photonic BandGap(PBG); UC-PBG structure; Perfect magnetic conductor; Quasi-TEM waveguide

### 1 引言

光子带隙的概念源于光子晶体的研究成果, 即将具有不同折射系数的介质在空间按一定的周期排列, 当空间周期与光波长相当时, 由于周期性所带来的布拉格散射, 它能够在一定频率范围内产生“光子禁带”。如果光子的能量落入光子禁带频率范围内, 则不能在介质中传播<sup>[1]</sup>。光子带隙最初始于光学领域, 后通过缩比关系扩展到微波和毫米波频段, 1991 年 Yablonovitch 等制做出了第 1 个具有全方位禁带的微波光子晶体, 其频率带隙为 10–13 GHz。此后, 研究人员又相继报道了 1 维, 2 维及 3 维微波光子带隙结构, 并且在天线, 滤波器以及微带传输线方面得到了良好的应用<sup>[2–4]</sup>。

UC-PBG 是 UCLA 的 Qian 和 Itoh 等提出的一种新型谐振式微波光子带隙结构—单平面紧凑型光子带隙结构<sup>[5]</sup>。这种结构同以往结构的不同之处在于

它不在介质上打孔或利用介质生成具有各种形状横截面的柱状单元, 而是在微带线的导体带上刻蚀出周期性的结构, 便可实现光子带隙的性能。其结构如图 1(a)所示, 深色部分为刻蚀出的金属图形, 金属下面浅色部分为基底。这种结构制作工艺简单, 结构紧凑, 无需多余的电路元件便可实现其阻带特性, 可以有效地抑制微带滤波器中的高次谐波。并且此结构同样对表面波的抑制作用也非常明显, 使得微带天线增益提高, 同时可以降低天线的后向辐射, 这无疑可以大大提高微带天线的效率。此外其平面结构的特性使其更便于同微波电路相集成<sup>[6,7]</sup>。

近年来, 空间功率合成技术, 特别是波导内空间合成技术, 凭借其结构上的特性, 有效地防止了辐射损耗, 同时散热性能良好, 越来越受到人们的关注。但是由于基模在波导横截面上场分布是不均匀的, 因此经过功分器耦合至放大器输入端的能量幅度、相位是不一致的, 无法保证处在不同位置的放大器同时达到饱和, 还可能有烧毁器件的危险,

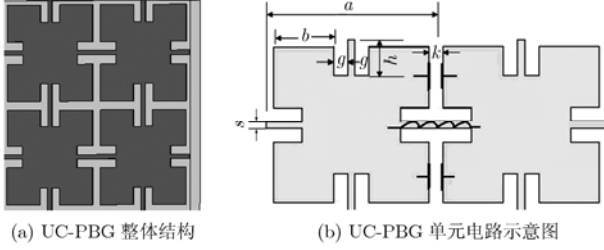


图 1

同时影响合成效率。本文利用 UC-PBG 结构创建的准 TEM 波导, 将 TE<sub>10</sub> 模转换成准 TEM 模, 使波导横截面上的能量分布趋于均匀, 便可推动处于横向不同位置的各个放大器处于同等工作状态, 在不增加额外电路的情况下, 使合成效率和稳定性得到提高。

以下第 2 节分析了 UC-PBG 结构的工作原理并给出等效电路  $L$  和  $C$  的估算方法。第 3 节介绍了采用横向谐振法可以证明将 UC-PBG 结构置换矩形波导窄边后能够获得准 TEM 模。第 4 节将通过仿真计算对准 TEM 波导的形成和特点进行分析。

## 2 UC-PBG 结构工作原理分析

图 1(b)给出了 UC-PBG 单元结构示意图, 图中单元之间的细长金属带(等效为电感  $L$ )和单元之间的空隙(等效为电容  $C$ )并联成一  $LC$  网络, 此网络阻抗为  $Z = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$ 。理想情况下, 当  $LC$  网络发生谐振时, 即  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , 并联  $LC$  电路的阻抗为无穷大, 此时光子晶体结构可等效视为理想磁导体 (PMC), 在谐振频率附近, 其阻抗也非常大, 如图 2 所示。

