

光子晶体高功率微波模式转换器设计*

王冬^{1)†} 徐莎¹⁾ 曹延伟²⁾ 秦奋¹⁾

1) (中国工程物理研究院应用电子学研究所高功率微波技术重点实验室, 绵阳 621900)

2) (二炮装备研究院, 北京 100085)

(2013年7月4日收到; 2013年9月7日收到修改稿)

研究了传输线中非截面排列金属光子晶体电磁特性, 并利用其作为移相器提出了一种紧凑型 TEM—TE₁₁ 模式转换器的设计方法. 利用电磁软件 cst microwave studio 优化设计了一套 L 波段 TEM—TE₁₁ 模式转换器, 在中心频率 1.58 GHz 上转换效率为 98%. 在 1.56—1.625 GHz 频率范围内, 模式转换器转换效率大于 90%, 对应带宽 4.1%. 模式转换器功率容量为 GW 级, 适用于高功率微波源系统. 结合磁绝缘线振荡器开展了粒子模拟研究工作, 发现模式转换器性能与设计结果相符, 并且其引入不影响高功率微波器件的正常工作.

关键词: 金属光子晶体, 模式转换器, 高功率微波

PACS: 84.40.Az, 84.40.Fe, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.63.018401

1 引言

光子晶体, 是具有不同介电常数的材料周期性排列的人工结构, 自 1987 年提出这一概念以来, 光子晶体研究已成为大家关注的热点. 光子晶体最初是在光学领域提出的, 但由于实际制备相对容易的原因在微波领域得到了广泛的研究和应用, 如光子晶体天线反射面^[1, 2]、光子晶体波导^[3]、滤波器^[4]和谐振腔^[5]等. 这些研究主要集中在常规微波领域, 作为微波领域的一个重要分支, 高功率微波领域的光子晶体应用鲜有报道.

本文主要研究光子晶体在高功率微波模式转换器中的应用. 许多高功率微波源, 如轴向提取的虚阴极振荡器、相对论返波管、多波契伦克夫发生器等几何结构都是旋转对称的. 通常情况下, 其输出模式为低阶 TEM 模或 TM₀₁ 模. 这类具有对称型口径场分布的模式, 直接辐射将导致轴向为零的环状远场方向图. 这种微波辐射场能量分散, 为了获得较好的定向辐射特性, 需要通过模式转换器将 TEM 模或 TM₀₁ 模转换成非对称模式 (如 TE₁₁

模、HE₁₁ 模) 辐射.

在高功率微波领域, 常用的模式转换器是弯曲型模式转换器, 如双弯曲结构模式转换器^[6, 7], 这种结构具有功率容量高、结构简单等特点. 其最大的缺点是输入输出不共轴, 而且弯曲形圆波导不易实现工程加工. 为了克服弯曲形模式转换器的困难, 共轴模式转换器在窄带高功率微波器件中受到了大量研究. 文献^[8]中采用介质移相的方法, 实现了 TEM—TE₁₁ 模式转换, 但是受介质材料的表面击穿影响, 功率容量是该系统的最大瓶颈. 文献^[9]提出一种插板式模式转换器, 将同轴波导分成相速度不等的多个扇形波导分区, 利用微波在各分区内相位传播速度不同来实现模式转换. 但是电磁波在各分区之间相速度差值有限, 因此要实现 TEM—TE₁₁ 的模式转换需要很长的系统结构. 为了缩短插板式结构的长度, 文献^[10]提出了一种折叠波导式模式转换结构, 通过一个交叉的十字形波导将轴向传播的电磁波引入具有不同长度的几个横向波导中, 利用电磁波在横向波导中的路程差产生相位差, 实现 TEM—TE₁₁ 模式转换. 这种结构

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2012B0402066) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: w-d04@caep.ac.cn

减小了系统的轴向长度,但是在横向尺度上加大了系统尺寸,特别是在低频段,横向尺寸增加得比较多.在插板式结构和折叠波导结构的基础上,综合二者优点,作者在文献[11]中提出了一种紧凑型的结构,既保持了折叠波导式结构轴向长度较短的特点,又通过引入多个插板分区调节微波传播相速度,减小模式转换器横向尺寸.与同类结构相比,由于采用全金属结构,该系统还具有较大的功率容量.然而,金属插板和折叠波导等结构的引入,也大大增加了系统的复杂程度.

