

文章编号: 0258-7025(2008)04-0567-06

光子晶体太赫兹波导的损耗特性

胡 婕 陈鹤鸣

(南京邮电大学光电工程学院光通信研究所, 江苏 南京 210003)

摘要 提出了一种新型光子晶体太赫兹 (THz) 波导, 该波导包层为硅介质中含有按三角形格子周期排列的空气孔, 纤芯为有机材料聚乙烯 (PE)。应用平面波法 (PWM) 分析了这种光子晶体太赫兹波导的带隙结构, 研究了空气填充率变化对光子带隙 (PBG) 结构的影响; 然后应用频域有限差分法 (FDFD) 对不同参数太赫兹波导的损耗进行了计算。结果表明, 这是一种适合太赫兹波传输的带隙效应波导, 选择较高填充率, 较大孔间距, 较多周期结构层数可以得到较低的泄漏损耗, 选取合适的参数损耗最低值可以达到 1.5 dB/km。

关键词 光电子学; 太赫兹波导; 带隙; 泄漏损耗; 平面波法; 频域有限差分法

中图分类号 O 441 **文献标识码** A

Loss Characteristics of Photonic Crystal Fiber as Terahertz Waveguide

Hu Jie Chen Heming

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract A new type of terahertz photonic crystal waveguide, whose clad made of silicon contains periodic circular air holes arranged as triangular lattice and core is polythene (PE), is presented. Bandgap distribution characteristic of this photonic crystal terahertz waveguide and how air-filling factors affect the bandgap distribution characteristic are investigated by plane wave method (PWM). Then loss characteristics of the photonic crystal terahertz waveguide with different parameters are computed by finite-difference frequency-domain method (FDFD). Results show that this waveguide is a sort of photonic band gap guiding fiber with good capability to transmit terahertz wave. With higher air-filling factors, larger spacing between air holes and more circular structures in the cladding layer, lower leakage loss could be achieved. The lowest loss could be less than 1.5 dB/km if parameters are chosen appropriately.

Key words optoelectronic; terahertz waveguide; bandgap; leakage loss; plane wave method; finite-difference frequency-domain method

1 引 言

太赫兹 (THz) 波的辐射源^[1]、检测器和传输器件的研究是太赫兹领域中重要的组成部分^[2]。在传输方面, 由于太赫兹波在自由空间中的传输损耗很大, 因此, 以波导为基础的太赫兹波器件就成为太赫兹波传输的重要基础, 目前许多科学工作者对此进行了研究, 已有太赫兹金属波导、聚合物波导和塑料

带状波导等不同类型的太赫兹波导器件的研究^[3]。光子晶体光纤 (PCF) 是由英国科学家 St. J. Russell 等于 1996 年研制成功的。根据其不同的导光原理分为全内反射 (TIR) 光纤和光子带隙 (PBG) 光纤^[4]。光子晶体光纤的独特性质可以为太赫兹波的传输提供基础。现在已经有关于使用塑料光子晶体光纤传导太赫兹波的研究^[5]。如何获得太赫兹波

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-10-22

基金项目: 南京邮电大学科研基金 (NY207053) 资助项目。

作者简介: 胡 婕 (1983—), 女, 湖南人, 硕士研究生, 主要从事光通信与光信息处理方面的研究。

E-mail: hujie0616@163.com

导师简介: 陈鹤鸣 (1958—), 男, 江苏人, 教授, 硕士生导师, 主要从事光纤通信与光信息技术方面的研究。

E-mail: chhm@njupt.edu.cn (通信作者)

的低损耗传输介质是太赫兹波研究的重点之一。本文提出一种适合太赫兹波传输的光子晶体波导,着重分析其损耗特性。

2 光子晶体太赫兹波导的带隙及损耗

图 1 是光子晶体太赫兹波导结构示意图。横向截面为硅介质中含有按三角形格子周期性排列的空气孔(图中白色部分),纤芯填充有机材料聚乙烯(PE)。这种光子晶体太赫兹波导的导光机制是光子带隙效应。为了传输太赫兹波,光子晶体的周期性结构应该和波长在一个数量级,光纤的孔径大小应该在几百微米左右,整根光纤的包层外径在毫米量级。

