

用一维矩形受限光子晶体实现单模传输

熊翠秀¹ 姚映波¹ 蒋练军¹ 邓跃龙² 魏丙涛³

¹ 湖南城市学院通信与电子工程学院, 湖南 益阳 413000
² 益阳医专高等专科学校公共课部, 湖南 益阳 413000
³ 文山学院数理系, 云南 文山 663000

摘要 利用传输矩阵法研究了一维矩形受限光子晶体的反射谱。详细分析了 TE 和 TM 波各模式的光子禁带随矩形尺寸的变化规律。提出可以用矩形受限光子晶体实现电磁波最高模式的单模传输, 尺寸越小越容易实现单模传输, 其中 $X=1, Y=1$ 的尺寸是最佳的结构。

关键词 光学器件; 矩形受限光子晶体; 光子禁带; 矩形尺寸; 单模传输

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.052302

Realization of Single Mode Propagation Using 1D Rectangular Restricted Photonic Crystal

Xiong Cuixiu¹ Yao Yingbo¹ Jiang Lianjun¹ Deng Yuelong² Wei Bingtao³

¹ College of Communication and Electronic Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China

² Department of Public Course, Yiyang Medical College, Yiyang, Hunan 413000, China

³ Department of Mathematics and Physics, Wenshan University, Wenshan, Yunnan 663000, China

Abstract The reflection spectra of the one-dimensional (1D) photonic crystal is researched with the transfer matrix method. The variation characteristics of bandgap of TE and TM modes with rectangular size were analyzed in detail. The results indicate that single mode propagation of the highest mode can be obtained in 1D rectangular restricted photonic crystal, and the smaller the size of rectangular is, the easier single-mode propagation is. The structure with $X=1$ and $Y=1$ is the best one.

Key words optical devices; rectangular restricted photonic crystal; photonic bandgap; size of rectangle; single-mode propagation

OCIS codes 230.5298; 160.5298; 060.5295

1 引言

光子晶体是折射率或介电常数周期性变化的材料, 其概念最早于 1987 年分别由 John^[1] 和 Yablonovitch^[2] 提出。由于光子晶体具有“光子带限”和“光子局域”两个特征, 故光子晶体备受关注。人们对光子晶体进行了一系列的研究, 并且光子晶体在各个领域都有广泛的应用, 如光通信^[3~7]、激光振荡器和稳定系统^[8]、隐身技术^[9,10] 以及光开关^[11] 等。大部分研究把光子晶体视作无限大的器件, 而事实上每个器件都有一定的尺寸, 也就是说光子晶体横向是受限的。对光子晶体进行横向受限研究的文章不多, 这些文章主要研究了矩形横向受限光子晶体的禁带结构、量子效应、缺陷模及光量子阱结构的传输特性等^[12~15], 获得了相应的研究成果。着眼于通信领域的滤波特性, 可以进一步深入研究。

本文采用传统的传输矩阵法, 重点研究了矩形受限光子晶体的光子禁带随矩形尺寸的变化规律, 通过比

收稿日期: 2011-09-29; 收到修改稿日期: 2011-11-27; 网络出版日期: 2012-04-01

基金项目: 湖南省科技计划项目(2010GK3160)、湖南省高等学校科学研究资助项目(10C0314)和 2011 年益阳市科技局资助项目(2011JZ47)资助课题。

作者简介: 熊翠秀(1980—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电磁场理论方面的研究。E-mail: xionguixiu@sohu.com

较 TE 波、TM 波各模式的带隙结构,深入分析了其偏振特性。结果表明矩形受限光子晶体可以实现最高模式的单模传输,通过调整矩形边长的尺寸比,可以实现不同模式的单模传输,其中 $X=1, Y=1$ 的矩形受限光子晶体是最容易实现单模传输的结构。在该情况下,以光子禁带向长波方向的第一个起偏波长为工作波长,可以实现透射方向和反射方向的 TM 和 TE 纯单模传输。

