

文章编号: 1672-8785(2011)07-0017-06

低损耗高带宽金属光子晶体弯波导的设计

杨 波^{1,2} 梁静秋¹ 梁中翥¹ 崔乃迪^{1,2} 周建伟^{1,2} 王维彪¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 设计了一种采用金属材料的二维光子晶体波导。针对金属的色散特性, 运用时域有限差分方法对 3 种二维结构的 90° 转弯波导的 TM 波传播特性进行了研究。给出了在合适的填充率下, 转弯效率随周期变化的曲线。最后对其中较优的一种结构作了进一步优化, 使其 3 dB 时的带宽达到了 99 nm, 目标波长处的转弯效率达到了 98.2%。该结构的主要参数为: 晶格常数 $\alpha = 1.190 \mu\text{m}$, 金属柱直径 $R = 0.809 \mu\text{m}$ 。

关键词: 光子晶体; 二维光子晶体波导; 时域有限差分; 金属

中图分类号: O431.1; O734 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.07.003

Design of Low-loss and Wide-band Metallic Photonic Crystal Bend Waveguides

YANG Bo^{1,2}, LIANG Jing-qiu¹, LIANG Zhong-zhu¹, CUI Nai-di^{1,2}, ZHOU Jian-wei^{1,2}, WANG Wei-biao¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A two-dimensional photonic crystal waveguide using metal is designed. The transmission characteristics of TM wave in three kinds of two-dimensional 90° bend waveguides are investigated by using the finite difference time domain (FDTD). The curves of transmission efficiency changed with the period at an appropriate filling factor are given. Finally, the best structure among the waveguides is further optimized to have a bandwidth of 99 nm at 3 dB and a transmission efficiency of 98.2 % at the target wavelength. The lattice constant α and the diameter of the metal pillar R in the structure are 1.190 μm and 0.809 μm respectively.

Key words: photonic crystal; two-dimensional photonic crystal waveguides; finite difference time domain (FDTD); metal

0 引言

光子晶体是一种介电常数呈周期性分布的结构, 其自发辐射抑制和光子局域化的性质使它可以简便而有力地限制和调控光子。Yablonovitch

和 John 最早于 1987 年分别独立地提出了光子晶体的概念^[1-2]。近年来, 光子晶体的应用研究已经取得了很多成果, 例如光子晶体滤波器^[3]、光子晶体激光器^[4]、光子晶体超棱镜^[5]、光子晶体光纤^[6]和光子晶体波导^[7-8]等。

收稿日期: 2011-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60877031)

作者简介: 杨波 (1987-), 男, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 主要从事红外金属光子晶体方面的研究。

E-mail: yangbo8123@163.com

在完整的光子晶体内部引入线缺陷后,原来处于光子禁带范围内的光就会沿着线缺陷进行传播,这就形成了光子晶体波导。损耗和带宽是光子晶体波导的两个关键参数。光子晶体波导中优良的弯曲效应具有重要的应用价值。在普通的光纤波导中,当波导拐弯时,全内反射条件不再适用。因此,在拐角处会损失相当大的一部分能量,从而降低其转弯效率。而光子晶体弯波导利用的是不同方向缺陷模共振匹配的原理。原则上,只要模式匹配,不管拐多大弯,它都能达到很高的转弯效率。

常用的光子晶体材料为普通的半导体介质(如硅等),此外还包括金属型^[9]和金属介质混合型材料。与半导体介质型材料相比,金属型光子晶体具有很多优良特性。首先,对于E极化波来说,金属型光子晶体在零频率和截止频率之间有一个很宽的光子带隙,而半导体介质型材料则不存在这样的性质。其次,在微波波段,二维金属光子晶体可用于制作性能优良的滤波器、偏振器和反射器。由于金属对电磁波的吸收非常小(接近完全反射),其对电磁波的调控作用非常强^[10]。因此,金属光子晶体器件的维度尺寸比通常半导体介质材料光子晶体的小得多,在体积上具有一定的优势,更加有利于器件集成。另外,金属光子晶体可承受更高的功率。具有几百纳米厚的金属层的一维金属-介质光子晶体传输可见光的可行性在理论和实验上已得到证实^[11]。