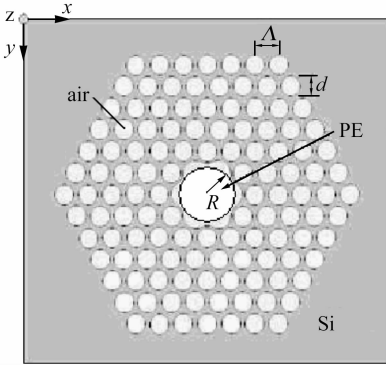


图 1 光子晶体太赫兹波导结构示意图
Fig.1 Cross section of photonic crystal terahertz waveguide

2.1 平面波法

由电磁场理论,在介电系数呈周期性分布的介质中,磁场服从麦克斯韦(Maxwell)方程,可表示为

$$\nabla \times \frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H(r) = \frac{\omega^2}{c^2} H(r), \quad (1)$$

式中 $\epsilon(r)$ 为周期性分布的介电系数, c 为真空中光速, ω 为电磁波频率, H 为磁场强度。通过求解(1)式可以发现,与电子在周期性势场中的薛定谔方程相似,(1)式只在某些特定的频率 ω 处有解。即在介电系数呈周期性分布的结构中存在禁带,频率落在带内的电磁波将无法传播。光子带隙光子晶体光纤包层在横向为周期性结构,在横向形成光子禁带,频率落入禁带范围内的光波被限制在纤芯的缺陷中无法从横向泄漏而只能沿纵向传播,从而实现光子带隙光。(1)式的求解可以通过平面波方法(PWM)^[6]进行。在讨论导光特性时,仅需要得到该光子晶体光纤包层带隙的边界,而无需知道具体的缺陷态,所以在这里采用平面波法计算完整周期性结构的带隙边界。平面波法将场在倒格矢空间表示为平面波

的叠加,从而将麦克斯韦方程组转化为本征方程

$$\sum_{G'} |k + G| |k + G'| | \epsilon^{-1}(G - G') | \times \begin{bmatrix} \hat{e}_2 \hat{e}_2' & -\hat{e}_2 \hat{e}_1' \\ -\hat{e}_1 \hat{e}_2' & \hat{e}_1 \hat{e}_1' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1' \\ h_2' \end{bmatrix} = \frac{\omega^2}{c^2} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 k 为波矢, G 为倒格矢, G' 为倒格矢 G 的转置, h 为平面波。通过求解,可以得到带隙图。不同的包层结构所求得的带隙图不同。光子晶体太赫兹波导是适合于太赫兹波段传输的,纤芯填充有机材料聚乙烯,根据光子带隙导光原理^[7]要同时满足光波频率落入光子禁带范围内和传播模式满足 $\beta\Delta \leq nk\Delta, \beta$ 为模式的传播常数, n 为折射率, Δ 为包层中空气孔间距。这个条件反应在带隙图中,即要求导波线,这里为聚乙烯线($\beta\Delta = nk\Delta$)与禁带有重叠。从而由带隙图可以得到某种结构参数下的导波频率。

2.2 频域有限差分法

对于在轴向折射率没有变化的光子带隙光纤来说,沿着轴向传播的电磁场具有传播形式

$$\begin{aligned} E(x, y, z) &= E(x, y) \cdot e^{-i(\omega t - \beta z)}, \\ H(x, y, z) &= H(x, y) \cdot e^{-i(\omega t - \beta z)}, \end{aligned} \quad (3)$$

则介质中的麦克斯韦方程可表示为

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= -ik_0 \epsilon E, \\ \nabla \times E &= ik_0 H, \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式中用归一化的电场 $\tilde{E} = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} E$ 代替原来的电场,其中 k_0 为自由空间波数。对(4)式进行基于 Yee 元胞的差分离散(频域有限差分法(FDFD))^[8]离散方程中电场和磁场在各节点的空间分布如图 2 所示,并消去 z 方向的场分量,得到方程组

