

新型宽带单偏振单模光子晶体光纤的设计

耿鹏程 张伟刚 张珊珊 阮隽

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 基于折射率匹配耦合原理, 提出并设计了一种新型宽带单偏振单模光子晶体光纤, 阐述了工作原理并利用全矢量有限元法对其进行了数值模拟。当中间纤芯和边芯之间空气孔 1 和 2 的直径为 $2.4 \mu\text{m}$ 时, 波长在 $1.26 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的范围内, 偏振相关损耗大于 4.08 dB/m , 单偏振单模的带宽高达 440 nm ; 当空气孔 1 和 2 的直径为 $2.6 \mu\text{m}$ 时, 在波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处, x 偏振模的限制损耗为 26.93 dB/m , 而 y 偏振模的限制损耗仅为 0.01 dB/m , 在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处, x 偏振模的限制损耗为 38.66 dB/m , y 偏振模的限制损耗仅为 0.05 dB/m 。这种光子晶体光纤具有高带宽特性, 并且在 $1.31 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 两个通信窗口存在高相关偏振损耗。

关键词 光子晶体光纤; 单偏振单模; 折射率匹配; 偏振相关损耗

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0706001

Design of New Type Single-Polarization Single-Mode Photonic Crystal Fiber with Wide Bandwidth

Geng Pengcheng Zhang Weigang Zhang Shanshan Ruan Juan

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract A new type single-mode single-polarization photonic crystal fiber based on index-matching coupling has been put forward and its principle has been elaborated. A full vector finite element method is employed to simulate the fiber properties. When polarization dependant loss is larger than 4.08 dB/m in the wavelength from 1.26 to $1.7 \mu\text{m}$ and as diameters of air hole 1 and 2 between central and edge cores are $2.4 \mu\text{m}$, the bandwidth of single-mode single polarization can reach 440 nm . The x -polarized mode exhibits a high leakage loss of 26.93 dB/m and the y -polarized mode exhibits a low leakage loss of 0.01 dB/m at a wavelength of $1.31 \mu\text{m}$; the x -polarized mode exhibits a high leakage loss of 38.66 dB/m and the y -polarized mode exhibits a low leakage loss of 0.05 dB/m at a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ as diameters of air hole 1 and 2 are $2.6 \mu\text{m}$. This photonic crystal fiber has a high bandwidth and polarization dependant loss in the $1.31 \mu\text{m}$ and $1.55 \mu\text{m}$ communication window.

Key words photonic crystal fiber; single-mode single polarization; refractive-index matching; polarization-dependent loss

OCIS codes 060.2280; 060.4005; 260.1440

1 引 言

保偏光纤(PMF)在相干光通信系统以及光纤传感系统中有着非常重要的应用。然而, 传统的 PMF 一般由双折射光纤制成, 即使在系统中加入起偏器也难以从根本上消除偏振模色散以及偏振模耦合对系统性能的影响。因此, 对于单偏振单模光纤

(SMSPF) 的研究引起了人们广泛的兴趣^[1,2]。SMSPF 与支持两个正交偏振模式的传统 PMF 不同, SMSPF 只传导基模的两个偏振模式中的一个, 而另一个偏振模式被消除^[3~5]。实现 SMSPF 主要有两种途径: 1) 使得基模的某个偏振模式处于传导状态, 而另一个偏振模式处于截止状态; 2) 在两个偏振

收稿日期: 2011-01-29; 收到修改稿日期: 2011-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(10974100, 10674075, 60577018)和天津市应用基础与前沿技术研究计划(10JCZDJC24300)资助课题。

作者简介: 耿鹏程(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事光子晶体光纤光栅方面的研究。

E-mail: gengpengcheng@126.com

导师简介: 张伟刚(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子技术与现代光传感和新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

