

双芯准晶格光子晶体光纤的色散特性

李羽赫 范万德 盛秋琴

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要 设计了一种折射率引导型双芯准晶格光子晶体光纤,并基于有限元法对其色散特性进行数值模拟和研究。该光纤内、外纤芯中光波的耦合效应,可在相位匹配波长附近产生相当高的负色散值。通过分析内包层孔径 d_1 , 外纤芯孔径 d_2 , 外包层孔径 d_3 , 孔间距 Λ 以及内包层空气孔层数的改变对光纤色散特性的影响,最终设计出一种在 1550 nm 低损耗窗口性能优越的色散补偿光纤,负色散峰值为 $-2250 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,半峰全宽超过 280 nm,色散-带宽乘积可达 $630 \text{ GHz}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。此种光纤适合在长距离高速光纤通信系统中为常规单模光纤提供色散补偿。

关键词 光纤光学;光子晶体光纤;有限元法;双芯;色散补偿

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0205005

Dispersion Properties of Dual-Core Photonic Crystal Fiber with Quasi-Lattice

Li Yuhe Fan Wande Sheng Qiuqin

(School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract An index-guiding dual-core photonic crystal fiber with quasi-lattice is designed, and its dispersion properties are simulated numerically by the finite element method. The coupling between inner-core mode and outer-core mode of proposed fiber will lead to a highly negative dispersion value around phase matching wavelength. The effects of changing d_1 , d_2 , d_3 , Λ or the number of inner cladding air-hole rings on dispersion properties are investigated. At last, a dispersion compensation photonic crystal fiber at 1550 nm wavelength is designed, which has a peak dispersion value of $-2250 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ with a full-width at half-maximum exceeding 280 nm. Its dispersion-bandwidth product can reach $630 \text{ GHz}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. This fiber is suitable for dispersion compensation in long-distance high-speed optical fiber communication systems.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; finite element method; dual-core; dispersion compensation

OCIS codes 060.2280; 060.2270; 060.2400

1 引 言

在光纤通信系统中, G652 常规单模光纤在 1550 nm 低损耗窗口存在约 $17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 的正色散, 导致脉冲展宽, 产生误码。要实现长距离高速光纤通信, 必须对光纤的色散进行补偿。在诸多色散补偿光纤的设计中, 双芯光子晶体光纤(PCF)^[1,2] 因其灵活的色散可控性和高负色散值显示出巨大的发展潜力。传统的双芯 PCF 空气孔排列大多呈六边形^[3~5], 这种结构相对简单且易于用堆砌法进行光纤拉

制,但其负色散峰值与半峰全宽二者相互制约,使传输性能难以进一步优化。近年来随着光纤拉制技术的进步,新型空气孔排列结构的 PCF 被不断提出,如圆形排列^[6]、八边形排列^[7,8]、正方形排列^[9] PCF 等。2007 年, Soan Kim 等^[10] 提出一种新颖的准晶格 PCF, 其空气孔排列呈非周期性但表现为长程有序。研究表明, 这种光纤的很多传输特性明显优于传统的 PCF^[11]。

本文基于内全反射的导模机制, 将双芯结构应用于十二重对称的准晶格 PCF 中, 提出了一种适用

收稿日期: 2010-08-03; 收到修改稿日期: 2010-09-06

作者简介: 李羽赫(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤特性分析方面的研究。

E-mail: 0310330@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 盛秋琴(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子学与现代通信方面的研究。

E-mail: shengqq@nankai.edu.cn

于色散补偿的新光纤结构。以双层小空气孔成环状的外纤芯,更好地限制了传播模式,并且大大削弱了外包层空气孔直径对光纤色散特性的影响。数值计算采用有限元法^[12],每次有规律地改变一组结构参量,研究该光纤的色散特性并对其性能进行优化,可以同时获得高负色散值和大的半峰全宽。