为了使模式转换器既能实现模式转换功能,又不增加系统复杂性,同时还能具有结构紧凑、功率容量高的特点,作者在研究传输线中金属光子晶体色散特性的基础上,提出了一种利用金属光子晶体色散特性以实现模式转换的想法并设计了一个L波段金属光子晶体型TEM—TE₁₁模式转换器.

2 传输线中金属光子晶体模型

本文研究传输线中非截面排列二维金属光子晶体,结构如图1所示.其中, z 方向为传播方向,假定波导在 z 向为无限长.二维光子晶体排列在 x - z 平面,沿 y 方向,在传输线内部结构是均匀的.传输线为理想传输线,背景材料为真空,其宽度和高度分别为 a 和 b .光子晶体原胞为 $M = ce_x + pe_z$,金属柱可以是任意形状.

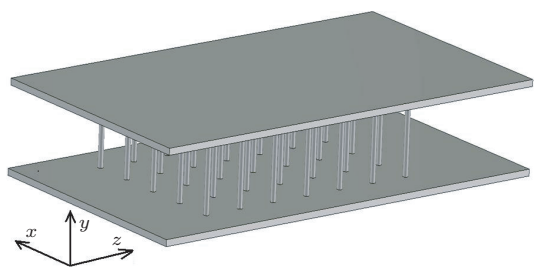


图1 传输线中金属光子晶体及其电路模型

对传输线中非截面排列光子晶体结构[12,13],可能存在的电磁模式为 $E_{(y)}$ 模和HEM模,其中 $E_{(y)}$ 模对应传统光子晶体中E极化模,HEM模是由于金属传输线边界条件导致的混合模式.

图2为传输线中(波矢量 k_z)典型的金属光子晶体色散曲线,从图上可见,对 $E_{(y)}$ 模,由于光子晶体的周期性,该模式存在多个通带(ω_1 — ω_2 , ω_3 — ω_4 , ...).同时,由于传输线边界条件的引入,光子晶体结构还存在高阶电磁模式(HEM_{11} , HEM_{21} , ...).

由于高阶电磁模式的存在,光子晶体沿 z 方向只存在一个介于零频和 ω_1 之间的带隙.

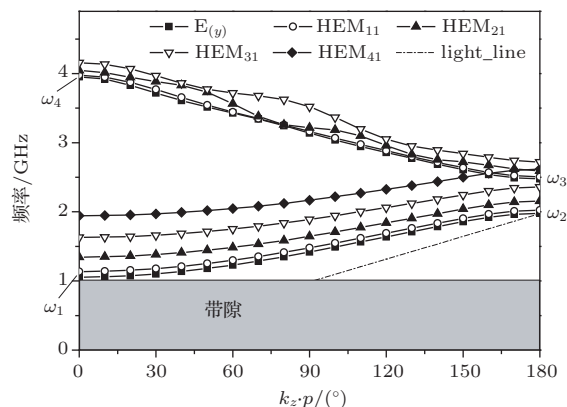


图2 非截面排列金属光子晶体色散关系(4 mm 金属圆柱, $a = 113$ mm, $b = 20$ mm, $c = 70$ mm, $p = 76$ mm)

本文研究的TEM模式,电磁场分布对应于 $E_{(y)}$ 模,因此本文主要研究 $E_{(y)}$ 模第一个通带的电磁特性.从图2可见,与普通传输线相比, $E_{(y)}$ 模为快波系统,在其下截止频率附近电磁波相位传播常数远小于普通传输线中电磁波.