模式间引入很高的偏振相关损耗,使得只有一个偏振模式能够有效传播。

光子晶体光纤(PCF)包层空气孔设计的灵活性,为单偏振光纤的设计提供了新思路^[6~9]。通过改变空气孔的形状、大小或位置,在纤芯或包层形成对称或非对称微结构,可以设计出具有高双折射(HB)性能的 PCF,且其诱导的几何双折射比传统 PMF 高 1~2 个数量级^[10,11]。但 HB-PCF 的偏振保持能力受偏振串扰和偏振模色散的影响,导致其应用受到限制。普通 HB 光纤可以设计成在偏振工作区只传输一个偏振模,而另外一个偏振模因其损耗高而被抑制掉,如此可形成 SPSMF。这种设计方法为 PCF 实现 SPSM 传输提供了可能性。

根据折射率匹配耦合原理,本文在 Sun-Goo Lee 等^[12]设计的一种 SPSM-PCF 的基础上进行改进,把 3 种不同结构的 PCF 叠加成一种复合结构,实现了 PCF 的宽带 SPSM 特性。

2 理论分析方法

基于棱边/节点混合元(HE/NE)的带有完美匹配层(PML)吸收边界条件的全矢量有限元法(FV-FEM)是解决光波导问题的有效工具之一,适用于任意折射率分布的波导截面。因其计算精度较高,近年来被广泛应用于 PCF 的分析和设计。

由于 PCF 包层材料与空气折射率差较大,已不满足弱导近似(标量近似)条件,因此需要使用矢量算法才能获得准确的解。在封闭波导中,电场满足矢量方程

$$\nabla \times (\boldsymbol{\mu}_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - \boldsymbol{\kappa}_0^2 \boldsymbol{\varepsilon}_r \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{\kappa}_0$ 为自由空间波矢量值, \mathbf{E} 代表电场矢量, $\boldsymbol{\varepsilon}_r$, $\boldsymbol{\mu}_r$ 分别为相对介电常数张量和磁导率张量。(1)式的泛函可表达为

$$F(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} [\boldsymbol{\mu}_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{E})^* - \boldsymbol{\kappa}_0^2 \boldsymbol{\varepsilon}_r \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*] d\Omega. \quad (2)$$

将光纤截面分割为许多小三角形单元,并在各个三角形单元内利用基本的恒定切向/线性法向(CT/LN)矢量基函数将电场 \mathbf{E} 分解为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_x \\ \mathbf{e}_y \\ \mathbf{e}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\mathbf{U}(x, y)\}^T \{\mathbf{e}_1\}_e \\ \{\mathbf{V}(x, y)\}^T \{\mathbf{e}_1\}_e \\ \mathbf{j}\boldsymbol{\beta}\{\mathbf{L}(x, y)\}^T \{\mathbf{e}_z\}_e \end{bmatrix} = \exp(-\mathbf{j}\boldsymbol{\beta}z), \quad (3)$$

式中 $\{\mathbf{e}_1\}_e$, $\{\mathbf{e}_z\}_e$ 分别为每个单元 e 内棱边与节点对应电场的切向与轴向分量, $\{\mathbf{U}\}$ 和 $\{\mathbf{V}\}$ 为与棱边对应

的形函数向量, $\{\mathbf{L}\}$ 为与节点对应的形函数向量, $\boldsymbol{\beta}$ 为传播常数,上标 T 表示转置。

应用(3)式对(2)式进行离散,最终可以得到关于传播常数 $\boldsymbol{\beta}$ 的广义特征值方程

$$\begin{bmatrix} A_{tt} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}_z \end{bmatrix} = \boldsymbol{\beta}^2 \begin{bmatrix} B_{tt} & B_{tz} \\ B_{zt} & B_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_t \\ \mathbf{e}_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中矩阵均为大型稀疏矩阵。数值求解该特征值方程即可获得指定波长下的传播常数 $\boldsymbol{\beta}$,从而得到有效折射率

$$n_{\text{eff}} = \text{Re}(\boldsymbol{\beta}/k_0). \quad (5)$$

将特征向量代入(3)式可求得对应模式的电场分布,而通过 $\boldsymbol{\beta}$ 的虚部可以获得该模式的限制损耗(CL)为 $\frac{20}{\ln 10} \text{Im} \boldsymbol{\beta}$ dB/m。