2 物理模型与理论基础

设计了一种双芯准晶格 PCF。图 1(a)为准晶格结构,由相邻的正方形与正三角形构成,相邻空气

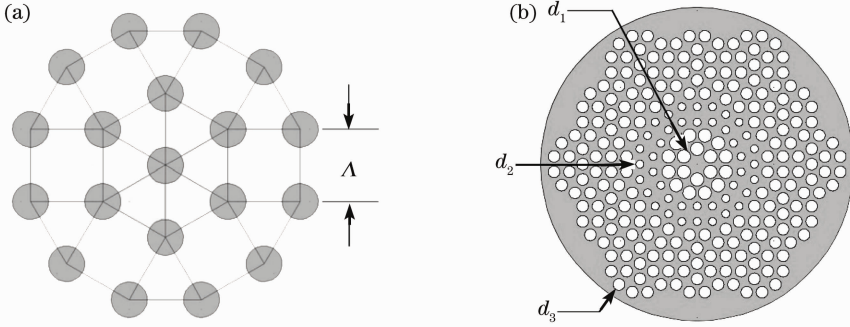


图 1 (a) 准晶格结构, (b) 双芯准晶格 PCF 截面图

Fig. 1 (a) Quasi-lattice, (b) cross section of dual-core PCF with quasi-lattice

该光纤内、外纤芯可看作两个平行波导,能独立传播两种不同的模式。在相位匹配波长 λ_p 附近,两种模式发生强烈耦合产生两个超模,引起能量场的重新分布。光波波长小于 λ_p 时基模场主要在内芯中传播;大于 λ_p 时主要在外芯中传播;在 λ_p 附近场能量部分被限制在内芯中,部分被限制在外芯中。图 2 显示了耦合效应对光波有效折射率的影响,两条虚线分别表示内、外纤芯不发生耦合时各自的有效折射率曲线,两曲线的交点即为 λ_p ;实线表示发生耦合时耦合模基模的有效折射率曲线,在 λ_p 附近曲线发生明显弯折,可产生非常高的负色散值。

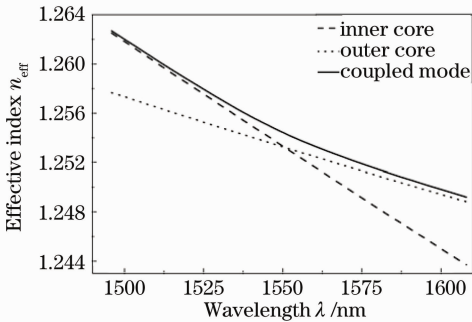


图 2 内、外纤芯耦合效应对有效折射率的影响

Fig. 2 Effect of coupling between inner and outer cores on effective index

孔间距 Λ 均相同。图 1(b)为光纤截面图,空气孔排列呈十二重准晶格结构。中心孔缺失形成缺陷,构成内纤芯;第 1,2 层孔直径为 d_1 ,构成内包层;第 3,4 层孔直径 d_2 很小,构成环状外纤芯;其余各层孔直径均为 d_3 ,构成外包层。端面最外层设置圆柱形完美匹配层(PML)作为吸收边界条件,采用有限元法进行数值模拟时,还需给定光纤的几何参量、电磁参量以及自由空间波长。通过计算可得到各光波模式的场分布和有效折射率,计算精度为 10^{-6} 。

PCF 的总色散值可以近似为材料色散与波导色散的简单叠加。材料色散可由 Sellmeier 方程直接算出,波导色散与光纤结构紧密相关。数值计算中二者均已考虑在内,总色散系数可表示为

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}[n_{\text{eff}}]}{d\lambda^2}, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 表示传播模式的有效折射率, c 与 λ 分别表示光在真空中的传播速度和波长。根据耦合模理论,当 $\lambda = \lambda_p$ 时双芯准晶格 PCF 基模色散系数达到峰值,可表示为^[13]

$$D_{\text{max}} = -\frac{\pi}{2c\kappa} \left(\frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right)^2, \quad (2)$$

式中 κ 表示内、外纤芯的耦合常数, $dn_{1,2}/d\lambda$ 表示内、外纤芯各自有效折射率随波长的变化率。色散曲线半峰全宽可表示为

$$\Delta\lambda = 0.766 \times \frac{2\kappa\lambda_p}{\pi} \left| \frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right|^{-1}, \quad (3)$$