2 理论模型与计算方法

2.1 理论模型

设计这样一种一维光子晶体,它是由两层介质 A、B 周期性叠置组成,介质层 A 是折射率 $n_1=1.38$ 的氟化镁,其厚度为 d_1 ;介质层 B 是折射率 $n_2=2.38$ 的硫化锌,其厚度为 d_2 。两层介质的光学厚度相等: $n_1d_1=n_2d_2=\lambda_0/4$, λ_0 为中心波长。该光子晶体被限制在一个横截面为矩形的理想导体金属筒内,矩形沿 x 方向的长为 a 、沿 y 方向的宽为 b ,且与中心波长的关系为 $a=X\lambda_0, b=Y\lambda_0$,其中 X 和 Y 为矩形边长参数。入射空间和出射空间的折射率都为 $n_0=1$ 。模型如图 1 所示。

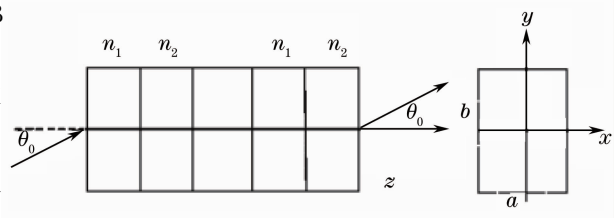


图 1 一维矩形受限光子晶体

Fig. 1 One-dimensional rectangular restricted photonic crystal

在该一维矩形光子晶体中传播的电磁波波矢 \mathbf{k} ($k=\frac{n\omega}{c}$, ω 为圆频率, c 为真空中的光速, n 为折射率) 的三个分量分别为 k_x, k_y, k_z 。设电磁波的传播方向与介质层界面之间的夹角为 θ_0 , 则有以下关系^[14]

$$k^2 \sin^2 \theta_0 = k_x^2 + k_y^2. \quad (1)$$

由分离变量法可得,矩形的金属筒内,TE 和 TM 波的纵向分量分别为

$$H_z(x, y) = H_0 \cos(k_{x\text{TE}}x + \varphi_{x\text{TE}}) \cos(k_{y\text{TE}}y + \varphi_{y\text{TE}}), \quad (2)$$

$$E_z(x, y) = E_0 \cos(k_{x\text{TM}}x + \varphi_{x\text{TM}}) \cos(k_{y\text{TM}}y + \varphi_{y\text{TM}}), \quad (3)$$

电磁波被限制在矩形金属筒内,满足边界条件:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = \rho_s, \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0, \mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0,$$

式中 \mathbf{n}, \mathbf{J} 和 ρ_s 分别是理想导体表面上的法向单位矢、面电流密度和自由电荷密度。考虑无源情况,则根据理想导体边界条件,可得

$$\begin{cases} k_{x\text{TE}} = k_{x\text{TM}} = k_x = \frac{m\pi}{a}, & m = 0, 1, 2, \dots \\ k_{y\text{TE}} = k_{y\text{TM}} = k_y = \frac{n\pi}{b}, & n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

式中 m 和 n 都必须是整数,每一组 (m, n) 的取值对应一个模式的传播矢量 \mathbf{k} , 分别记为 $\text{TM}[m, n]$ 和 $\text{TE}[m, n]$, 取值为 $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。根据(1)、(4)式可得

$$k^2 \sin^2 \theta_0 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2, \quad m, n = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

由(4)和(5)式可知,矩形受限光子晶体中出现了电磁波模式量子化的现象。

2.2 计算方法

根据薄膜光学理论,光在每层介质中的传输特性可用一个 2×2 的特征矩阵表示,对于折射率 n_j 的介质层,其特征矩阵为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{P_j} \sin \delta_j \\ -iP_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中

$$\delta_j = (2\pi/\lambda)n_j d_j \cos \theta_j, \quad P_j = \begin{cases} n_j \cos \theta_j & \text{for TE mode} \\ n_j / \cos \theta_j & \text{for TM mode} \end{cases}. \quad (7)$$