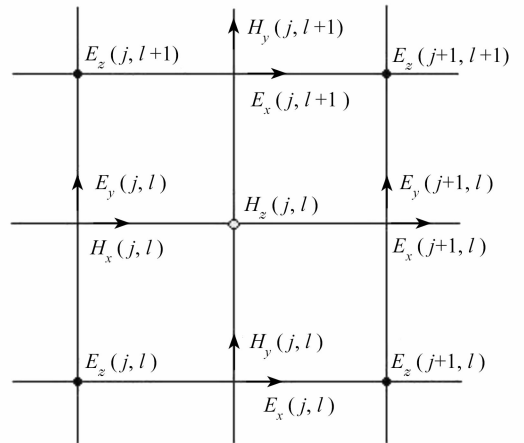


图 2 电场和磁场在各节点的空间分布

Fig.2 Electric field and magnetic field distributing on space nodes

$$\begin{aligned}
\frac{\beta}{k_0} E_x(i, j) &= -\frac{1}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta x \Delta y} [H_x(i, j-1) - H_x(i, j) - H_x(i+1, j-1) + H_x(i+1, j)] + \\
&\quad \frac{1}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta x^2} H_y(i-1, j) + \left(1 - \frac{2}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta x^2}\right) H_y(i, j) + \frac{1}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta x^2} H_y(i+1, j), \\
\frac{\beta}{k_0} E_y(i, j) &= \frac{1}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta x \Delta y} [H_y(i-1, j) - H_x(i, j) - H_y(i-1, j+1) + H_y(i, j+1)] - \\
&\quad \frac{1}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta y^2} H_y(i, j-1) - \left(1 - \frac{2}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta y^2}\right) H_x(i, j) - \frac{1}{k_0^2 \epsilon_{zz} \Delta y^2} H_y(i, j+1), \\
\frac{\beta}{k_0} H_x(i, j) &= \frac{1}{k_0^2 \Delta x \Delta y} [E_x(i-1, j) - E_x(i, j) - E_x(i-1, j+1) + E_x(i, j+1)] - \\
&\quad \frac{1}{k_0^2 \Delta x^2} E_y(i-1, j) - \left(\epsilon_{yy} - \frac{2}{k_0^2 \Delta x^2}\right) E_y(i, j) - \frac{1}{k_0^2 \Delta x^2} E_y(i+1, j), \\
\frac{\beta}{k_0} H_y(i, j) &= -\frac{1}{k_0^2 \Delta x \Delta y} [E_x(i, j-1) - E_y(i, j) - E_y(i+1, j-1) + E_y(i+1, j)] + \\
&\quad \frac{1}{k_0^2 \Delta y^2} E_x(i, j-1) + \left(\epsilon_{xx} - \frac{2}{k_0^2 \Delta y^2}\right) E_x(i, j) + \frac{1}{k_0^2 \Delta y^2} E_x(i, j+1), \tag{5}
\end{aligned}$$

将(5)式写成矩阵形式,得到本征方程

$$\frac{\beta}{k_0} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{bmatrix} = [\mathbf{Q}] \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \tag{6}$$

求解本征方程可得到 E_x, E_y, H_x, H_y 。

完全匹配层(PML)是在频域有限差分法区域截断边界处设置的一种特殊介质层。该层介质的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配,因而入射波将无反射地穿过分界面而进入完全匹配层。并且由于完全匹配层为有耗介质,进入完全匹配层的透射波将迅速衰减,使有限厚度的完全匹配层对于入射波仍然有很好的吸收效果。使用 Sacks 和 Gedney 提出的各向异性介质的完全匹配层^[9]后同样可得到本征方程(6),但是这时矩阵 \mathbf{Q} 的值与边界条件有关。求矩阵 \mathbf{Q} 的本征值,得到一个复数,该复数的实部为包层的有效折射率 n_{eff} ,虚部则与光子带隙光子晶体光纤的损耗有关。可近似计算光子带隙光子晶体光纤的泄露损耗^[10]

$$L_c = 8.686 \times \text{imag}(\beta) \quad (\text{dB/m}). \tag{7}$$

光波导的损耗机制主要有三种:即光能量的吸收损耗、散射损耗和辐射损耗。吸收损耗与光波导的材料有关,散射损耗则与光波导材料及光波导中的结构缺陷有关,而辐射损耗是由光波导几何形状的微观和宏观扰动引起的。在太赫兹频率范围内硅材料损耗较高,在空气中也有较大的吸收损耗,可以在纤芯填充低损耗有机材料如聚合物来构造太赫兹波导。相对于其他聚合物,聚乙烯(PE)具有明显的

优势。在频率从0.1~2 THz范围内,介电常数保持不变,材料的色散对总色散贡献较小,在材料色散为零的太赫兹频率处,介电常数的虚部接近零。这为构造低损耗太赫兹波导提供了可能。选取合适的纤芯半径,表面模可以得到消除^[11]。在光子带隙光纤中光被限制在纤芯中传播,理论上应该具有极低的损耗。但实际上制作的光子带隙光纤的损耗与普通单模光纤(0.2 dB/km)相比还有很大的差距。这主要是由于实际制造的光子带隙光纤包层都是有限层,所以引起能量在横向的泄漏。因此在分析该种光波导的损耗特性时主要考虑其泄露损耗。本文采用完全匹配层作为吸收边界条件的频域有限差分法计算泄露损耗。