可见 κ 与色散峰值成反比关系,与半峰全宽成正比关系。将(2)与(3)式相乘并取绝对值得到色散-带宽乘积

$$|D_{\text{max}}\Delta\lambda| = 0.766 \times \frac{\lambda_p}{c} \left| \frac{dn_1}{d\lambda} - \frac{dn_2}{d\lambda} \right|. \quad (4)$$

色散-带宽乘积与 κ 无关,仅取决于内、外纤芯有效

折射率变化率之差以及 λ_p 。

3 数值分析

图 1 所示的双芯准晶格 PCF, 其色散特性由参量 Λ, d_1, d_2 和 d_3 共同决定。数值计算的结果表明 Λ, d_2 或 d_3 增大时, λ_p 向长波方向移动, 且 d_3 对 λ_p 的移动影响很弱, 可作为微调参量; d_1 增大时, λ_p 向短波方向移动。因此要使 λ_p 移至低损耗窗口 1550 nm, 只要 Λ 与 d_1 已确定, d_2 便可唯一确定, 微调参量 d_3 也可确定。已有的研究方法是每次只单独改变一个参量, 观察其对色散曲线的影响。这里采用了新的分析方法, 每次按照一定规律改变一组参量, 在保证色散峰值出现在 1550 nm 处的前提下, 研究其色散特性。

固定 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, 孔径比 d_1/Λ 从 0.65 变化到 0.90 (每隔 0.05 取一个值)。如图 3(a) 所示, 为保

证 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, d_2/Λ 随 d_1/Λ 的增加而线性递增, 微调参量 d_3/Λ 的变化并不表现明显规律性。图 3(b) 是色散系数 D 的变化曲线, 曲线峰值均位于 1550 nm 处, 左右呈对称分布。当 d_1/Λ 由 0.75 增至 0.90 时, 负色散峰值由 $-2010 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 增至 $-9600 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 而半峰全宽由 162 nm 减至 40 nm, 可见负色散峰值与半峰全宽的变化趋势是相反的。这主要是由于 d_1/Λ 的增大提高了内包层空气填充率, 导致内包层与内纤芯间的有效折射率之差增加, 更好地限制了内纤芯能量, 增加了内、外纤芯模式耦合难度, 使耦合常数 κ 减小所致。图 3(c) 表明, 随 d_1/Λ 的增加色散-带宽乘积先缓慢减小又急剧增加, 其变化趋势在 d_1/Λ 大于 0.75 的范围内与负色散峰值的变化趋势一致, 这对光纤性能的优化具有重要的参考价值。

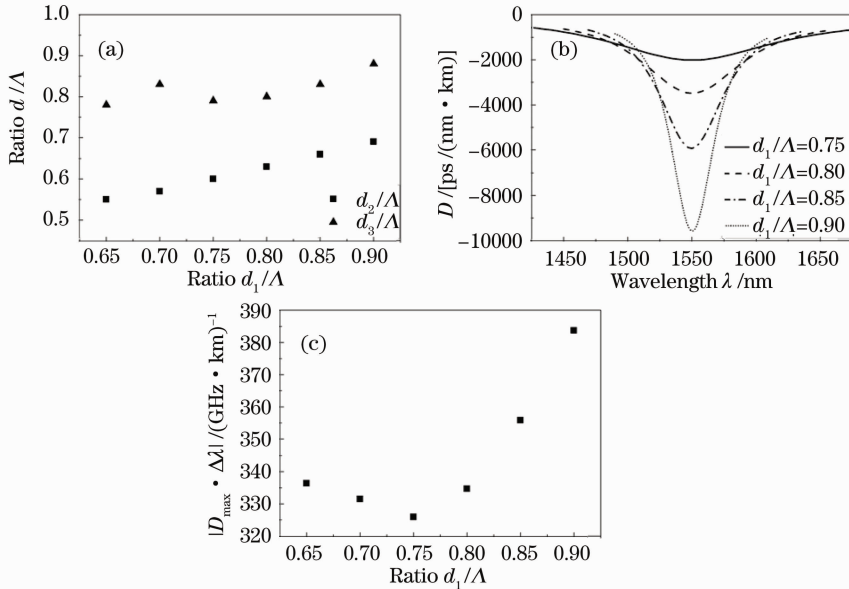


图 3 当 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$, 不同 d_1/Λ 时, (a) d_2/Λ 与 d_3/Λ 的取值, (b) 色散曲线, (c) 色散-带宽乘积的变化