由上面分析得知, UC-PBG 结构的谐振频率由等效为电感的单元之间的细长金属带和等效为电容的单元之间间隙决定。对于设计来说, 如果知道了具体等效元件的估算方法, 便可通过调节细长金属带的长度和间隙距离来大致选择谐振频率。这里采

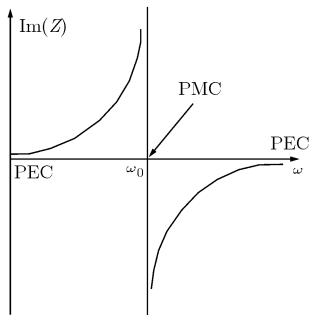


图 2 等效电路的阻抗

用微带线电感设计计算公式为<sup>[8]</sup>

$$L(\text{nH}) = 0.2 \cdot l \cdot \left( \ln \frac{l}{s+t} + 1.193 + 0.2233 \frac{s+t}{l} \right) \cdot k_g \quad (1)$$

其中修正因子  $k_g = 0.57 - 0.145 \cdot \log(s/H)$ ,  $l$  为带状线长度,  $s$  为微带线宽度,  $H$  为基底厚度,  $t$  为微带厚度。

而对电容值的计算采用微带不均匀性缝隙理论计算公式为<sup>[9]</sup>

$$C_1 = 1/2 C_e, \quad C_{12} = 1/2(C_0 - 1/2 C_e) \quad (2)$$

其等效电路如图 3 所示。其中

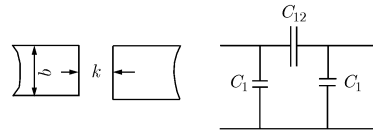


图 3 微带缝隙结构及等效电路

$C_e(\text{pF}) = b \cdot (k/b)^{m_e} \cdot \exp(k_e) \cdot (\epsilon_r/9.6)^{0.9}$ ,  $m_e = 0.8675$ ,  $k_e = 2.043u^{0.12}$ ,  $C_0(\text{pF}) = b \cdot (k/b)^{m_0} \cdot \exp(k_0) (\epsilon_r/9.6)^{0.8}$ ,  $m_0 = u[0.267 \ln(u) - 0.3853]$ ,  $k_0 = 4.26 - 0.631 \ln(u)$ ,  $u = b/H$ ,  $H$  为基底厚度。在  $2.5 \leq \epsilon_r \leq 15$  范围内,  $C_e$  和  $C_0$  均可按照上式计算得到。

为了检验理论计算的准确性, 可以通过计算 UC-PBG 结构反射相位来验证, 其原理为: 对于理想电导体面(PEC)而言, 电磁波照射到表面时, 反射系数  $\Gamma = -1$ , 会产生  $180^\circ$  的相移, 在界面上反射波与入射波是反向的。而对于理想磁导体面(PMC)而言, 其反射系数  $\Gamma = 1$ , 反射信号与入射信号同相, 反射相位为  $0$ 。因此对于相同的外部结构, 理想磁导体边界与理想电导体边界的反射波相位差将达到  $-180^\circ$ 。分别放置 UC-PBG 结构和理想导体于相同尺寸的两个波导右端, 波导左端为输入端, 从而可以计算反射波反射到输入端的相位, 其模型如图 4 所示。图 5 的结果为两个反射相位的差值, 从中看到, 在  $15.45 \text{ GHz}$  处相位差达到  $-180^\circ$ , 说明此时 UC-PBG 结构可以等效看作是 PMC, 此频率点为  $LC$  网络谐振点。而利用上面给出的估算公式计算得到等效电感和电容值分别为  $L = 0.3786 \text{ nH}$ ,  $C = 0.2615 \text{ pF}$ , 因此可得到估算的谐振频率  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 16.0 \text{ GHz}$ 。理论计算的结果与仿真结果比较偏离了  $3.56\%$ , 究其原因主要有两个方面: 其一是估算公式自身的误差。其二, 由于 UC-PBG 结构存在有限边界的影响, 从而公式估算自然也会带来一定程度的误差。

