

文章编号: 0258-7025(2009)03-0705-05

氢氟酸填充腐蚀方法在光子晶体光纤制造中的应用

李 婧 张伟刚 杜江兵 姜 萌 张 琦 刘亚萍 刘卓琳 屈柯楠 刘艳格 王 志

(南开大学现代光学所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 提出一种研制光子晶体光纤(PCF)的氢氟酸填充腐蚀新方法。该方法将氢氟酸填充于已拉制的光子晶体光纤空气孔中,通过改变其横截面结构,研制具有特定结构的光子晶体光纤,改变其导光性能。研究表明,随着对光子晶体光纤空气孔腐蚀程度的加深,其泄露损耗和散射损耗不断减小,非线性系数明显提高,纤芯基模的有效折射率和包层的等效折射率相应减小,群速度色散也随之改变。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 氢氟酸; 填充; 腐蚀; 空气孔

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0705

Application of Hydrofluoric Acid's Corrosive Properties in the Fabrication of Photonic Crystal Fibers

Li Jing Zhang Weigang Du Jiangbing Jiang Meng Zhang Qi Liu Yaping
Liu Zhuolin Qu Kenan Liu Yange Wang Zhi

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

Abstract We introduce a new fabrication method for photonic crystal fibers (PCFs) using the hydrofluoric acid's corrosive property. The transversal structure of a PCF can be changed by filling its air-holes with hydrofluoric acid, which corrodes the glass wall around and therefore widens the air-holes. By accurately controlling the hydrofluoric acid corrosion time, we can enlarge the air holes up to millimeter precision. This method can be used as a supplement of the traditional fusing-drawing technology to realize more complicated structures of PCFs in practice. Meanwhile, this method greatly modifies the light-guiding properties of PCFs. Experimental results indicate that, with the increase of corrosion time, the leakage loss and the scattering loss will decrease, the nonlinear coefficient will increase, the effective refractive index of fundamental mode and the equivalent refractive index of cladding will decrease, and the group velocity dispersion will be modified accordingly.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; hydrofluoric acid; filling; corrosion; air-hole

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)^[1,2]的导光特性主要取决于其包层空气孔的形状、大小、数量和排列方式^[3]。通过改变 PCF 包层结构,可以设计结构丰富的 PCF,获得诸多有别于传统光纤的优异特性,如无截止单模传输、高双折射、高非线性、大模场面积、超低

损耗、特殊的色散特性等。目前,理论分析和实验研究涉及的 PCF 包层结构主要有三角分布圆形空气孔结构、矩形分布圆形空气孔结构、蜂窝型分布圆形空气孔结构、蜂窝型分布椭圆形空气孔结构^[4]以及 Kagome 型结构^[5]等。

制备光纤的堆叠法、挤压法都需要经过一个高

收稿日期: 2008-12-08; **收到修改稿日期**: 2009-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 60577018, 10774077)、国家 863 计划(2006AA01Z217)、天津市自然科学基金重点项目(06YFJZJC00300)和中国博士后科学基金(20060400687)资助课题。

作者简介: 李 婧(1984—),女,硕士,主要从事光子技术及光通信方面的研究。E-mail: lijingnk@yahoo.com.cn

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、新型光电子器件方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

温熔融拉制的过程^[5,6]。在此过程中,融化的石英玻璃的表面张力将使光纤空气孔形状产生变形,往往得不到与理论设计完全符合的光纤。而且,目前很多具有特殊空气孔形状及分布的 PCF 依然无法被拉制出来,特别是理论设计出来的具有诸多优异特性的光纤,比如椭圆形空气孔形状的高双折射光子晶体光纤,大负色散的色散补偿光纤、光子带隙光纤等。采用传统光纤拉制方法,要想获得不同结构的光纤,只能通过改变预制棒的结构和控制熔融过程进行拉制^[8]。而这种方法只能满足于一些具有简单结构光纤的拉制。

很难找到一种有效的方法,对已经拉制好的光子晶体光纤进行后期加工。上述这些问题已制约了 PCF 的设计与研制,对新型 PCF 的需求已对传统光纤拉制方法提出了挑战。本文提出一种研制 PCF 的氢氟酸填充腐蚀新方法,这种方法可视为对传统光纤拉制方法的一种有益补充。该方法将氢氟酸填充于已拉制的光子晶体光纤空气孔中,通过腐蚀增大空气孔来改变包层横截面的结构,达到研制具有特定结构的 PCF 的目的。文献[8]中提到了一种类似的方法,即通过在拉制前用氢氟酸预处理预制棒来改变光纤结构,然而,这种方法只是对预制棒进行加工。而本文提出的新方法则是对用熔融拉制方法制造出来的光纤进行后期加工,因此,新方法较前者自由度大,处理效果也更为明显,能够保障光纤结