目前,金属光子晶体研究大多是针对一维结构的^[10,12-14],二维结构的研究还处于带隙研究阶段^[15-18]。2007年,Arafa H A等人用传输矩阵方法研究了一维金属光子晶体的光学特性^[10]。2008年,Kuebler S M等人介绍了一种利用电子束直写制作三维金属-介质光子晶体的方法^[19]。2010年,Kozina O N等人对二维金属光子晶体的TE和TM模式的带隙特征进行了分析和比较^[18]。这些文献主要研究了金属光子晶体的电磁波带隙结构和传播特性等,而对二维金属光子晶体波导的研究比较少。本文基于金属光子晶

体的优良性能,利用时域有限差分方法(FDTD)设计了采用Ag材料的二维金属光子晶体转弯波导,并对3种二维结构的90°转弯波导的TM波传播特性进行了研究。通过优化器件结构,理论上使其3 dB带宽达到了99 nm,在目标波长处的转弯效率达到了98.2%(0.079 dB)。该研究结果为制备金属型光子晶体波导和1.06 μm激光在功率型光子晶体方面的应用提供了参考依据。

1 理论模型

图1所示为正方晶格二维金属光子晶体。其中,金属柱沿Y轴方向无限长,XZ平面内为具有周期性的正方晶格阵列。金属柱材料为Ag,其截面为圆形,直径为R,晶格常数为 α ,背景为空气,相对介电常数 $\epsilon_0 = 1$ 。以 ω_p 表示金属的等离子体频率, γ 表示金属的弛豫率,Ag的介电常量有如下的Drude模型参数^[20]:

$$\omega_p = 2\pi \times 2175 \text{ THz}, \quad \gamma = 2\pi \times 4.35 \text{ THz}$$

采用时域有限差分方法分别对图2、图3和图4所示的3种二维结构的90°转弯波导进行分析和计算。

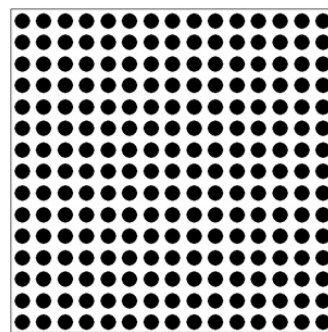


图1 完整的光子晶体

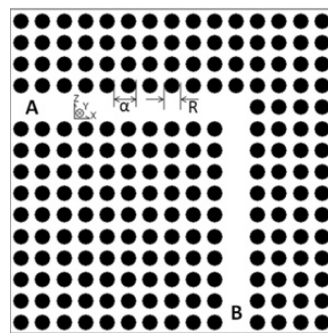


图2 a型转弯波导

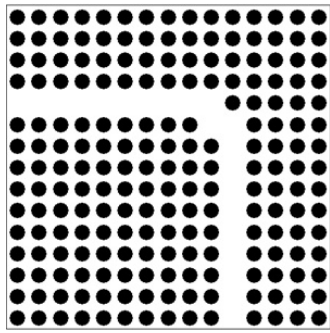


图 3 b 型转弯波导

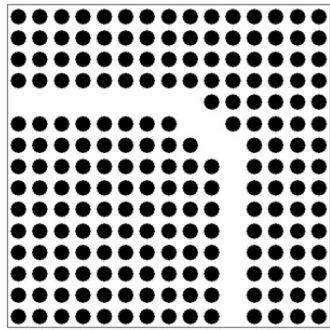


图 4 c 型转弯波导

FDTD 法从麦克斯韦方程组出发^[21-23]：

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{D}_0(\mathbf{r}, t) + \mathbf{P}_d(\mathbf{r}, t)] \quad (2)$$