由 N 个周期构成的一维矩形受限光子晶体中电磁波的整体特征矩阵 \mathbf{M} 为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 \cos \delta_2 - \frac{P_2}{P_1} \sin \delta_1 \sin \delta_2 & -\frac{i}{P_2} \cos \delta_1 \sin \delta_2 - \frac{i}{P_1} \sin \delta_1 \cos \delta_2 \\ -iP_1 \cos \delta_2 \sin \delta_1 - iP_2 \sin \delta_2 \cos \delta_1 & \cos \delta_1 \cos \delta_2 - \frac{P_1}{P_2} \sin \delta_1 \sin \delta_2 \end{bmatrix}^N. \quad (8)$$

当此一维矩形受限光子晶体处于真空中时,入射波的反射率 R 可以表示为

$$R = \left| \frac{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 - (M_{21} + M_{22} p_0)}{(M_{11} + M_{12} p_0) p_0 + (M_{21} + M_{22} p_0)} \right|^2. \quad (9)$$

利用(4)~(9)式可以分析该一维矩形受限光子晶体中电磁波各个模式特征及偏振特性。

3 数值计算结果与讨论

通过分析各模式的模式量子数和矩形尺寸对光子禁带的影响来研究电磁波在一维矩形受限光子晶体中电磁波的偏振特性,进一步说明可以用矩形受限光子晶体实现单模传输。以下统一取值 $N=10$,中心波长 $\lambda_0=555$ nm。

3.1 光子禁带随模式量子数的变化

固定 $a=4\lambda_0$, $b=3\lambda_0$,则模式量子数的取值范围是 $m \leq 8$, $n \leq 6$ 。分别取模式量子数 $[0,0]$ 、 $[1,3]$ 和 $[1,4]$,计算一维矩形受限光子晶体的反射谱如图2所示。

分析比较图2中TE波和TM波各模式的禁带结构,可知TE波和TM波的各模式表现出一些相同和不同的特征。相同特征为:1)各模式都有反射率 $R=1$ 的光子禁带;2)TE $[0,0]$ 和TM $[0,0]$ 具有相同的禁带结构;3)随着模式量子数的增大,光子禁带向短波方向移动,这与用色散法得到的结果一致^[14];4)每个模式的光子禁带后面,有数个波长对应反射率 $R=0$,即透射率 $T=1$,相应的入射角称为起偏角,即所谓的“广义布儒斯特角”,相应的波长称为“起偏波长”。

结合图2并读取相应数据可得TE波和TM波的不同特征:1)光子禁带后面第一个起偏波长 λ_{q1} 对应TM $[0,0]$ 、TM $[1,3]$ 、TM $[1,4]$ 分别为691.7、633.8、599.7 nm,而对应TE $[0,0]$ 、TE $[1,3]$ 、TE $[1,4]$ 分别为691.7、660.8、640.3 nm。在相同尺寸下,除了TM $[0,0]$ 和TE $[0,0]$ 之外,任何具有相同量子数的TM $[m,n]$ 和TE $[m,n]$ 的光子禁带结构均不相同,且光子禁带后面TM $[m,n]$ 的第一个起偏波长始终小于TE $[m,n]$ 的第一个起偏波长,即以TM $[0,0]$ 和TE $[0,0]$ 光子禁带为起点,随着模式量子数的增大,每个模式的光子禁带都向短波方向移动,但TM $[m,n]$ 向短波方向移动的速度快于TE $[m,n]$ 。2)量子数相同的TM $[m,n]$ 和TE $[m,n]$ 的光子禁带后面第一个起偏波长差 $\Delta\lambda_{q1}$ 对应 $[0,0]$ 、 $[1,3]$ 、 $[1,4]$ 分别为0、31.2、40.6 nm。即随着模式量子数的增大,TM $[m,n]$ 和TE $[m,n]$ 光子禁带后面向长波方向遇到的第一个广义布儒斯特角对应的“起偏波长”差增大,如TM $[1,4]$ 模式的光子禁带后面第一个“起偏波长”基本上对应于TE $[1,4]$ 模式的光子禁带。3)TM $[0,0]$ 、TM $[1,3]$ 、TM $[1,4]$ 的禁带波长宽度分别为 $\Delta\lambda=183.0$ 、 133.5 、 104.5 nm,而TE $[0,0]$ 、TE $[1,3]$ 、TE $[1,4]$ 的禁带波长宽度分别为 $\Delta\lambda=183.0$ 、 178.2 、 177.0 nm,在模式量子数增大的过程中,TE波和TM波的禁带宽度都在变窄,但TM波的禁带宽度明显变窄,而TE波的禁带宽度变化很小。