构改变的质量。

采用这种新方法,不仅可以得到具有更复杂空气孔结构的 PCF,还可以改变 PCF 的导光特性。研究表明,随着对光子晶体光纤空气孔腐蚀程度的加深,其泄露损耗和散射损耗不断减小,非线性系数明显提高,纤芯基模的有效折射率和包层的等效折射率相应减小,群速度色散也随之改变。此外,结合选择性填充的方法,还可以得到更多具有优异特性的光纤。例如,通过对一种高双折射实芯光子晶体光纤进行选择性填充,其双折射得到了明显提高,并直接导致了一种类似于双芯空心带隙型光子晶体结构的产生。新方法也使得直接从折射率引导型光子晶体光纤转化为带隙型光子晶体光纤成为可能。

2 氢氟酸填充腐蚀改变光子晶体光纤的导光特性

图 1(a) 展示了一种具有不均匀包层空气孔的实心 PCF 横截面结构。这种 PCF 的包层空气孔近似为圆形,其平均空气孔直径 $d=2.42 \mu\text{m}$,平均空气孔间隔 $\Lambda=5.18 \mu\text{m}$ 。将体积分数为 47% 的氢氟酸填充到空气孔中,分别经过 60 s, 120 s 腐蚀之后,空气孔直径分别增大到 $3.56 \mu\text{m}$ (图 1(b)) 和 $4.65 \mu\text{m}$ (图 1(c))。为了更精确控制腐蚀程度,可以适当降低氢氟酸浓度,其腐蚀精度可以控制在毫米量级以内。

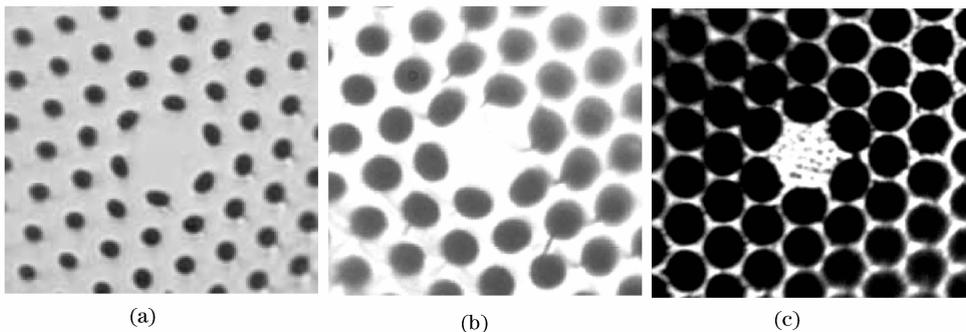


图 1 一种具有不均匀包层空气孔的实心光子晶体光纤的横截面结构

(a) 腐蚀之前;(b) 腐蚀 60 s 后;(c) 腐蚀 120 s 后

Fig. 1 Cross section of a solid-core PCF with uneven air-holes in the cladding
(a) Before corrosion; (b) After corrosion time of 60 s; (c) After corrosion time of 120 s

为便于数值计算分析,用图 2 所示的理想模型代替图 1 所示的实际光纤结构。在此模型中,包层具有六角型分布的圆形空气孔结构,纤芯通过移除一个空气孔得到。为不失一般性且能提高计算效率,这里只考虑四层空气孔结构。

利用有限元分析方法,计算了波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时图 2 所示 PCF 的损耗、非线性系数和折射率随腐

蚀程度的变化。

2.1 损耗

光纤的一个重要参量就是光信号在光纤内传输时功率的损耗。PCF 损耗主要包括泄露损耗、散射损耗和吸收损耗^[9]等。其中,吸收损耗来自光纤构成材料对光的吸收,它主要由材料的性质决定。而泄露损耗和散射损耗则主要由包层空气孔的结构和