Fig. 3 When $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ and different d_1/Λ , variation of (a) d_2/Λ and d_3/Λ , (b) dispersion curves, (c) dispersion-bandwidth product

固定 $d_1/\Lambda = 0.80$, 孔间距 Λ 从 $0.9 \mu\text{m}$ 变化到 $1.5 \mu\text{m}$ (每隔 $0.1 \mu\text{m}$ 取一个值)。如图 4(a) 所示, 为保证 $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$, d_2/Λ 随 Λ 的增加而线性递减, 微调参量 d_3/Λ 的变化仍不表现明显规律性。图 4(b) 表明, 当 Λ 由 $1.0 \mu\text{m}$ 增至 $1.3 \mu\text{m}$ 时, 负色散峰值由 $-3490 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 增至 $-14270 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 而半峰全宽由 96 nm 减至 13 nm。这主要是由于 Λ 的增加导致内、外纤芯间距增大, 使耦合更加困难; 另

外, d_2/Λ 的减小提高了环状外纤芯的有效折射率, 更好地限制了外纤芯能量, 同样增加了耦合难度, 使 κ 值减小所致。图 4(c) 表明, Λ 在 $0.9 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 范围内, 色散-带宽乘积随 Λ 的减小而增大, 其变化趋势与半峰全宽的变化趋势一致。结合对图 3 的分析可知, 在一定范围内适当减小 Λ 并增大 d_1/Λ , 可同时获得高负色散峰值和大的半峰全宽。这对于宽带色散补偿光纤的设计具有重要的指导意义。

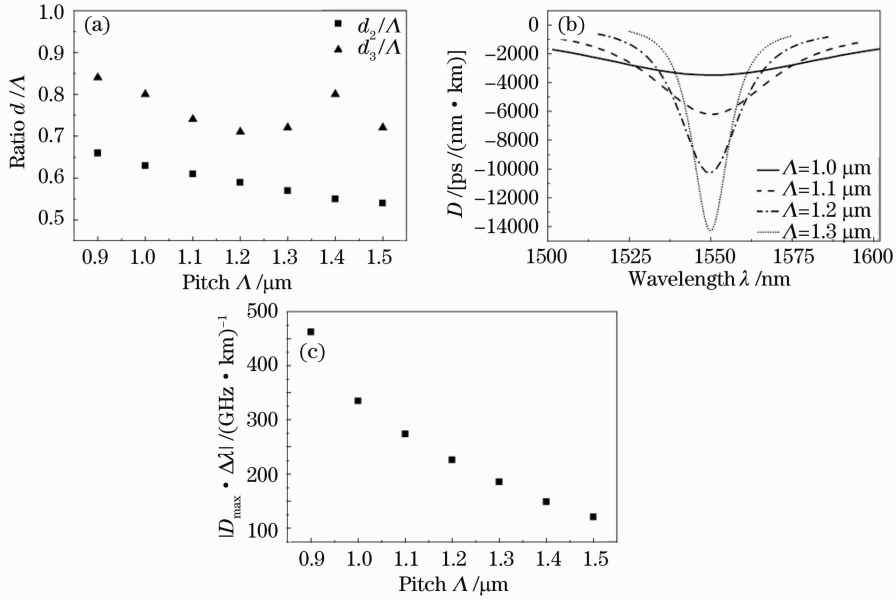


图 4 当 $\lambda_p=1550\ \text{nm}$, $d_1/\Lambda=0.80$, 不同 Λ 时, (a) d_2/Λ 与 d_3/Λ 的取值, (b) 色散曲线, (c) 色散-带宽乘积的变化

Fig. 4 When $\lambda_p=1550\ \text{nm}$, $d_1/\Lambda=0.80$ and different Λ , variation of (a) d_2/Λ and d_3/Λ , (b) dispersion curves, (c) dispersion-bandwidth product