3.2 光子禁带随矩形边长的变化

固定矩形受限光子晶体的短边长为 $b=\lambda_0$,长边 a 分别取 λ_0 、 $2\lambda_0$ 和 $3\lambda_0$ 。

3.2.1 同一模式光子禁带随矩形边长的变化

给出TM $[1,1]$ 和TE $[1,1]$ 在以上三种不同尺寸下的光子禁带结构,如图3所示。结合图3,读取TM $[1,1]$ 和TE $[1,1]$ 的禁带波长中心 λ_0 ,并计算禁带宽度 $\Delta\lambda$ 。

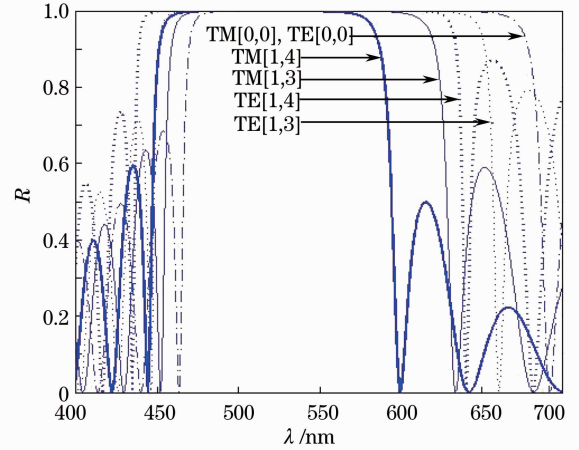


图2 反射率随波长和模式量子数的响应曲线图
Fig. 2 Response curves of reflectivity versus wavelength and mode quantum number

当 $X=1,2,3$ 时, $TM[1,1]$ 的禁带波长中心分别为 $\lambda_{\infty}=510.5, 529.0, 532.0$ nm, 相应的禁带宽度分别为 $\Delta\lambda=91.0, 118.0, 124.0$ nm; $TE[1,1]$ 的 $\lambda_{\infty}=510.5, 543.5, 545.5$ nm, $\Delta\lambda=171.0, 171.0, 171.0$ nm。

从该组数据可得: 1) 无论是 TE 还是 TM 波, 同一模式的光子禁带及禁带波长中心随矩形尺寸的增大向长波方向移动, 这与已有的研究结果一致^[14]; 2) 随着矩形尺寸的增大, TE 波的同一模式禁带宽度基本保持不变, 而 TM 波的同一模式禁带宽度有明显变宽的趋势。