3 光子晶体模式转换器设计原理

光子晶体模式转换器基本原理如图3所示,三个金属板组成双传输线系统,其中一根传输线加载非截面排列的金属光子晶体,另一根不加载.根据图2可知,电磁波在两根传输线内传播相速度不同.因此通过适当选择双传输线系统的长度以及两根传输线内传播电磁波的幅度即可在输出口处获得期望的幅度和相位分布,将上、下两个金属板延长作为引出结构即可实现特定模式设计.

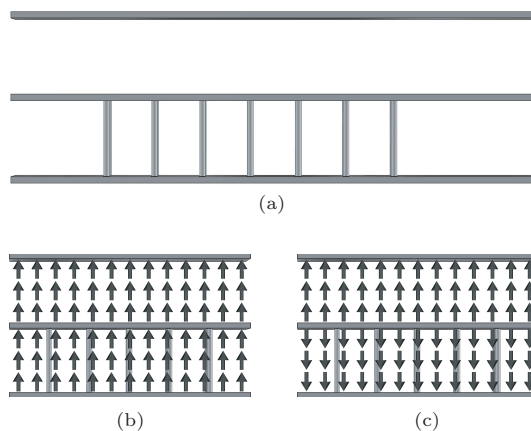


图3 金属光子晶体模式转换器原理 (a) 双传输线结构; (b) 输入口; (c) 输出口

根据双传输线系统的设计原理,在图3所示结

构基础上将中间金属导体改为圆柱形(不改变双传输线的本质), 并且将上、下两根金属板弯曲成扇形结构并逐渐靠拢(如图4(a)), 则可以将三导体传输线系统变换成同轴双导体结构, 即本文提出的TEM—TE₁₁模式转换器, 如图4(b)所示. 在双传输线结构中选择等幅同相微波输入, 通过选择传输线长度使系统输出端微波相位差为180°, 即可实现模式转换, 从图4不难判断其输入输出分别对应于同轴线中的TEM模和TE₁₁模.

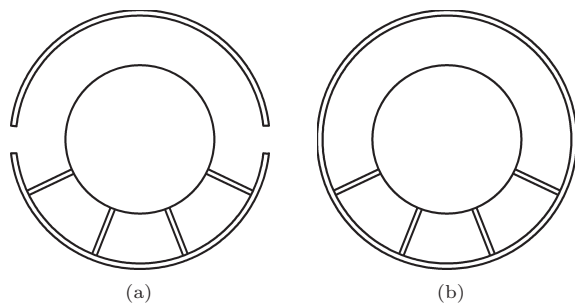


图4 TEM—TE₁₁模式转换器 (a) 双传输线系统; (b) TEM—TE₁₁模式转换器

4 L波段TEM—TE₁₁模式转换器设计

根据上述设计原理设计了一套L波段金属光子晶体型TEM—TE₁₁模式转换器, 该转换器采用

截面为方形的金属杆; 沿传输方向设置3排, 其周期为 p ; 每排包含6根金属杆, 其夹角为 θ . P 和 θ 通过cst microwave studio优化, 取值分别为71 mm和42.5°. 图5为优化后 S 参数, 从图上可见, 模式转换器中心频率为1.58 GHz, 中心频率上模式转换效率为98%. 在1.56—1.625 GHz频率范围内, 模式转换器转换效率大于90%, 对应带宽4.1%, 因此该模式转换器适用于窄带高功率微波源.

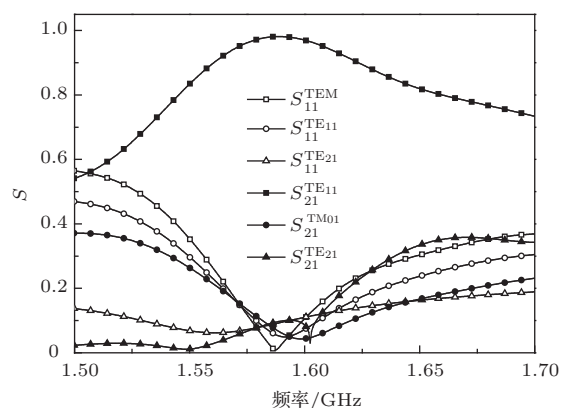


图5 模式转换器 S 参数

模式转换器内场分布如图6所示. 其中, 图6(a)为模式转换器轴向电场分布, 图6(b)—(e)为不同截面上的电场分布. 从图上可见, 微波进入模式转换器后, 分成两部分传播, 其中一部分传输