3 模拟结果及分析

3.1 结构与工作原理

2005 年, J. M. Fini^[13] 提出利用折射率匹配耦合原理可以抑制光纤的高阶模而保留所需的基模。根据此原理,2010 年 Sun-Goo Lee 等^[12]设计了一种包层中含有小空气孔(SHC)的 PCF,且在小空气孔附近区域能够激发环状基模。在此基础上,通过调节该空气孔的直径使得该环状基模对应的折射率在所需波长处与要抑制的偏振模对应的折射率相等,此时满足了折射率匹配条件,要抑制的偏振模的一部分能量会耦合到环状基模中,而另一个偏振模对应的折射率与环状基模对应的折射率不匹配,不会产生有效耦合。根据这一原理,可以在 PCF 中引入很高的偏振相关损耗,从而实现 SPSM 运转。

本文在 Sun-Goo Lee 等提出的 PCF 结构基础上进行了重新设计,即同时把两种小空气孔芯的 PCF 和 HB-PCF 进行叠加,如图 1 所示。计算时 PCF 结构参数为:孔间距 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$,包层中空气孔直径为 d_1 ,且满足 $d_1/\Lambda = 0.5$;纤芯附近大空气孔直径为 d_2 ,满足 $d_2/\Lambda = 1.26$;两个小空气孔直径分别为 d_3 和 d_4 ;中间纤芯和边芯之间空气孔 1 和 2 的直径为 d_5 。

3.2 模拟结果及分析

采用全矢量有限元法进行计算,并且计算中考考虑了石英的材料色散。首先计算 HB-PCF 两个偏振模对应的有效折射率,然后通过调节 d_3 的大小,使 SHC-PCF1 中基模对应的有效折射率在波长 $1.31 \mu\text{m}$ 附近处与 HB-PCF 中 x 偏振模对应的有效

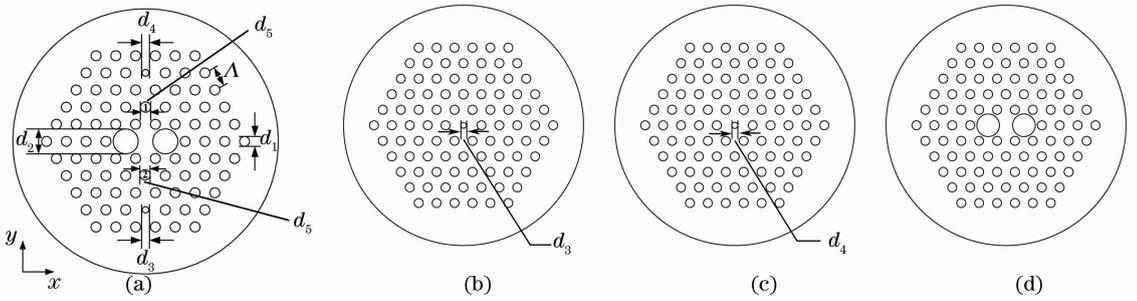


图1 PCF的端面结构。(a) SPSM-PCF, (b) SHC-PCF1, (c) SHC-PCF2, (d) HB-PCF

Fig.1 Cross section of PCF. (a) SPSM-PCF, (b) SHC-PCF1, (c) SHC-PCF2, (d) HB-PCF

折射率相等,此时会发生较强的折射率匹配耦合效应。同理,通过调节 d_4 的大小,可以使 SHC-PCF2 中基模对应的有效折射率在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近处与 HB-PCF 中 x 偏振模对应的有效折射率相等。经计算,当 $d_3/\Lambda=0.3256$, $d_4/\Lambda=0.34$ 和 $d_5/\Lambda=0.52$ 时,SHC-PCF1,SHC-PCF2 的基模和 HB-PCF 中 x 和 y 偏振模对应的有效折射率如图 2 所示。由图 2 可知,在很宽的波长范围内, $n_{\text{SHC-PCF1}}$, $n_{\text{SHC-PCF2}}$ 和 n_x 都十分接近,从图中很难分辨出它们曲线的交点。为此,采用折射率差进行比较,如图 3 所示。对比图 2 和图 3 可知,在 $1.31 \mu\text{m}$ 附近, $n_{\text{SHC-PCF1}}$ 和 n_x 曲线相交,在 $1.54 \mu\text{m}$ 附近, $n_{\text{SHC-PCF2}}$ 和 n_x 曲线相交,即它们交点上的值分别相等。此时,它们满足折射率匹配条件,即 x 偏振模的一部分电场会耦合到边芯中,从而造成 x 偏振模限制损耗的增加。