3.2.2 不同模式光子禁带随矩形边长的变化

当 $Y=1$, 长边参数分别取 $X=1, 2, 3$ 时, 能存在的最高模式分别为 $[2,0]$ 、 $[4,0]$ 、 $[6,0]$; 次高级模式分别为 $[1,1]$ 、 $[3,1]$ 、 $[5,1]$ 。分别给出三种尺寸下 TE 和 TM 波的部分模式的光子禁带结构如图 4(a)~(c) 所示。为了说明问题, 三种尺寸下都给出了能存在的最高模式和次高级模式, 图中已标出与各条曲线相对应的模式。结合图 4, 给出三种尺寸下 TM 波的最高模式和次高级模式的光子禁带后面第一个起偏波长 λ_{q1} , 及最高模式与次高级模式禁带后面第一个起偏波长差 $\Delta\lambda_{q1}$ 。分别取 $X=1, 2, 3$, TM 波最高模式的 $\lambda_{q1}=528.5, 528.5, 528.5$ nm; 次高级模式的 $\lambda_{q1}=593.4, 555.0, 534.6$ nm; 则 $\Delta\lambda_{q1}=64.9, 21.5, 6.1$ nm。

由图 4 和以上数据可知, 无论是 TE 还是 TM 波, 矩形的长宽尺寸比越大, 相邻两个模式向长波方向的

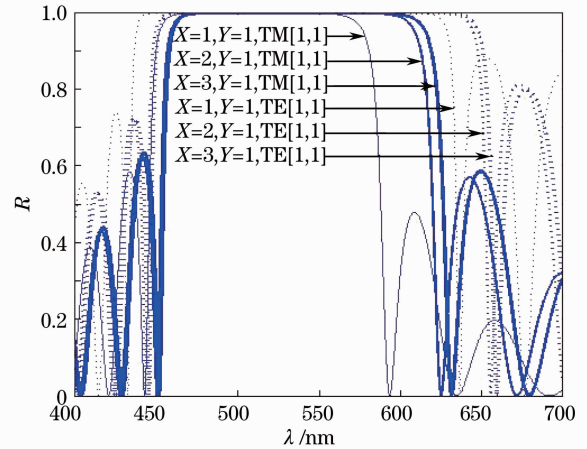


图 3 $[1,1]$ 模式反射率随波长和矩形尺寸响应曲线图
Fig. 3 Response curves of reflectivity versus wavelength and size of rectangle for $[1,1]$ mode