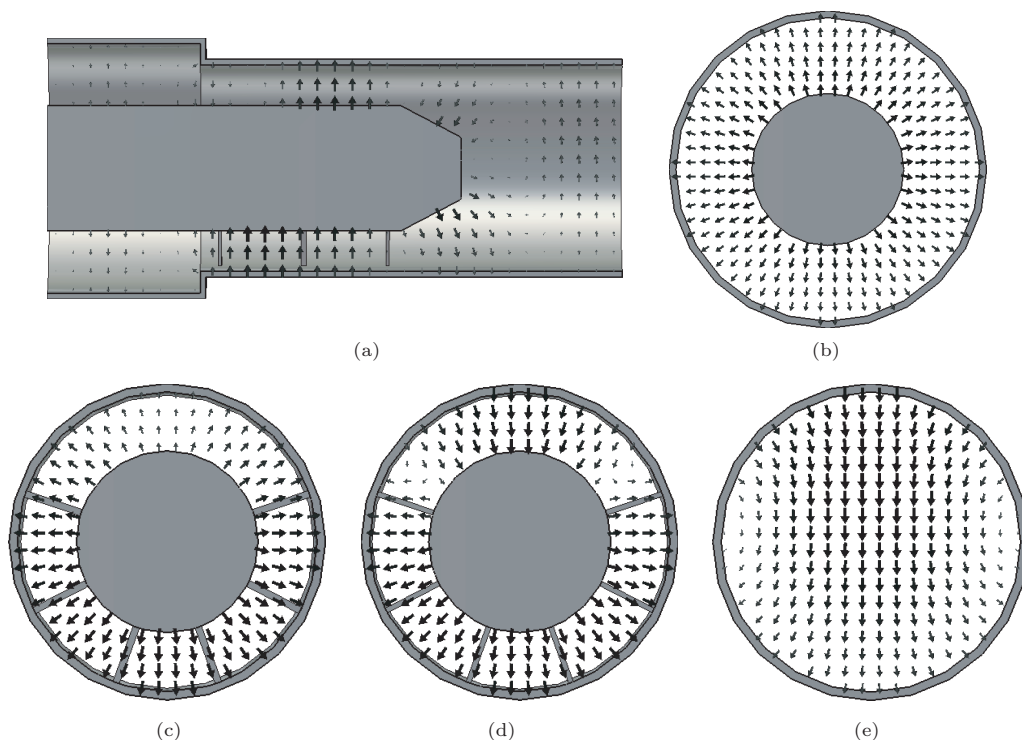


图6 模式转换器内场分布 (a) 轴向分布; (b) 输入口; (c) 前两排金属杆之间; (d) 后两排金属杆之间; (e) 输出口

路径为光子晶体加载的扇形传输线, 另一部分传输路径为普通扇形传输线, 最后在模式变换器末端合成 TE_{11} 模式.

图6中, 当输入电功率1 W时, 最大电场为785 V/m. 按照金属表面射频击穿场强500 kV/cm 估算, 则该模式转换器可以承受GW级微波功率. 该模式变换器长度为22.3 cm, 相当于1.2个微波波长.

5 数值模拟验证

选择磁绝缘线振荡器^[14,15]作为窄带高功率微波器件, 利用粒子模拟方法验证模式转换器工作性能. 如图7所示为模拟结构示意图, 采用笛卡儿坐标系, 网格大小为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$. 模拟计算中, 在微波器件输入入口处馈入理想电压波形, 分别观察器件内电子空间分布、器件输出(模式转换器输入)微波模式、模式转换器输出微波模式、输出微波功率、频谱等信息, 以判断模式转换器工作性能.