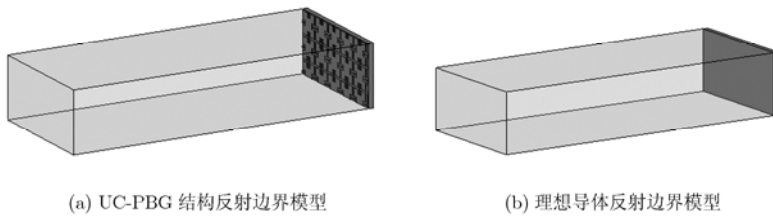


图 4

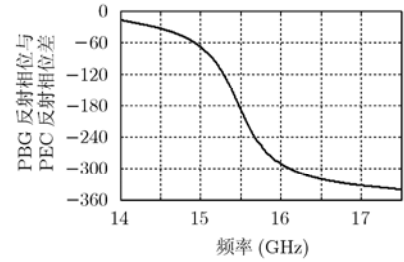


图 5 PBG 反射相位与 PEC 反射相位差

### 3 UC-PBG 结构创建准 TEM 模分析

用 UC-PBG 周期结构置换标准矩形波导窄边后与标准矩形波导连接,左端为  $TE_{10}$  的输入端,右端为输出端,如图 6 所示。为了尽可能地减小由于引入 UC-PBG 结构所带来的反射,将 UC-PBG 结构嵌入到波导窄边,这样便可保持波导宽边的长度不变,其横截面如图 7(a)所示。

本文采用横向谐振法来分析波导中的模式:横向谐振法是利用波导横截面的传输线模式,给出简单且直接的传播常数的计算结果,是利用电路和传输线理论直接分析工作模式传输常数的有效方法。横向谐振法定义在线上任意点向两个方向看去的输入阻抗之和必须为零,即

$$Z_{in}^r(x) + Z_{in}^l(x) = 0, \text{ 对于所有 } x \quad (3)$$

其中  $Z_{in}^r(x)$  和  $Z_{in}^l(x)$  分别为在谐振线上的  $x$  点向右边和向左边看去的输入阻抗。

文献[10]已经证明了当并联网路发生谐振时,UC-PBG 结构可以等效看作是理想磁导体,  $Z_L$  为无穷大,  $k_x$  趋于 0,并且由于采用的是标准波导基模  $TE_{10}$  传输,因此  $k_y = 0$ ,当  $k_x = k_y = 0$  时波导中传播的是 TEM 模。在谐振频率附近由于 UC-PBG 结构的阻抗也非常大,因此将形成准 TEM 模。

### 4 UC-PBG 结构创建准 TEM 模仿真

基于上述理论分析,我们采用全波分析软件 Ansoft HFSS 对图 6 所示模型进行仿真,选用 Ku 波段标准矩形波导 WR-62(15.8 mm × 7.9 mm),介质基片选用 RT/Duriod 6010,其具体参数:厚度  $d=0.635$  mm,介电常数  $\epsilon_r=10.2$ ,损耗角正切为 0.0023,金属导体厚度为 35  $\mu\text{m}$ 。UC-PBG 结构的尺寸如图 1(b)所示:  $a=3.04$  mm,  $b=1.08$  mm,  $g=0.25$  mm,  $s=0.13$  mm,  $h=0.70$  mm,  $k=0.25$  mm。

通过观察场图发现,对于  $TE_{10}$  波输入,UC-PBG 结构在不同频率范围表现出不同的特点。图 8 给出了传输系数随频率的变化关系(a)和准 TEM 模形成的电场分布图(b)。曲线分为 4 个频率区:在 15.15 GHz 以下,即图 8(a)中 A 点之前,由于其频率较