3 计算结果与分析

光子晶体太赫兹波导结构的重要参量有:介质折射率 n_b ,空气折射率 n_a ,纤芯有机材料折射率 n_c ,空气孔间距 Λ ,纤芯半径 R ,空气孔直径 d ,包层层数 n 和空气孔直径与空气孔间距比 d/Λ ,图1为包层是三角形结构、空气孔层数为5层、介质材料为Si的光子晶体太赫兹波导横截面。介质硅材料在太赫兹波段折射率变化很小,仍然可取 $n_b = 3.4$,而纤芯有机材料聚乙烯在太赫兹波段的折射率可取 $n_c = 1.5263$ 。另外,斯坦福大学的 Hyang Kyun Kim 等通过数值计算证明纤芯的大小和形状能够决定表面模的存在与否,以及表面模的数量。他们发现纤芯半径在 $0.8 \sim 1.1\Lambda$ 范围时几乎不存在表面模^[11]。在下面的计算中取 $R = \Lambda$ 。

仿真计算时,首先通过平面波法得到光子晶体太赫兹波导完整结构的带隙图,找到对应结构参数下的导光频率,然后用频域有限差分法计算泄露损耗。计算时采用了完全匹配层作为吸收边界条件。通过取不同的结构参数讨论光子晶体太赫兹波导在太赫兹波段如何得到较理想的损耗特性。

3.1 三角形晶格结构光子晶体太赫兹波导在不同 d/Λ 时的带隙结构

图 3(a)~(d)给出了当 $n = 5, n_a = 1.0, n_b = 3.4, n_c = 1.5263$, 固定 Λ , 改变 d , 使 d/Λ 分别为 0.88, 0.90, 0.92, 0.96 时三角形结构的带隙图。从图 3(a)~(d)可以看出,随 d/Λ 值的增大,传播线保

持不变,当 d/Λ 取 0.92 时带隙效果最佳,与传播线 $\beta\Lambda = n_c k\Lambda$ 的交叠部分也最多。通过计算可以得到,当 d/Λ 取 0.92 时该光纤可传播的频率范围大约在 2 THz 左右。因此合理选择 d/Λ 比对带隙效应导光具有重要作用。