模拟计算中器件工作电压620 kV, 电流66 kA,

电子空间分布如图8所示, 从图上可见电子呈轴对称分布, 沿轴向出现两个明显的电子轮辐, 因此模式转换器的引入对不影响器件正常工作.

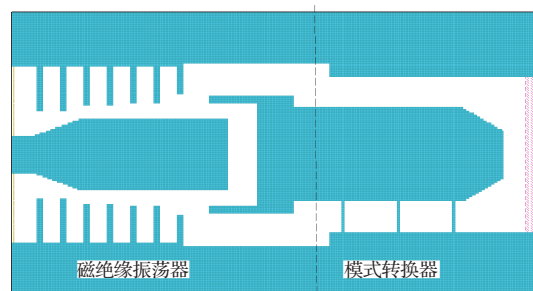


图7 粒子模拟结构示意图

图9所示为器件输出微波模式, 该分布为典型的TEM模分布.

图10为模式转换器出口处观察到的微波模式分布, 输出微波模式为 TE_{11} 模, 与设计结果一致.

全系统输出微波功率4.9 GW, 频率1.57 GHz, 功率效率11.9%, 计算结果如图11所示.

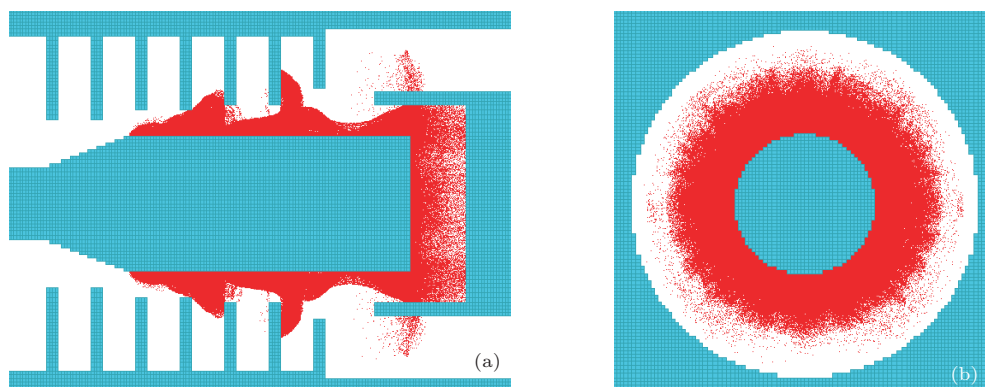


图8 磁绝缘线振荡器电子空间分布 (a) 轴向; (b) 横向

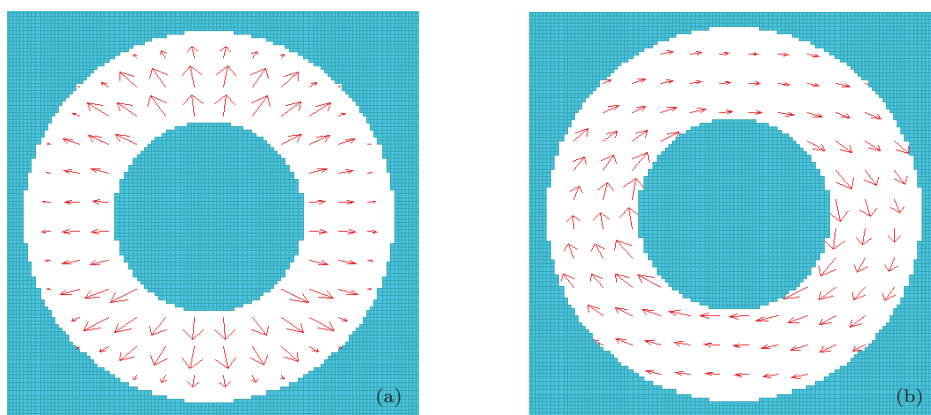