低,波长较长,波长的量级已经大大超过了 UC-PBG 结构中细长金属带的长度量级,因此 UC-PBG 结构几乎不起作用,可以视为理想电导体,因此波导内传输的是  $TE_{10}$  模式。在 15.15–15.60 GHz 之间,即 A 点与 B 点之间,UC-PBG 结构处于横向谐振状态,表现出高导磁性,从而输入的  $TE_{10}$  模在 UC-PBG 结构区域被转换成准 TEM 模,向右传输。这与前面分析所得到的将在 UC-PBG 结构谐振频率点 15.45 GHz 附近产生准 TEM 波的预期结果吻合。图 8(b)为 15.5 GHz 时电场强度分布图,从图中可以清晰看到在未加 UC-PBG 结构的波导前半部,存在模式为  $TE_{10}$ ,而在放置了 UC-PBG 结构的波导后半部分,模式变为准 TEM 模,即  $TE_{10}$  模式被转换为准 TEM 模。在此频点上  $S_{21}=0.86$ ,可知约有 74% 的  $TE_{10}$  的能量转换成了准 TEM 模式。在 15.6–16.0 GHz 之间,即 B 点与 C 点之间,波导内发生纵向串联谐振,因此对  $TE_{10}$  模和准 TEM 模均表现出阻带特性,其电场分布图如图 9。本文主要是利用 UC-PBG 结构形成的高阻抗面,从而在标准波导内形成了准 TEM 模。如果想侧重得到 UC-PBG 的阻带特性,可以调节 UC-PBG 结构的单元尺寸,例如针对图 1(b)给出的尺寸,可以将  $h$  的长度减小,便可使得  $S_{21}$  在某频率点达到近 -40 dB。而在 16.0 GHz 以上,即 C 点之后,由于其频率已经远离谐振频率点,其阻抗接近理想电导体的阻抗,因此 UC-PBG 结构作用大大减小,波导中传输的依然是  $TE_{10}$  模式。

图 10(a)为输入端的电场分布图,是标准的  $TE_{10}$  模式电场分布图:横截面中心电场最强为 4275.1 V/m,两边渐弱,颜色越黑代表场强越弱,图中的曲线代表电场的强度在横截面上的分布。(b)图为输出端电场分布图,其横截面中心电场强度为 2000.4 V/m,而处在虚线框内同一量级区域,电场强度最小处为 1996.6 V/m,最大处为 2336.0 V/m,两者之比为 85.5%。而对应于(a)中相同区域,电场强度最小处为 1920.2 V/m,其与横截面中心最大场强之比为 44.9%。通过比较可知,在输出端横截面大

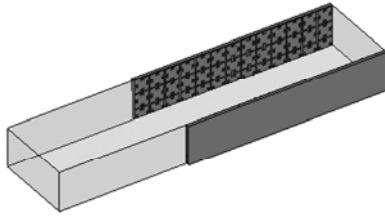
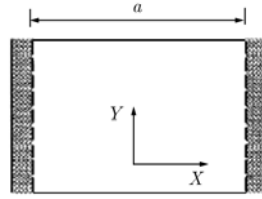
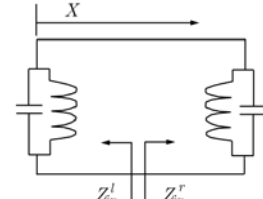