空气孔内表面的粗糙程度所决定。这两种损耗构成了 PCF 损耗的最主要部分。

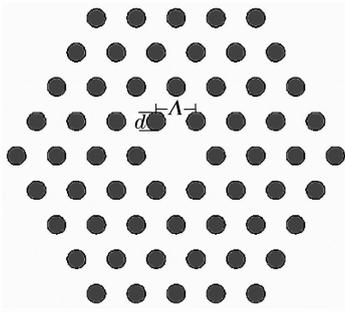


图 2 用于数值计算的理想模型

Fig. 2 Ideal model used for numerical analysis

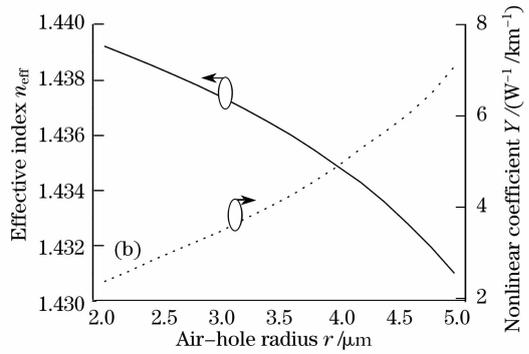
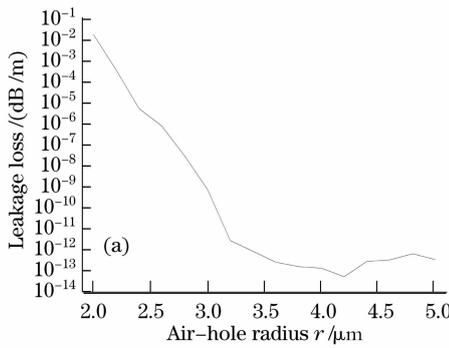


图 3 泄露损耗(a)非线性系数和基模的有效折射率(b)随空气孔直径增加的变化情况($\lambda=1.55 \mu\text{m}$)

Fig. 3 Change of leakage loss, nonlinear coefficient and fundamental mode's effective refractive index (b)

along with the enlargement of air-holes' diameter, at wavelength $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

就散射损耗而言, PCF 中不仅存在因类似普通光纤材料不均而出现的瑞利 (Rayleigh) 散射损耗, 而且在光纤中存在大量的空气孔, 孔壁表面的粗糙结构还造成额外的 Rayleigh 散射^[10]。因此, 在研制低损耗 PCF 时, 保持空气孔光滑亦很必要, 即空气孔内表面越光滑, 散射损耗则越小。经过氢氟酸填充腐蚀, PCF 包层空气孔内表面将更加平滑, 散射损耗将明显减小。

2.2 非线性系数

非线性系数 γ 是衡量非线性效应大小的重要物理量, PCF 非线性系数可以表示为^[11]

$$\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{\text{eff}}$$

式中 λ 为波长, A_{eff} 为有效模场面积, n_2 为非线性有效折射率, 是由非线性效应引起的折射率变化的系数, 与石英的材料性质有关。对于硅玻璃制成的光纤, 其值为 $2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ 。从以上公式可以看出, 当非线性有效折射率和波长一定时, 非线性系数和有效模场面积成反比。

从图 3(b) 可知, 非线性系数随着空气孔的增大

而递增。这是由于包层空气孔的增大和纤芯尺寸的缩小直接导致有效模场面积 A_{eff} 的减小, 从而使非线性系数增大。数值计算表明, 在腐蚀之前(图 1(a) 所示), 非线性系数为 $2.89 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 腐蚀 60 s 之后(图 1(b) 所示), 非线性系数变为 $4.25 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 而腐蚀 120 s 之后(图 1(c) 所示), 非线性系数增大到 $6.10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

高非线性光子晶体光纤 (HNPCF) 可用于超连续谱的产生、四波混频、自相位调制、光学参数放大、波长变换、拉曼效应等^[12]。以往的 HNPCF, 其光学性质均由结构设计和拉制过程决定, 因而传统光纤拉制技术的局限性也必将导致 HNPCF 拉制的局限性。而利用氢氟酸填充腐蚀的方法, 可以打破这种局限, 从而获得具有更高非线性的 PCF。

2.3 基模的有效折射率和包层的等效折射率

PCF 纤芯基模的有效折射率和包层的等效折射率不仅与波长有关, 还与包层空气孔结构有关。图 3(b) 给出了当波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 基模的有效折射率随空气孔尺寸增加的变化情况。从图中可以明显看出, 基模的有效折射率随着空气孔的增大而递

减。同时,包层的等效折射率也随空气孔直径的增大而减小。这是因为大空气孔直径导致更大的空气填充率,从而减小了包层的等效折射率。如果在这种 PCF 上写制光栅,其折射率变化将导致谐振波长漂移^[13]。因此,可采用氢氟酸填充腐蚀方法,改变光子晶体光纤光栅(PCFG)的谐振波长。