固定 $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda=0.80$ 。如图 5 所示, 当内包层空气孔分别取 1 层, 2 层和 3 层时, 负色散峰值由 $-1150\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 骤增至 $-15200\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 而半峰全宽由 $428\ \text{nm}$ 骤减至 $19\ \text{nm}$ 。这是因为内包层空气孔层数的增加令内、外纤芯间距显著增大, 严重阻碍了模式的耦合, 使 κ 值急剧减小所致。可见内包层空气孔层数的改变对于色散曲线形状的影响最为明显, 因此设计光纤结构时首先应确定这个参量, 再对其他参量进行调节。

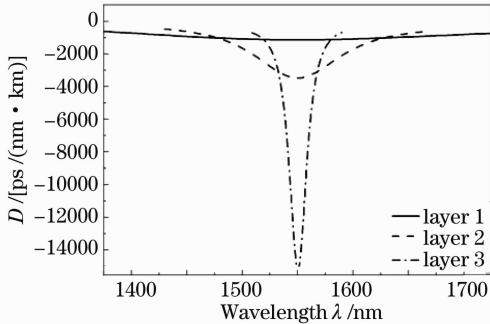


图 5 当 $\lambda_p=1550\ \text{nm}$, $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda=0.80$ 时, 内包层空气孔层数对色散曲线的影响

Fig. 5 When $\lambda_p=1550\ \text{nm}$, $\Lambda=1.0\ \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda=0.80$, effect of number of inner cladding air-hole rings on dispersion curves

4 双芯准晶格 PCF 的优化设计

双芯准晶格 PCF 具有灵活的色散可控性。根据色散补偿的需要, 图 6 给出了一条经优化得到的色散曲线, 其结构参量为: 1 层内包层空气孔, $\Lambda=0.95\ \mu\text{m}$, $d_1/\Lambda=0.90$, $d_2/\Lambda=0.73$, $d_3/\Lambda=0.80$ 。光纤仅由纯石英材料和空气孔组成, 无需掺杂或填充处理, 降低了制备工艺上的难度, 易于实现。负色散峰值位于 $1550\ \text{nm}$ 低损耗窗口, 满足光纤通信系统的需要; 峰值色散系数为 $-2250\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$, 可对超过自身 130 倍的常规单模光纤进行色散补偿; 色散曲线的半峰全宽超过 $280\ \text{nm}$, 有利于宽带补偿, 在 $1537\sim 1565\ \text{nm}$ 范围内色散系数变化小于 1% , 能够减小由外界温度、应力改变引起的色散峰值漂移的影响; 色散-带宽乘积可达 $630\ \text{GHz}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, 而传统的六边形纯石英 PCF 目前文献报道的最大值^[13] 只有 $522.5\ \text{GHz}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 。在长距离高速光纤通信系统中, 根据不同的需要只需在该光纤结构的基础上对参数稍作调整, 便能获得符合要求的色散性质。

该光纤的色散特性在理论上明显优于传统的六边形 PCF, 在制备工艺上也有所不同。制作六边形 PCF 预制棒往往采用毛细管堆砌法, 而双芯准晶格

PCF 的结构更加复杂,可采用溶胶-凝胶法制作预制棒,这种方法设计灵活、调整方便,对于预制棒微结构尺寸的控制也更加精确。在拉制过程中,光纤结构将受温度、拉丝速度、送料速度、孔内气压以及石英黏度等多种因素的影响^[14,15]。这里所设计的光纤由 3 种不同尺寸的空气孔构成,为抑制拉制过程中空气孔的塌陷变形,可适当提高拉丝速度、降低温度;或采用惰性气体施压工艺并实时监测光纤截面,严格控制空气孔尺寸。另外,对于已经拉制好的光纤,也可通过氢氟酸填充腐蚀法^[16]或选择性空气孔塌缩等后处理技术^[17]对其结构进行改造,优化光纤性能。