式中, $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 、 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ 和 μ_0 分别为电场、磁场和自由空间的磁导率, $\mathbf{D}_0(\mathbf{r}, t)$ 为电位移矢量, $\mathbf{P}_d(\mathbf{r}, t)$ 为振荡偶极矩。

用 FDTD 法分离麦克斯韦方程式的差分形式为

$$\mathbf{H}_z|_{i,j}^{n+1/2} = \mathbf{H}_z|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left(\frac{\mathbf{E}_y|_{i,j+1}^n - \mathbf{E}_y|_{i,j}^n}{\Delta x} \right) \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_x|_{i,j}^{n+1/2} = \mathbf{H}_x|_{i,j}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left(\frac{\mathbf{E}_y|_{i,j+1}^n - \mathbf{E}_y|_{i,j}^n}{\Delta z} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_y|_{i,j}^{n+1} = & \frac{\varepsilon_{i,j} - \sigma_{i,j} \Delta t / 2}{M} \mathbf{E}_y|_{i,j}^n \\ & + \frac{\Delta t}{M} \left(\frac{\mathbf{H}_x|_{i,j}^{n+1/2} - \mathbf{H}_x|_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta z} \right. \\ & \left. - \frac{\mathbf{H}_z|_{i,j}^{n+1/2} - \mathbf{H}_z|_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

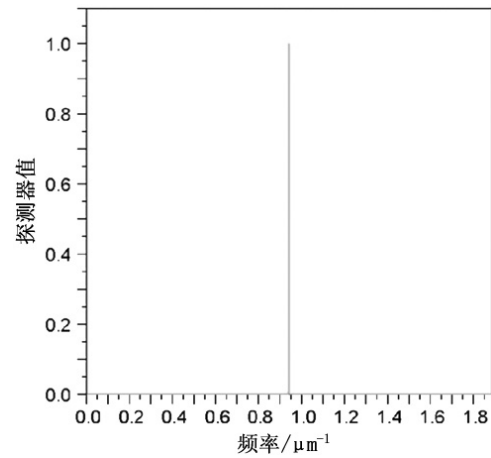


图 5 激励信号的频谱图

光子晶体特性的计算是运用 FDTD 法在有限范围内进行的。为了保证计算中电磁波在光子晶体的边界上没有明显反射, 即电磁波保持“外向行进”的特点, 我们给光子晶体加上边界条件以达到上述要求。在计算中, 我们采用完全匹配层 (PML) 作为吸收边界条件^[24]。激励源的波长设置在 $1.06 \mu\text{m}$ ($1/\lambda = 0.94 \mu\text{m}^{-1}$) 处产生了一个谱宽极窄的激励信号。计算时, 在图 2 的 A 点处加激励源, 在 B 点处接收并记录信号数据, 并比较 A、B 两点的电磁波的强度, 从而得到波导的转弯效率。

2 转弯波导设计

本文所讨论的计算模型全部针对于 TM 模式, 即电场方向平行于单个金属柱所在的方向。对于图 1 中的完整光子晶体, 用 FDTD 法计算得到图 6 所示的带隙结构。其中, 横坐标为填充率 $f = R/\alpha$, 纵坐标为归一化频率 $F = \alpha/\lambda$ 。

在波导结构的设计过程中, 主要考虑以下 3 个因素:

(1) 选择禁带宽度较大的结构。该结构更便于在其中引入缺陷。

(2) 选择禁带归一化频率较高的结构。红外光子晶体波导周期的尺度大多为几百纳米至数微米, 器件制作起来比较困难。由归一化频率 $F = \omega\alpha/2\pi c = \alpha/\lambda$ 可知, F 与 α 成正比。即在同一目标波长 λ 下, 提高归一化频率 α/λ 相当于