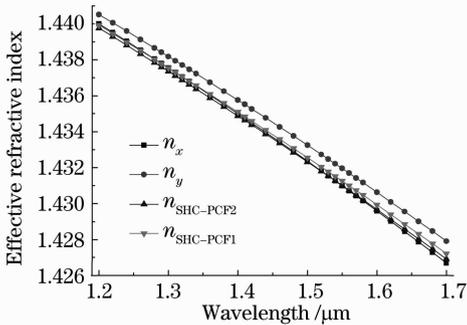

 图2 SHC-PCF1,SHC-PCF2 中基模和 HB-PCF 中 x 与 y 偏振模的有效折射率

 Fig.2 Effective refractive indices of the fundamental modes of SHC-PCF1, SHC-PCF2 and x -and y -polarized modes of HB-PCF

分别计算当 $d_5=2.4, 2.5, 2.6 \mu\text{m}$ 时 x 偏振模和 y 偏振模的限制损耗,结果如图 4 所示。图 4(a), (b) 分别是在线性坐标下 x 偏振模和 y 偏振模的限制损耗曲线,图 4(c) 则是在以 10 为底的对数坐标系下的 x 偏振模和 y 偏振模的限制损耗曲线。从图中可以看出,随着 d_5 值的增加, x 偏振模和 y 偏

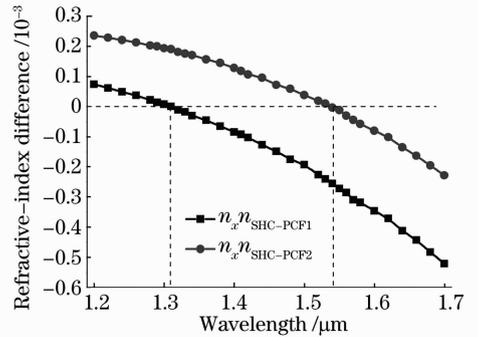

 图3 SHC-PCF1,SHC-PCF2 中基模和 HB-PCF 中 x 偏振模的折射率差

 Fig.3 Refractive-index difference of the fundamental modes of SHC-PCF1 and SHC-PCF2 and x -polarized mode of HB-PCF

振模的限制损耗均会减小。当 $d_5=2.4 \mu\text{m}$ 时,几乎在 $1.2\sim 1.7 \mu\text{m}$ 整个波长范围内,偏振相关损耗大于当 $d_5=2.5 \mu\text{m}$ 和 $d_5=2.6 \mu\text{m}$ 时的情况。尽管在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 x 偏振模的限制损耗高达 204.63 dB/m ,但是 y 偏振模的限制损耗也达到了 0.14 dB/m ;当 $d_5=2.5 \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 x 偏振模的限制损耗为 102.98 dB/m , y 偏振模的限制损耗为 0.09 dB/m ;当 $d_5=2.6 \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 x 偏振模的限制损耗为 38.66 dB/m ,而 y 偏振模的限制损耗仅为 0.05 dB/m 。

经深入分析可知,在实际应用中,在需使用较长距离的 SPSM-PCF 时,需要保留的偏振模(对于文中结构即 y 偏振模)的限制损耗较小,此时可以适当加大 d_5 的值。当并不需要使用较长距离的 SPSM-PCF 时,可以适当减小 d_5 的值,使得 x 偏振模更易于与边芯中的模式耦合,从而增大偏振相关损耗。

由图 4(c)可知,当 $d_5=2.4 \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.26\sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内,偏振相关损耗大于 4.08 dB/m ;当 $d_5=2.5 \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.28\sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内,偏振相关损耗大于 4.01 dB/m ;当 $d_5=2.6 \mu\text{m}$ 时,在波长 $1.28\sim$