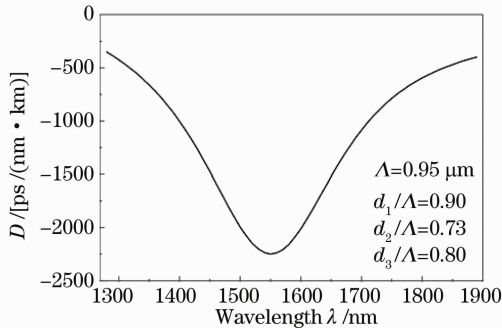


图 6 经优化得到的基模色散曲线

Fig. 6 Optimized dispersion curve of fundamental mode

5 结 论

将双芯结构应用于准晶格 PCF 中设计了一种新的光纤结构,并采用有限元法分析了结构参量对色散曲线的影响。此种光纤具有灵活的色散可控性,内包层空气孔层数的改变对于色散曲线形状的影响最为明显;且在一定范围内减小孔间距 Λ 并增大孔径比 d_1/Λ 可以同时获得高负色散峰值和大的半峰全宽。通过对模型进一步优化设计,得到了优越的色散特性,能够很好地满足光纤通信系统中色散补偿的需要,对波分复用光纤通信系统中宽带色散补偿的研究也有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 F. Gerome, J. L. Auguste, J. M. Blondy. Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29** (23): 2725~2727
- 3 Yi Ni, Lei Zhang, Liang An *et al.*. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6): 1516-1518

- 4 Sigang Yang, Yejin Zhang, Lina He *et al.*. Broadband dispersion-compensating photonic crystal fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(19): 2830~2832
- 5 Takeshi Fujisawa, Kunimasa Saitoh, Keisuke Wada *et al.*. Chromatic dispersion profile optimization of dual-concentric-core photonic crystal fibers for broadband dispersion compensation[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 893~900
- 6 Alexander Argyros, Ian M. Bassett, Martijn A. van Eijkelenborg *et al.*. Ring structures in microstructured polymer optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 813~820
- 7 Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (4): 1068~1072
侯宇,周桂耀,侯蓝田等.八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1068~1072
- 8 Yan Haifeng, Yu Zhongyuan, Tian Hongda *et al.*. Investigation on propagation and nonlinearity of an octagonal photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(5): 3273~3277
闫海峰,俞重远,田宏达等.八角光子晶体光纤传输特性与非线性特性研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(5): 3273~3277
- 9 Wang Honghua, Wang Shujiao. Analysis of negative dispersion properties of a photonic crystal fiber with modified square lattice and double concentric cores[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2009, **15**(4): 368~373
王红华,王淑娇.改进的正方形格点双芯光子晶体光纤的负色散特性分析[J]. *量子光学学报*, 2009, **15**(4): 368~373
- 10 Soan Kim, Chul Sik Kee, Jongmin Lee. Novel optical properties of six-fold symmetric photonic quasicrystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13221~13226
- 11 Soan Kim, Chul Sik Kee. Dispersion properties of dual-core photonic quasicrystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 15885~15890
- 12 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng. Analysis of the microstructure fiber by the finite element method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11): 1337~1342
胡明列,王清月,栗岩峰.微结构光纤的有限元分析算法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(11): 1337~1342
- 13 Harish Subbaraman, Tao Ling, Yongqiang Jiang *et al.*. Design of a broadband highly dispersive pure silica photonic crystal fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3263~3268
- 14 Guo Tiejing, Lou Shuqin, Li Honglei *et al.*. Effects of draw parameters on the hole structure of PCFs[J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2007, **18**(8): 945~948
郭铁英,娄淑琴,李宏雷等.光子晶体光纤拉制参数对包层气孔结构的影响[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(8): 945~948
- 15 Meng Jia, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Fabrication and study on the small-core index-guiding photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1350~1354
孟佳,侯蓝田,周桂耀等.小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1350~1354
- 16 Li Jing, Zhang Weigang, Du Jiangbing *et al.*. Application of hydrofluoric acid's corrosive properties in the fabrication of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36** (3): 705~709
李婧,张伟刚,杜江兵等.氢氟酸填充腐蚀方法在光子晶体光纤制造中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 705~709
- 17 Chen Zilun, Hou Jing, Jiang Zongfu. Rost-processing techniques of photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 020602
陈子伦,侯静,姜宗福.光子晶体光纤的后处理技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 020602