3.2 不同参数下光子晶体太赫兹波导的损耗特性

由带隙图可以得到不同 d/Λ 时光子晶体波导可传输的波长范围。然后利用频域有限差分法计算其相应波长的泄漏损耗,最后将损耗值拟合成损耗曲线。

图 4 是计算时所用的 1/4 光子晶体太赫兹波导结构图。计算时取空间距 $\Lambda = 150 \mu\text{m}$, 空气孔层

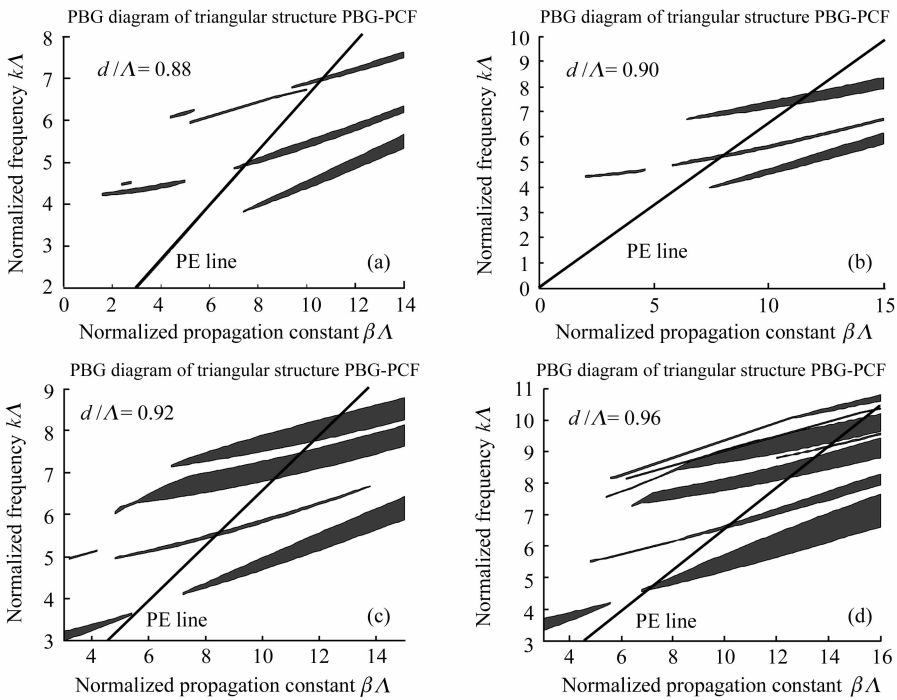


图 3 对于不同 d/Λ 的三角形晶格结构带隙

Fig. 3 Triangular structure band gap with different d/Λ

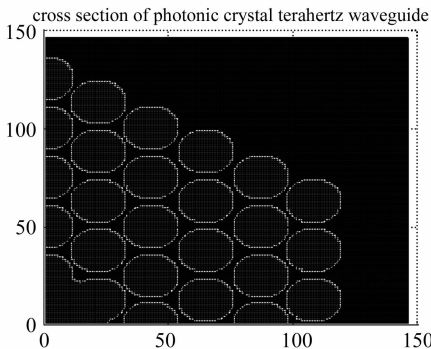


图 4 计算时所用光子晶体太赫兹波导结构图

Fig. 4 Cross section of photonic crystal terahertz waveguide using in simulation

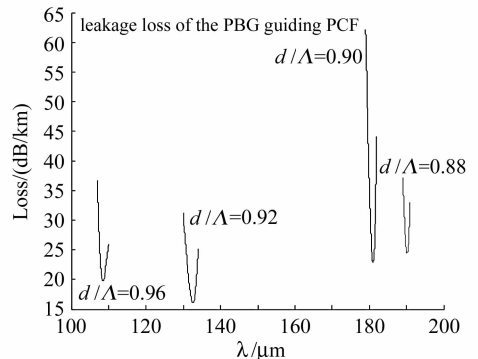


图 5 取不同 d/Λ 时的损耗曲线

Fig. 5 Leakage loss of photonic crystal terahertz waveguide with different d/Λ

数 $n = 5$, 纤芯半径 $R = \Lambda$ 。图 5 是取不同 d/Λ 时的损耗曲线。由图可以看出随着占空比增大, 光子晶体太赫兹波导的泄露损耗降低了。当 d/Λ 取 0.92 时可取得较低的损耗, 大约为 16 dB/km。这里由于计算时取的层数较少, 损耗还是很大。

在保持占空比不变的情况下改变 Λ 值, 显然 k 的范围不同, 就是说 Λ 不同纤芯中传播的波长范围也不同。取 $d/\Lambda = 0.92, R = \Lambda$, 包层层数 $n = 5$, 计算 Λ 分别取 120 $\mu\text{m}, 140 \mu\text{m}, 150 \mu\text{m}, 160 \mu\text{m}$ 时的泄露损耗值, 图 6 是拟合的损耗曲线。由图 6 可以看出 Λ 越大, 传输的波长范围向长波长范围移动。而 Λ 增大, 泄露损耗也有降低的趋势。如 $\Lambda = 150$ 时聚乙烯的纤芯中可传输的波长范围在 130~135 μm , 其损耗值约为 15 dB/km。利用这个结论在设计光纤时可以通过改变 Λ 值来达到控制纤芯中传播的波长的目的。

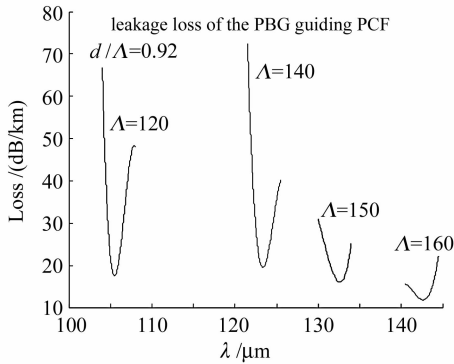


图 6 取不同 Λ 时的损耗曲线

Fig. 6 Leakage loss of photonic crystal terahertz waveguide with different Λ

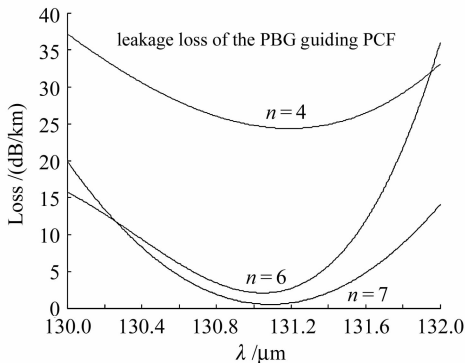


图 7 取不同包层层数 n 时的损耗曲线

Fig. 7 Leakage loss of photonic crystal terahertz waveguide with different n

图 7 是改变包层空气孔层数时所得的损耗曲线。可以看出, 包层层数的增加有效地降低了光纤的泄露损耗。但是, 由计算的结果可以发现包层层

数达到 7 层以后对损耗降低的效果已经不是很明显, 再加上考虑制作工艺, 包层层数取 7 已经可以达到较理想的损耗值了。由图可见, 包层取 7 时损耗最低值可以达到 1.5 dB/km。