增大光子晶体的周期 α ，可使光子晶体的工艺制作变得更加可行。

(3) 晶体结构的填充率必须控制在合理范围内。由填充率 $f = R/\alpha$ 可知， R 与 f 成正比。若填充率太小，则所要制作的金属柱的直径会相应减小，制作难度将会增大。反之，若填充率太大，则所要制作的相邻金属柱之间的空气层的厚度会相应减小，同样也会增加制作难度。在实际制作光子晶体时，填充率在 0.25 ~ 0.8 范围内比较合理。

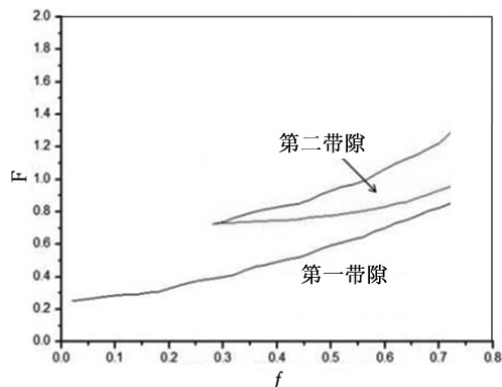


图 6 Ag 正方晶格二维金属光子晶体的带隙结构

对于图 6 所示的带隙结构，综合考虑以上要素，选择填充率 $f = R/\alpha = 0.68$ ，此时的禁带范围为

$$\alpha/\lambda: 0 \sim 0.81, 0.90 \sim 1.19 \quad (1)$$

图 7 为禁带图，其中阴影部分为禁带所在的区域。

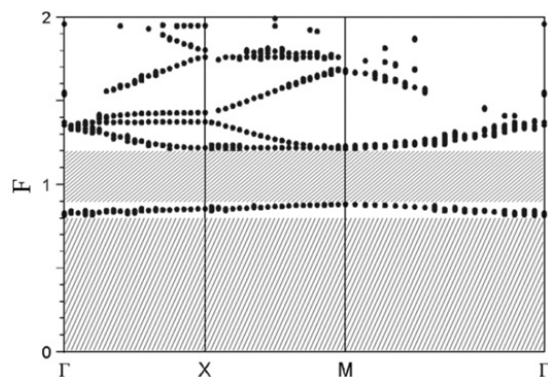


图 7 填充率 $f = 0.68$ 时的光子禁带

由式 (1) 得到使波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 处于禁带范围内的晶格常数 α 的范围为

$$\alpha: 0 \sim 0.86 \mu\text{m}, 0.95 \sim 1.26 \mu\text{m} \quad (2)$$

考虑到后期制作的难易程度，选择 $0.95 \sim 1.26 \mu\text{m}$ 作为计算范围。

在图 1 所示的完整光子晶体中，去除单排金属柱，引入两条互相垂直的线缺陷，从而形成图 2 所示的 a 型转弯波导。填充率已设定为 0.68。通过改变晶格常数的大小使 α 从 $0.95 \mu\text{m}$ 变化到 $1.26 \mu\text{m}$ ，并记录下激励源 A 产生的电磁波经过转弯波导传输到探测器 B 上的能量。图 8 所示为得到的传输效率。其中，横坐标为晶格常数 α (即周期)，纵坐标为传输效率。