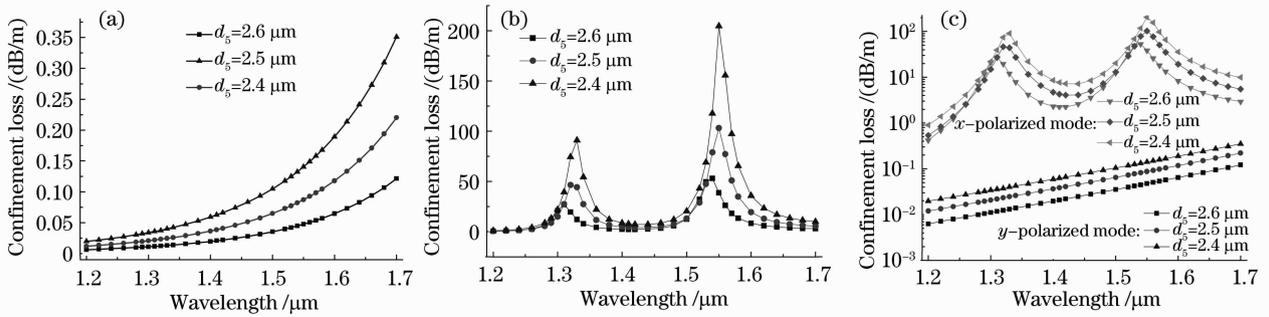


图 4 x 和 y 偏振模的限制损耗。(a) y 偏振模, (b) x 偏振模, (c) 对数坐标下 x 偏振模和 y 偏振模

Fig. 4 Confinement loss of the x - and y -polarized modes. (a) y -polarized mode, (b) x -polarized mode, (c) x - and y -polarized modes in logarithmic coordinates

1.36 μm 范围内, 偏振相关损耗大于 4.14 dB/m, 1.48~1.64 μm 范围内, 偏振相关损耗大于 4.49 dB/m。

上述研究表明, 把 3 种不同结构的 PCF 叠加后, 由于在 1.31 μm 和 1.55 μm 附近较大范围内, SHC-PCF1 和 SHC-PCF2 中基模对应的有效折射率和对应波长处 HB-PCF 中 x 偏振模对应的有效折射率十分接近, 并且两个损耗峰会产生叠加, 因此设计的 SPSM-PCF 能

够保持的 SPSM 带宽明显高于文献[12]中提出的 PCF 结构。

图 5 给出了在波长 1.31 μm 和 1.55 μm 处 x 偏振模和 y 偏振模的电场分布。由图 5 可见, 在 1.31 μm 和 1.55 μm 处, x 偏振模和边芯中的模式发生了较强的耦合, 而 y 偏振模和边芯中的模式未发生有效耦合。

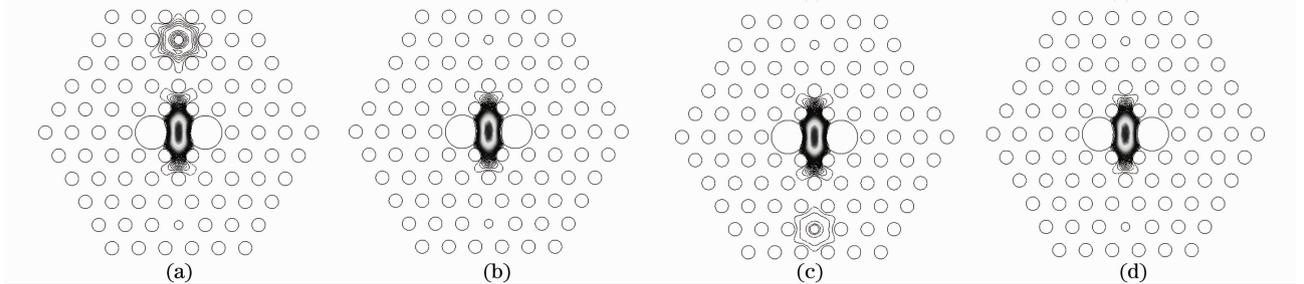


图 5 x 偏振模和 y 偏振模的电场分布。1.55 μm 处, (a) x 偏振模和 (b) y 偏振模, 1.31 μm 处, (c) x 偏振模和 (d) y 偏振模