图9 磁绝缘线振荡器输出微波模式 (a) 电场; (b) 磁场

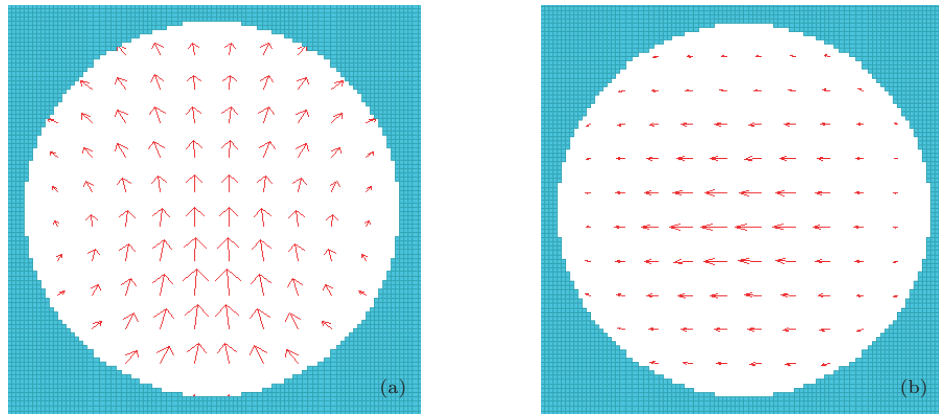


图10 模式转换器输出微波模式 (a) 电场; (b) 磁场

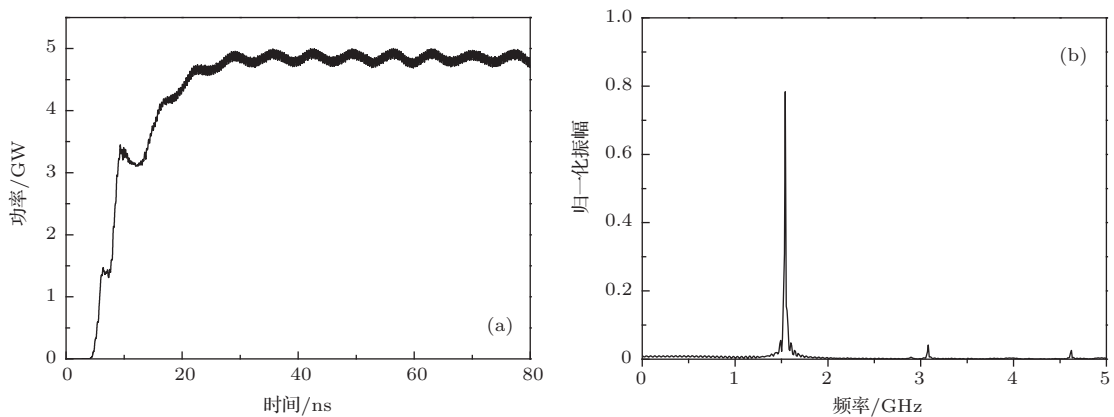


图11 输出功率及其频谱 (a) 输出功率; (b) 微波频谱

6 结 论

本文根据传输线中非截面排列金属光子晶体色散特性设计了一个紧凑型TEM—TE₁₁模式转换器,该模式转换器在中心频率上转换效率大于98%,带宽为4.1%,功率容量为GW级,适合窄带高功率微波源系统.选择磁绝缘线振荡器作为窄带高功率微波器件,利用粒子模拟的方法对该模式转换器工作性能进行了验证,发现模式转换器的引入不影响器件的正常工作,在模式转换器输入、输出口处微波模式分别为TEM模和TE₁₁模,与设计结果一致,全系统输出微波功率5 GW,频率1.57 GHz,效率11.9%.