4 结 论

仿真计算结果表明, 本文提出的三角形结构包层由硅和空气孔周期排列, 纤芯为聚乙烯有机材料的光子晶体太赫兹波导适合太赫兹波传输。选取合适的参数可以使这种波导在太赫兹波段有较理想的损耗特性。当该波导的纤芯半径取一倍孔间距时有效地消除了表面模, 而聚乙烯在太赫兹波段的吸收损耗也几乎可以忽略, 因此波导的损耗主要由其结构引起的泄露损耗所决定。随着占空比的增加波导的泄露损耗明显降低, 而保持占空比不变, 改变孔间距可以调节在纤芯传播的频率范围, 且泄露损耗也有降低的趋势。而增加包层层数也可以有效地降低泄露损耗, 但是考虑到制作工艺, 包层数也不能取得太大。由计算可知, 取 $R = \Lambda, d/\Lambda = 0.92, \Lambda = 150 \mu\text{m}, n = 7$ 时, 可以得到较理想的损耗特性。此时光波导中可传输的波长范围为 130~135 μm , 其损耗在波长为 131 μm 时达到最低, 约为 1.5 dB/km。总之, 选择高填充率、较大孔间距、较多层数可以得到较低的泄露损耗。

参 考 文 献

- 1 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1349~1359
孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1349~1359
- 2 Liu Shenggang. New progress on terahertz science and technology [J]. *China Basic Science*, 2006, **1**:7~12
刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. *中国基础科学*, 2006, **1**:7~12
- 3 Huang Wanwen, Li Baojun. Progress on terahertz waveguide devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(7):9~15
黄婉文, 李宝军. 太赫兹波导器件研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(7):9~15
- 4 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1):57~66
王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1):57~66
- 5 H. Han, H. Park, M. Cho *et al.*. Terahertz pulse propagation in plastic photonic crystal fibers [C]. *Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE MTT-S International*, 2002, **2**:1075~1078
- 6 Shangping Guo, Sacharia Albin. Simple plane wave implementation for photonic crystal calculations [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(2):167~175

- 7 Chen Heming, Zhang Li, Rong Jingxiong. A study on the air guiding condition of lightwave in photonic bandgap fibers [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 2004, **24**(4):67~70
陈鹤鸣,张 力,容经雄. PBG 光子晶体光纤中空气导光条件的研究[J]. *南京邮电学院学报*, 2004, **24**(4):67~70
- 8 Yongjiu Zhao, Keli Wu, K. M. Cheng. A compact 2-D full-wave finite-difference frequency-domain method for general guided wave structures [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(7):1844~1848
- 9 Chinpig Yu, Hungchun Chang. Yee-mesh-based finite difference eigenmode solver with PML absorbing boundary conditions for optical waveguides and photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25):6165~6177
- 10 Kunimasa Saitoh, Masanori Koshiba. Leakage loss and group velocity dispersion in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(23):3100~3109
- 11 Hyang Kyun Kim, Jonghwa Shin, Shanhui Fan *et al.*. Designing air-core photonic-bandgap fibers free of surface modes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(5):551~556

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》)“生物光子学”专题 征 稿 启 事

光学技术给生物医学成像、传感以及诊断学领域带来了重大变革,并产生了巨大影响。例如,内窥式激光共聚焦显微镜、光学相干层析技术(OCT)等光学成像技术为生物组织提供了高分辨率的三维影像;而各种光学传感技术也被应用于生物医学中提供高灵敏度的痕量气体分析和化学分析。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于2008年12月推出“生物光子学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“生物光子学”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该领域基础理论的研究进展以及最先进的临床试验水平。

征稿范围包括:

- Optical imaging techniques
- Non-invasive optical diagnostics
- Laser tissue treatment
- Optical bio-sensors
- Optical biomedical instrumentation
- Other

Feature Editor:

Jin U. Kang

Department of Electrical and Computer Engineering, Johns Hopkins University

截稿日期:2008年7月15日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“生物光子学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。