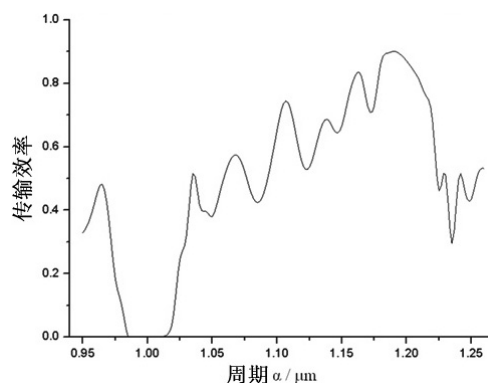


图 8 a 型波导的转弯效率

图 9 和图 10 所示为通过同样的设计过程计算出的 b 型和 c 型转弯波导的传输效率。

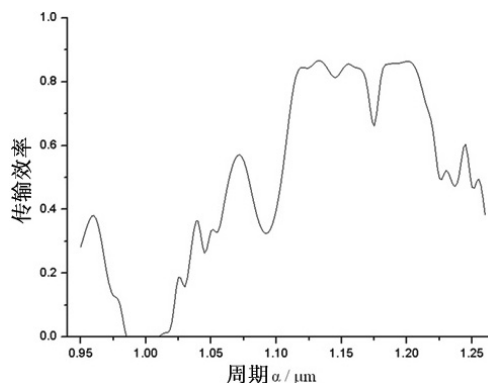


图 9 b 型波导的转弯效率

表 1 列出 3 种类型转弯波导的最高转弯效率及其出现的位置。

通过计算即可得到 a 型波导出现最高转弯效率时的结构参数：晶格常数 $\alpha = 1.190 \mu\text{m}$ ，填充率 $f = R/\alpha$ ，金属柱的直径 $R = 0.809 \mu\text{m}$ 。

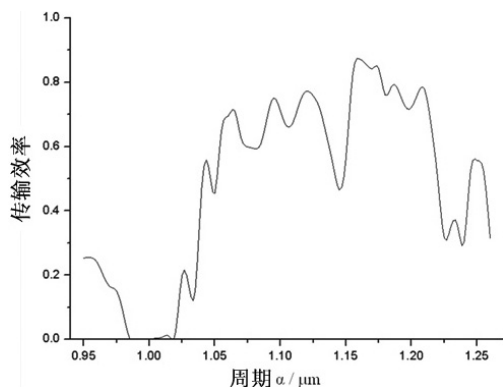


图 10 c 型波导的转弯效率

表 1 转弯波导的传输效率

波导类型	最高转弯效率	相应的晶格常数 / μm
a 型	90.1 %	1.190
b 型	86.4 %	1.200
c 型	87.4 %	1.160

3 转弯波导优化

由表 1 可知, a 型波导的最高转弯效率比 b 型和 c 型波导的高。因此, 进一步的优化过程是基于 a 型转弯波导的。

将 a 型转弯波导拐角处原本缺失的那个金属柱补上, 如图 11 所示。该金属柱的半径为 r 。

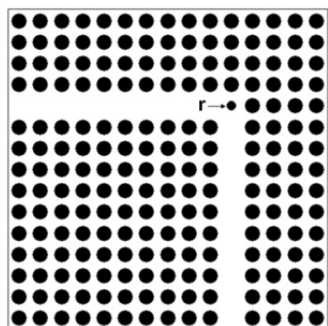


图 11 d 型转弯波导

在 a 型波导原有设计结果的基础上 (即保持晶格常数 $\alpha=1.190 \mu\text{m}$, 金属柱的直径 $R=0.809 \mu\text{m}$ 不变), 改变拐角处金属柱的半径 r 的大小, 使其从 0 变化到 $0.80 \mu\text{m}$ 。同样记录下激励源产生的电磁波经过转弯波导传输到探测器上的能量。图 12 所示为得到的传输效率。

从图 12 中可以看出, 当该金属柱的半径 $r=0.05 \mu\text{m}$ 时, 转弯波导的转弯效率可达到 98.2 % (0.079 dB)。图 13 给出了用 FDTD 法和 PML 吸收边界条件计算得到的 d 型转弯波导的电场分布图。其中, 电磁波高度集中在线缺陷位置上进行传播。若以 3 dB 作为波导带宽的定义范围^[25], 从图 14 中可以看出, 该结构的传输系数小于 3 dB 时所对应的带宽范围为 $1.015 \sim 1.114 \mu\text{m}$, 宽 99 nm。与由半导体介质柱制作的二维光子晶体弯波导的转弯效率和 3 dB 时的带宽 (分别为 80%^[26] 和 0.5 dB^[27]) 相比, 该结构得到的结果