Fig. 5 Electric-field distribution of the x - and y -polarized modes. (a) x -polarized mode and (b) y -polarized mode with $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, (c) x -polarized mode and (d) y -polarized mode with $\lambda=1.31 \mu\text{m}$

4 结 论

根据折射率匹配耦合原理, 提出并设计了一种由 3 种不同结构的 PCF 复合构成的 SPSM-PCF。这种 SPSM-PCF 具有高带宽特性, 并且在 1.31 μm 和 1.55 μm 两个通信窗口存在高相关偏振损耗。采用 FV-FEM 对其进行了理论分析和数值模拟; 通过调节包层中空气孔的大小, 实现了 PCF 的宽带 SPSM 特性。尤其是可以通过调节包层中空气孔的大小改变 x 偏振模和 y 偏振模的限制损耗, 使其更加符合不同场合的需要。该研究结果有助于设计新型的具有高带宽和多工作波段的 SPSM-PCF。

参 考 文 献

- 1 M. J. Messerly, J. R. Onstott, R. C. Mikkelsen. A broadband single polarization optical fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(7): 817~820
- 2 K. Okamoto. Single-polarization operation in highly birefringent optical fibers[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(15): 2638~2642
- 3 Zhang Yani. Theoretical design of single polarization single mode microstructured polymer optical fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1800~1804
张亚妮. 单偏振单模微结构聚合物光纤理论设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(9): 1800~1804
- 4 Zhang Yani. Fabrication technology of microstructured polymer optical fibers[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(5): 13~15
张亚妮. 微结构聚合物光纤制备技术研究[J]. *激光杂志*, 2006, **29**(5): 13~15
- 5 H. Kubota, S. Kawanishi, S. Koyanagi *et al.*. Absolutely single polarization photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 182~184

- 6 Dai Nengli, Li Yang, Peng Jinggang *et al.*. Development of dispersion flattened photonic crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 010602
戴能利, 李洋, 彭景刚等. 色散平坦光子晶体光纤的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(1): 010602
- 7 Zhang Zhihua, Shi Yifei, Bian Baomin *et al.*. Study on coupling of dual core photonic crystal fiber with a hybrid light guiding mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 228~232
张智华, 石一飞, 卞保民等. 混合导光机制光子晶体光纤双芯耦合研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 228~232
- 8 Zhou Qinling, Lu Xingqiang, Zhang Guang *et al.*. Mode characteristics of a large mode area flattened mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1497~1500
周秦岭, 卢兴强, 张光等. 大模面积平顶模场光子晶体光纤模式分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1497~1500
- 9 Li Mingjia, Shi Zhidong, Lin Jianqiang *et al.*. Optimized design for rectangular lattice holey birefringent fiber with wideband stable beat length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 1950~1954
李铭佳, 石志东, 林建强等. 矩形晶格双折射多孔光纤宽带稳定拍长的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 1950~1954
- 10 Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Research progresses of highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Semiconductor Photoelectric*, 2010, **31**(2): 165~169
陈明阳, 张永康. 高双折射光子晶体光纤研究进展[J]. *半导体光电*, 2010, **31**(2): 165~169
- 11 Yan Fengping, Li Yifan, Wang Lin *et al.*. Design and characteristics of a near elliptic inner cladding high birefringent polarization stable photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9): 5735~5741
延风平, 李一凡, 王琳等. 近椭圆内包层高双折射偏振稳定光子晶体光纤设计及特性分析[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9): 5735~5741
- 12 S. G. Lee, K. N. Lee, S. B. Lee. Design of single-polarization single-mode photonic crystal fiber based on index-matching coupling[C]. OFC/NFOEC, 2010. 1~3
- 13 J. M. Fini. Design of solid and microstructure fibers for suppression of higher order modes [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9): 3477~3490