此外,根据参考文献^[14],群速度色散,特别是波导色散将随空气孔增大而改变。于是,可以利用氢氟酸填充腐蚀方法,改变 PCF 的群速度色散特性。由此可以推知,通过氢氟酸选择性填充 PCF 包层空气孔,文献^[15]中描述的大负色散 PCF 将可望实现。

3 选择性填充腐蚀方法及其应用

将氢氟酸填充到 PCF 所有空气孔中,以使所有空气孔通过腐蚀同时增大。但如果能够实现选择性填充,即将氢氟酸选择性地填入 PCF 一部分空气孔,增大某些空气孔的尺寸,而不改变其他空气孔,必将极大地提高新方法应用的范围,增大设计的自由度,研制结构更加丰富的 PCF。例如,利用电弧放电方法预先处理光纤端面,并对 PCF 选择性填充氢氟酸,得到了一些很有价值的结果。

图 4(a)是实验中用到的一种高双折射 PCF 截面图。该光纤包层由靠近纤芯的两个大空气孔和六角形分布的小空气孔构成。大空气孔的直径为 $7.74 \mu\text{m}$,小空气孔的直径和间距分别为 $5.31 \mu\text{m}$ 和 $7.12 \mu\text{m}$ 。首先,对光纤端面进行电弧放电;控制放电时间,使端面小空气孔全部坍塌,保留大空气孔不坍塌(虽然有所缩小),经过电弧放电处理后的光纤截面如图 4(b)所示。然后,将氢氟酸从端面导入;由于小空气孔已全部坍塌,氢氟酸将只能进入两

个大空气孔,从而只使两个大孔的尺寸得以增大。

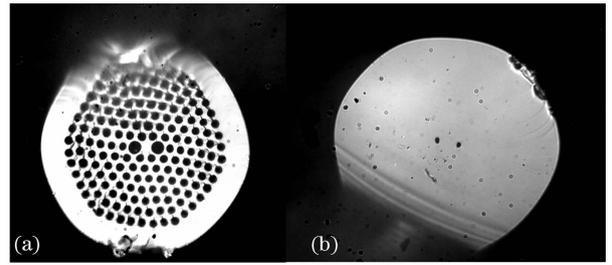


图 4 具有两个大空气孔和六角形分布小空气孔的高双折射 PCF 的截面示意图。(a) 处理之前 (b) 经过电弧放电处理后

Fig. 4 Cross section of a highly birefringent PCF.

a) Original structure; (b) After an arc discharge fusion process

图 5(a)~(d)分别给出了氢氟酸在两个大空气孔中停留不同时间后,PCF 横截面实验图。其中从(a~d),腐蚀时间逐渐增加,显然其腐蚀程度也逐渐加大。图 5(a)和(b)所示的 PCF,两个大空气孔的直径分别增加到 $8 \mu\text{m}$ 和 $8.8 \mu\text{m}$,其双折射则分别增加到 0.000399 和 0.000786 。采用这种方法,可以研制更高双折射的 PCF。

需要注意的是,如果氢氟酸腐蚀时间过长,则两个大空气孔周围玻璃可能被全部腐蚀掉,氢氟酸将流入邻近小空气孔,从而增大这些小孔的尺寸,如图 5(c)所示。一旦发生这种情况,PCF 双折射会反而减小^[15,16]。因此,随着氢氟酸腐蚀时间的延长,PCF 双折射先会递增,到达一个极值点之后会再减小(分析表明,后面的变化很复杂,其变化机制正在探索之中)。该极值点存在于两个大空气孔周围玻璃全部被氢氟酸腐蚀掉的那一时刻^[17,18]。图 6 给出了双折射随腐蚀程度的变化趋势,其中双折射的极值点出现在 $r=5.08 \mu\text{m}$ 处。

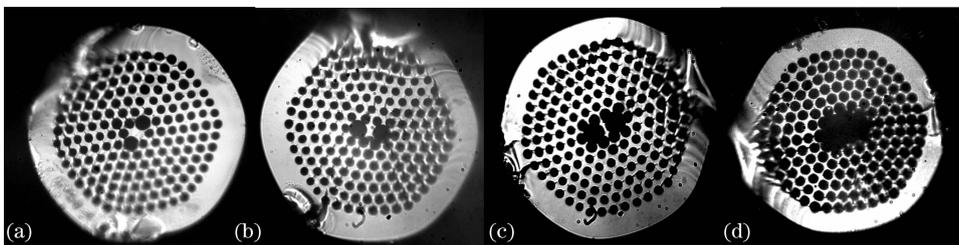


图 5 将氢氟酸选择性填充到 PCF 两个大空气孔里,经过不同腐蚀时间后 PCF 横截面实验图,从(a~d)的腐蚀时间逐渐增加

Fig. 5 Cross section of PCF after filling the two big holes with hydrofluoric acid.