参考文献

- [1] Poilasne G, Pouliguen P, Mahdjoubi K, Desclos L, Gelin P, Terret C 2000 *Ann. Telecommun.* **55** 207
- [2] Kesler M P, Maloney J G, Shirley B L 1996 *Microwave Opt. Tech. Lett.* **11** 169
- [3] Ederra I, Khromova I, Gonzalo R, Delhote N, Baillargeat D, Murk A, Alderman B E J, De Maagt P 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* **58** 1734
- [4] Rumsey I, Piket-May M, Kelly P K 1998 *IEEE Microwave Guided Wave Lett.* **8** 336
- [5] Sirigiri J R, Kreischer K E, Machuzak J, Mastovsky I, Shapiro M A, Temkin R J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5628
- [6] Yang S W, Qing A Y 2005 *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **33** 1372
- [7] Lawson W, Arjona M R, Hogan B P, Ives R L 2000 *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* **48** 809
- [8] Chen D B, Fan Z K, Zhou H J, Gao F Q, He H, Guo Y H, Wang D, Wang X D, Gong H T, An H S 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1352 (in Chinese) [陈代兵, 范植开, 周海鲸, 高凤琴, 何琥, 郭焱华, 王冬, 王晓东, 龚海涛, 安海狮 2007 强激光与粒子束 **19** 1352]
- [9] Liu Q X, Yuan C W 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1421 (in Chinese) [刘庆想, 袁成卫 2004 强激光与粒子束 **16** 1421]
- [10] Yuan C W, Zhong H H, Zhang J D, Qian B L 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 411 (in Chinese) [袁成卫, 钟辉煌, 张建德, 钱宝良 2009 强激光与粒子束 **21** 411]

- [11] Wang D, Jin X, Chen D B, Qin F, Wen J 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2169 (in Chinese)[王冬, 金晓, 陈代兵, 秦奋, 文杰 2012 强激光与粒子束 **24** 2169]
- [12] Yin H R, Gong Y B, Wei Y Y, Lu Z G, Gong H R, Yue L N, Huang M Z, Wang W X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1590 (in Chinese)[殷海荣, 宫玉彬, 魏彦玉, 路志刚, 巩华荣, 岳玲娜, 黄民智, 王文祥 2007 物理学报 **56** 1590]
- [13] Yin H R, Gong Y B, Wei Y Y, Yue L N, Lu Z G, Gong H R, Huang M Z, Wang W X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3562 (in Chinese)[殷海荣, 宫玉彬, 魏彦玉, 岳玲娜, 路志刚, 巩华荣, 黄民智, 王文祥 2008 物理学报 **57** 3562]
- [14] Wang D, Qin F, Shi M Y, Chen D B, Wen J, Jin X, Xu S 2013 *AIP Advances* **3** 052128
- [15] Wang D, Qin F, Wen J, Chen D B, Jin X, An H S, Zhang X K 2012 *Chin. Phys. B* **21** 084101

Design of a metallic photonic crystal high power microwave mode converter*

Wang Dong^{1)†} Xu Sha¹⁾ Cao Yan-Wei²⁾ Qin Fen¹⁾

1) (Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

2) (The Equipment Research Institute of Second Artillery, Beijing 100085, China)

(Received 4 July 2013; revised manuscript received 7 September 2013)

Abstract

Electromagnetic properties of a two-dimensional metallic photonic crystal in a transmission line is analyzed, and a compact TEM-TE₁₁ high-power microwave mode converter which takes this type of sturcture for phase-shifiting is presented. An L band TEM-TE₁₁ mode converter is optimized using the commercial software cst microwave studio. Its conversion efficiency is 98% at the center frequency of 1.58 GHz. Over the frequency range of 1.56–1.625 GHz, the conversion efficiency exceeds 90%, with a corresponding bandwidth of 4.1%. This mode converter has a gagawatt level power handling capability, thus it is suitable for narrow band high-power microwave application. Using magnetically insulated transmission line oscillator as a high-power microwave source, particle-in-cell simulation is carried out to test the performance of the mode converter. It is found that the proposed mode converter works well with this narrow band high power microwave device.

Keywords: metallic photonic crystal, mode converter, high-power microwave

PACS: 84.40.Az, 84.40.Fe, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.63.018401

* Project supported by China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2012B0402066).

† Corresponding author. E-mail: w-d04@caep.ac.cn