图 6 UC-PBG 结构置换标准波导窄边模型

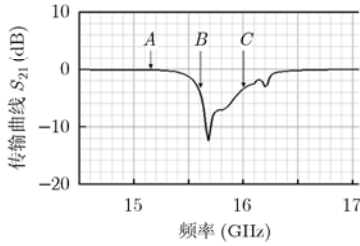


(a) 准 TEM 波导横截面

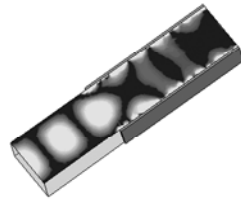


(b) 等效电路

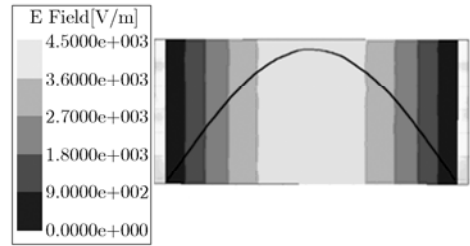
图 7



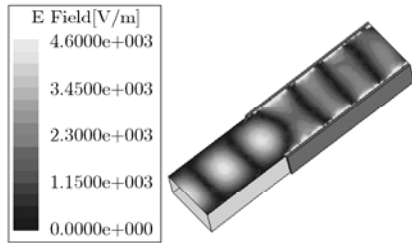
(a) Ku 波段准 TEM 波导传输曲线



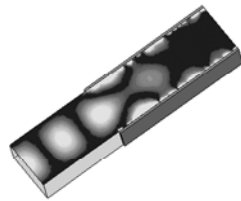
(a) 15.65GHz 时电场分布图



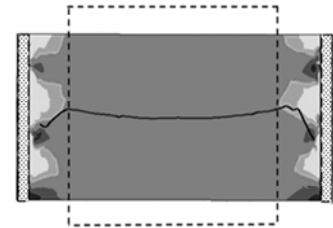
(a) 输入端电场分布图



(b) 15.5GHz 时电场分布图



(b) 15.70GHz 电场分布图



(b) 输出端电场分布图

图 8

图 9

图 10

部分面积上电场分布是趋于均匀的。

从图 8(b)和图 10(b)中,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,通过观察场图发现,当频率位于谐振频率点附近时,这些区域电场强度要远远大于频率远离谐振频率点时的情况。原因为 UC-PBG 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 UC-PBG 结构发生谐振时,杂模的能量存储于 UC-PBG 结构当中不能传输,便形成了上述现象。

### 5 结论

UC-PBG 结构是一项新型的光子晶体结构,它的出现为光子晶体技术的发展注入了新的活力。本文基于 UC-PBG 结构创立理想磁导体的原理和方法,利用微带线的相关原理计算等效电感和电容值,理论计算结果与仿真结果偏离 3.56%。通过将 UC-PBG 结构置换波导窄边,实现了准 TEM 模,转换带宽达到 450 MHz,仿真结果显示准 TEM 模场图形式与预期相符。此种结构的研究和发展对波导内

空间功率合成技术具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-2.
- [2] 付云起, 袁乃昌, 温熙森. 微波光子晶体天线技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 54-58.
- [3] 郑秋容, 袁乃昌, 付云起. 紧凑型电磁带隙结构在短路微带天线中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1500-1502. Zheng Qiu-rong, Yuan Nai-chang, and Fu Yun-qi. Application of compact electromagnetic band-gap structure to shorted micro-strip antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(7): 1500-1502.
- [4] 黄玉兰. 微波电路中的光子带隙结构[J]. 西安邮电学院学报, 2008, 13(1): 22-24. Huang Yu-lan. Photonic bandgap structures in microwave circuits[J]. *Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications*, 2008, 13(1): 22-24.
- [5] Yang Fei-ran, Ma Kuang-ping, and Qian Yong-xi, et al. A Uniplanar Photonic Band-Gap (UC-PBG) structure and its application for microwave circuits[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(8): 1509-1514.

- [6] 周焱, 苏东林, 翟禹. UC-PBG 结构在微带滤波器设计中的应用[J]. 微波学报, 2005, 21(3): 32-35.  
Zhou Yan, Su Dong-ling, and Zhai Yu. Application of UC-PBG structure in microstrip filter [J]. *Journal of Microwaves*, 2005, 21(3): 32-35.
- [7] 王伟, 曹祥玉, 王帅, 等. 平面型紧凑微波光子晶体研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 910-912.  
Wang Wei, Cao Xiang-yu, and Wang Shuai, *et al.* Research on compact uniplanar microwave photonic crystals [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(9): 910-912.
- [8] 吴万春. 集成固态微波电路[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 38-39.
- [9] 高葆新, 洪兴楠, 陈兆武, 等. 微波电路计算机辅助设计(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 47-48.
- [10] Fei-ran Yang, Kuang-ping Ma, and Itoh T. A novel TEM waveguide using uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2092-2098.
- 张 弛: 男, 1982年生, 硕士生, 研究方向为高功率毫米波技术与应用.
- 罗积润: 男, 1957年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率毫米波源技术与应用.