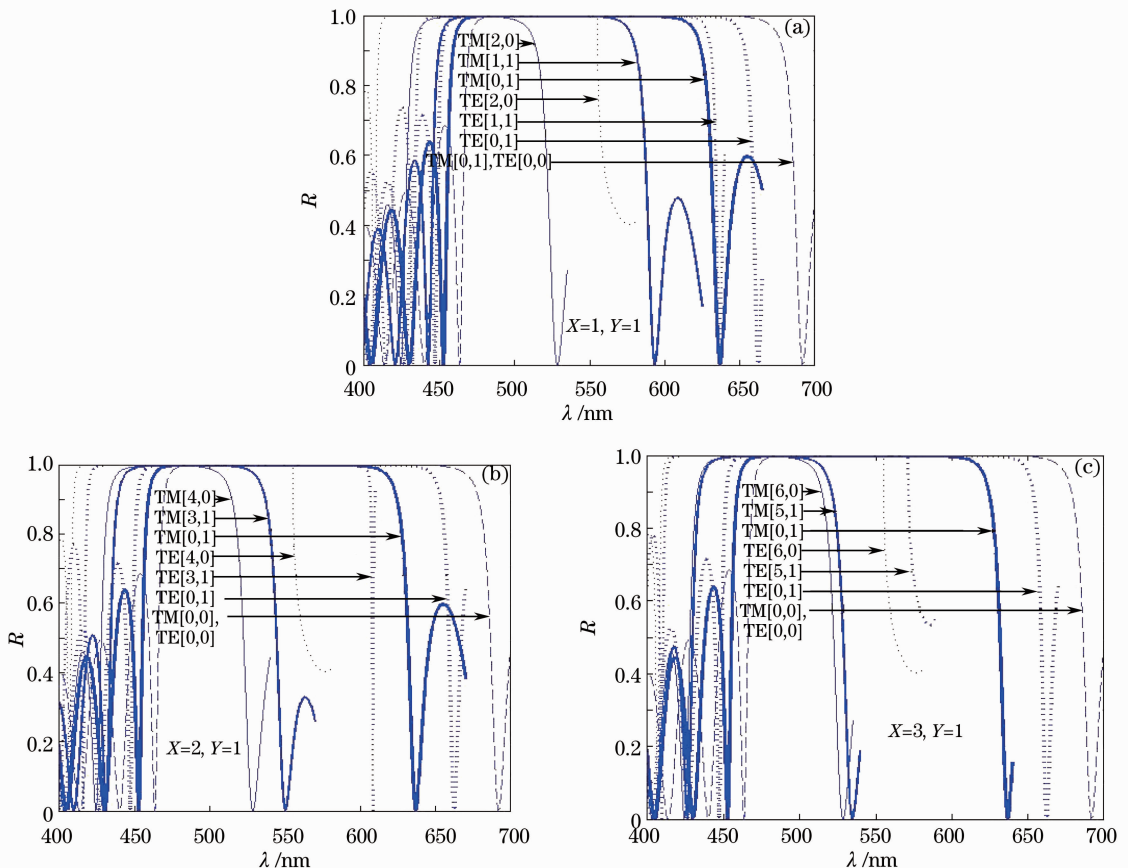


图 4 反射率随波长和矩形尺寸响应曲线图

Fig. 4 Response curves of reflectivity versus wavelength and size of rectangle

第一个起偏角对应的“起偏波长”差 $\Delta\lambda_{qi}$ 越小,这是最关键的一点,如 $a=\lambda_0, b=\lambda_0$ 时 $TM[2,0]$ 与 $TM[1,1]$ 的分离程度很大,但 $a=3\lambda_0, b=\lambda_0$ 时 $TM[6,0]$ 与 $TM[5,1]$ 的分离程度很小。这说明 $a=\lambda_0, b=\lambda_0$ 时,选最高模式 $TM[2,0]$ 的第一个“起偏波长”为工作波长,转动入射波的方向,当满足(5)式时,透射方向能实现最高模式 $TM[2,0]$ 的单模传输,反射方向能实现最高模式 $TE[2,0]$ 模式的单模传输。同样地, $a=2\lambda_0, b=\lambda_0$ 时,反射方向和透射方向分别能实现最高模式 $TM[4,0]$ 和 $TE[4,0]$ 的单模传输;但 $a=3\lambda_0, b=\lambda_0$ 时, TM 波的最高模式 $TM[6,0]$ 与次高级模式 $TM[5,1]$ 第一个“起偏波长”相差很小,选 $TM[6,0]$ 的第一个起偏波长为工作波长时,由于最高模式 $TM[6,0]$ 与次高级模式 $TM[5,1]$ 的反射率相差很小,从透射方向直接观察有两个方向的亮度相差不大,故不能区分是 $TM[6,0]$ 还是 $TM[5,1]$,所以不能实现单模传输。

从以上的分析可知,矩形的长宽尺寸比越大,越难实现单模传输,矩形的尺寸越小,越容易实现单模传输,其中尺寸为 $a=\lambda_0, b=\lambda_0$ 的矩形受限光子晶体最容易实现单模传输,其透射方向和反射方向的单模传输模式分别为最高模式 $TM[2,0]$ 和 $TE[2,0]$ 。这与普通的矩形波导有所不同,普通的矩形波导中,任意尺寸都能实现单模传输,并且其模式为最低模式 $TE[1,0]$ ^[16]。

4 结 论

采用传输矩阵法研究了一维矩形受限光子晶体中的反射谱,重点分析了 TE 和 TM 波各模式的光子禁带随矩形尺寸的变化规律。分析结果表明,一维矩形受限光子晶体在反射方向可以实现 TE 波最高模式的单模传输,而透射方向能实现 TM 波最高模式的单模传输,尺寸越小越容易实现单模传输,其中 $a=\lambda_0, b=\lambda_0$ (即矩形边长参数 $X=1, Y=1$) 的矩形受限光子晶体是最佳的器件。