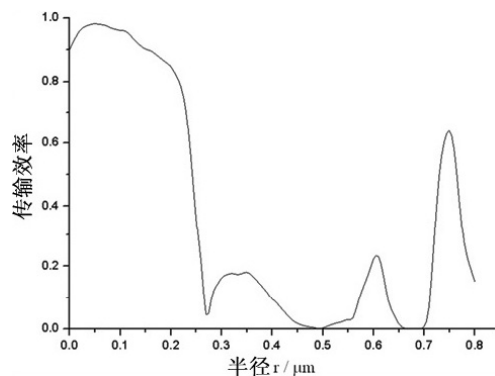


图 12 d 型波导的转弯效率

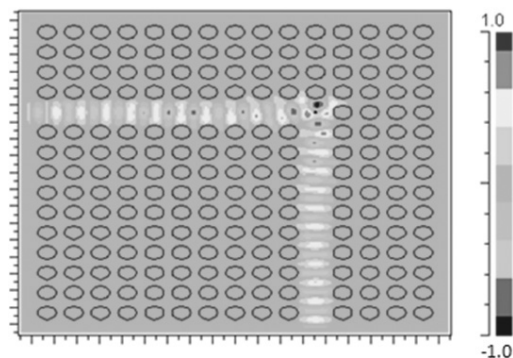


图 13 高斯波在 d 型转弯波导中的传播

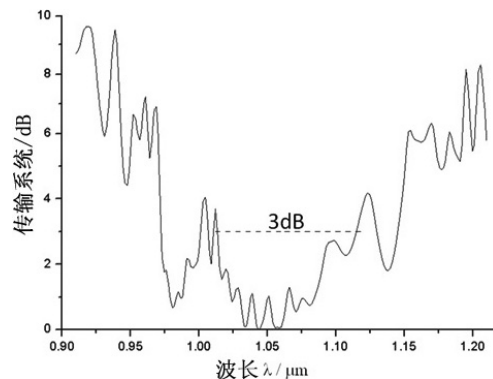


图 14 d 型波导的带宽

有较大幅度的提高。原因主要有两点：一方面，金属光子晶体的带隙普遍比半导体介质柱光子晶体的宽，对电磁波的约束效果更为强烈；另一方面，金属对电磁波的吸收非常小，接近完全反射，因此可以进一步降低损耗。

4 结论

用 FDTD 法研究了由二维正方晶格金属光子晶体线缺陷形成的弯波导的传输特性，设计了采用金属材料的二维光子晶体波导。对 3 种常用的二维光子晶体 90° 转弯波导结构的转弯效率进行了计算，给出了在合适的填充率下，转弯效率随周期变化的曲线。最后对其中较优的一种结构作了进一步优化，理论上实现了目标波长处 98.2 % 的转弯效率和 3 dB 时的 99 nm 带宽。该转弯波导损耗低，带宽高，便于光电集成。另外，器件结构简单，可降低制作难度。

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(20): 2059–2062.
- [2] John S. Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **58**(23): 2486–2489.
- [3] Lmada M. Channel Drop Filter Using A Single Defect in A 2D Photonic Crystal Slab Waveguide [J]. *Lightwave Technol*, 2002, **20**(5): 873–878.
- [4] Dowling J P, Scalora M, Bloemer M J, et al. The Photonic Band Edge Laser: A New Approach to Gain Enhancement [J]. *J Appl Phys*, 1994, **75**(4): 1896–1899.
- [5] Wu L, Mazilu M, Karle T, et al. Superprism Phenomena in Planar Photonic Crystals [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(7): 915–918.
- [6] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, et al. Properties of Photonic Crystal Fiber and the Effective Index Model [J]. *J Opt Soc Am A*, 1998, **15**(3): 748–752.
- [7] Mekis A, Chen J C, Kurland I, et al. High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**(18): 3787–3790.
- [8] Lin S Y, Chow E, Hietala V, et al. Experimental Demonstration of Guiding and Bending of Electromagnetic Waves in A Photonic crystal [J]. *Science*, 1998, **282**(5378): 274–276.
- [9] Poilsne G, Pouliguen P, Mahdjoubi K, et al. Experimental Radiation Pattern of Dipole inside Metallic Photonic Bandgap Material [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1999, **22**(1): 10–16.
- [10] Aly A H, Ryu S W. Study of Optical Properties of Metallic Photonic Crystal [C]. *SPIE*, 2007, **6722**: 67221Z.
- [11] Scalora M, Bloemer M J, Pethel A S, et al. Transparent, Metallo-dielectric, One-dimensional, Photonic Band-gap Structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, **83**(5): 2377–2383.
- [12] 张玲, 梁良, 张琳丽, 等. 一维光子晶体带隙结构研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1815–1818.
- [13] 赵大鹏, 时家明, 刘必强, 等. 一维金属-介质光子晶体光谱特性研究 [J]. *激光与红外*, 2008, **38**(7): 688–691.
- [14] 周鹏, 游海洋, 王松有, 等. 金属插层对一维光子晶体中光传输特性的影响 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(10): 2276–2280.
- [15] 杨光杰, 孔凡敏, 梅良模. 金属光子晶体禁带研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(10): 1821–1823.
- [16] 黎燕林, 薛谦忠, 杜朝海, 等. 修正的频域有限差分法在二维金属光子晶体分析中的应用 [J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2556–2563.
- [17] 孙家兆, 邢怀中. 线缺陷对二维四方圆柱形介质光子晶体禁带的影响 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(5): 389–391.
- [18] Kozina O N, Melnikov L A. Optical Characteristics of The Two-dimensional Photonic Crystals with Nano-size Metal Roads [C]. *SPIE*, 2010, **7712**: 771225.
- [19] Kuebler S M, Tal A, Chen Y S. Preparation of Metallo-dielectric Photonic Crystals by Multiphoton Direct Laser Writing [C]. *SPIE*, 2008, **6901**: 69010Z.
- [20] Kady I E, Sigalas M M, Biswas R, et al. Metallic Photonic Crystals at Optical Wavelengths [J]. *Phys Rev B*, 2000, **62**(23): 15299–15302.
- [21] Sakoda K, Kawai N, Ito T, et al. Photonic Bands of Metallic Systems: I. Principle of Calculation and Accuracy [J]. *Physical review B*, 2001, **64**(4): 045116.
- [22] Le Z C, Yang Y, Quan B S, et al. Nonorthogonal FDTD Simulations for Photonic Band Structures, States Density, and Transmission/Reflection of Photonic Crystals [C]. *SPIE*, 2005, **5624**: 360–369.
- [23] Quan B S, Le Z C, Zhang M, et al. A System Based on Non-orthogonal FDTD Algorithm for Analyzing Photonic Crystals [C]. *SPIE*, 2006, **6352**: 63523B.
- [24] 葛德彪, 闫玉波. **电磁波时域有限差分方法 (第 2 版)** [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [25] Jafarpour A, Reinke C M, Adibi A. Mode Engineering in Ultra-low Loss Bi-periodic Photonic Crystal Waveguides [C]. Laser and Electro-Optics Society, The 18th Annual Meeting of the IEEE, 2005, 22–28(10): 212–213.
- [26] Oliver S. Improved 60° Bend Transmission of Submicrowidth Waveguides Defined in Two-dimensional Photonic Crystal [J]. *Lightwave Technol*, 2002, **20**(7): 1198–1203.
- [27] Lin S Y. Low-loss, Wide-angle Y Splitter at 1.6 μm Wavelength Built with A Two-dimensional Photonic Crystal [J]. *Optics Lett*, 2002, **27**(16): 1400–1402.