参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2061
- 2 S. John. Strong localities of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 J. Zaghdoudi, M. Kanzaria, B. Rezig. Design of omni directional asymmetrical high reflectors for optical telecommunication wavelengths[J]. *Eur. Phys. J.*, 2004, **42**(2): 181~186
- 4 Li Chuanqi, Chen Hui, Zhou Xu *et al.*. The research on OCDMA encoder/decoder based on photonic crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2879~2883
李传起, 陈 晖, 周 诤 等. 基于光子晶体波导的光码分多址编解码实现研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2879~2883
- 5 Zhou Jun, Yang Xuexia, Lü Yanqing *et al.*. A circular polarization dual-band microstrip antenna fed by coplanar stripline [J]. *J. Microwaves*, 2011, **27**(4): 73~76
周 鑫, 杨雪霞, 吕艳青 等. 一种共面带状线馈电的圆极化双频微带天线[J]. 微波学报, 2011, **27**(4): 73~76
- 6 Chen Haibo, Hu Sumei, Gao Yingjun. Multiple channeled filters and optical switches using compound photonic crystal with two symmetrical defect layers at the two ports[J]. *Chinese J. Lumines.*, 2010, **31**(1): 7~11
陈海波, 胡素梅, 高英俊. 用两端对称缺陷复合光子晶体实现多通道滤波和光开关[J]. 发光学报, 2010, **31**(1): 7~11
- 7 Zhang Juan, Yu Shuai, Guo Sen *et al.*. Design of flat-top polarization filters based on one-dimensional photonic crystal theory[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105005
张 娟, 于 帅, 郭 森 等. 基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0105005
- 8 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1660~1670
胡明列, 宋有建, 刘博文 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1660~1670
- 9 D. Xiao, H. T. Johnson. Approximate optical cloaking in an anaxisymmetric silicon photonic crystal structure[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(8): 860~862
- 10 Xu Jing, Du Panpan, Li Yujie. Progress on the camouflage application of photonic crystals [J]. *Lasers & Infrared*, 2009, **39**(11): 1133~1136
许 静, 杜盼盼, 李宇杰. 光子晶体在隐身技术领域的应用研究进展[J]. 激光与红外, 2009, **39**(11): 1133~1136

- 11 Chen Heming, Wang Guodong. Design of new photonic crystal all-optical switching based on dynamical shift of defect mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0323006
陈鹤鸣, 王国栋. 一种新型缺陷模迁移光子晶体全光开关设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0323006
- 12 Chen Haibo, Hu Sumei, Gao Yingjun. The study on the transmission characteristics of 1D rectangular restricted PQW structure[J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(3): 290~294
陈海波, 胡素梅, 高英俊. 一维矩形受限光子晶体光传输特性的研究[J]. *光学技术*, 2011, **37**(3): 290~294
- 13 Liu Qineng. Filtering feature of 1D rectangle doping photonic crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2041~2044
刘启能. 一维矩形掺杂光子晶体的滤波特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2041~2044
- 14 Liu Qineng. Transmission characteristics of electromagnetic wave in 1D rectangle photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 847~850
刘启能. 一维矩形光子晶体中电磁波的传输特性[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 847~850
- 15 Liu Qineng. The mode and defect mode of electromagnetic wave in rectangular doped photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2551~2555
刘启能. 矩形掺杂光子晶体中电磁波的模式和缺陷模[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2551~2555
- 16 David M. Pozar. Microwave Engineering [M]. Zhang Zhaoyi, Zhou Lezhu, Wu Deming *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 80~85
波 扎. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明 等译. 北京:电子工业出版社, 2010. 80~85