From (a~d) the corrosion time increase in turn

值得指出的是,随着腐蚀程度的增加,PCF 固体纤芯将不断缩小,这会直接导致有效模场面积的减小,使非线性系数增加。当波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,非线性系数由腐蚀前的 $3.12 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 增加到了

$3.28 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (图 5(a))和 3.56 (图 5(b))。腐蚀程度进一步加深,可得到一种具有很高对称性的 PCF,它类似于双芯空心光子带隙光纤结构,如图 5(c)所示。这种 PCF 纤芯很小,周围玻璃几乎全部

被腐蚀掉,但包层小空气孔则未经过腐蚀,仍然保持较小的空气填充率。具有这种特殊结构的 PCF,其双折射和非线性系数分别为 $0.004317 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $6.21 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)。经研究可知,由于空气填充率太低,包层空气孔的归一化半径太小以及空气孔不够规整等因素,致使该 PCF 尚未实现带隙导光。深入分析表明,如果用于填充腐蚀的是比空气填充率更高的实芯光纤,那么,经过腐蚀后的光纤则有望实现带隙导光。因此,这种方法使得从实芯光纤直接得到空芯光子带隙光纤在实验上具有可行性。如果进一步延长腐蚀的时间,将得到如图 5(d)所示类似于空心光纤的结构。

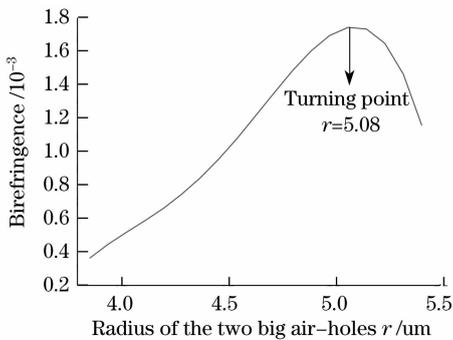


图 6 PCF 双折射随两个大空气孔直径的变化

Fig. 6 Change of PCF birefringence along with the enlargement of two big air-holes' diameters

4 结 论

提出了一种基于氢氟酸填充腐蚀的光子晶体光纤制作方法。该方法鉴于传统熔融拉制方法固有的局限性,是在光纤制作方法上所进行的新探索。通过对已控制的光子晶体光纤进行氢氟酸填充腐蚀,不仅可以研制具有特定结构(采用传统方法不能实现)的光子晶体光纤,而且还可以较精确地控制光子晶体光纤的导光性能。与传统光纤拉制方法相比,采用这种新方法可以研制更低损耗、更大非线性的光子晶体光纤。此外,由于群速度色散,特别是波导色散将随空气孔的增大而改变,因此该方法可利于改变光子晶体光纤的群速度色散特性^[19]。进一步研究表明,若对光子晶体光纤光栅进行氢氟酸选择性填充腐蚀,还可以改变其谐振波长及其光谱谱形。随着对选择性填充腐蚀方法的深入探索,研制更多具有新颖结构的光子晶体光纤将得以实现。同时,这种新方法将因其具有灵活的设计方法和更大的自由度,在新型光子晶体光纤的设计及研制中发挥愈来愈重要的作用,其应用范围将不断扩展。

参 考 文 献

- Philip Russell. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**: 358~362
- P. St. J. Russell. Photonic-crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**: 4729~4749
- Shen Linping, Huang Weiping, Jian Shuisheng. Design of photonic crystal fibers for dispersion-related applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(7): 1664~1651
- N. G. R. Broderick, T. M. Nonoro, P. J. Bennett *et al.*. Nonlinearity in holey fibers: measurement and future opportunities[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**: 1395~1397
- J. B. Nielsen, T. Ssndergaard, S. E. Barkou *et al.*. Two-dimensional Kagome structure, fundamental hexagonal photonic crystal configuration[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(20): 1736~1737
- Zhang Weigang. Progress in microstructure optical fiber desingning[J]. *Progress in Physics*, 2007, **27**(4): 449~466
张伟刚. 微结构光纤传感器设计的新进展[J]. *物理学进展*, 2007, **27**(4): 449~466
- J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**: 1547~1549
- 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
- G. Y. Zhou, Z. Y. Hou, S. G. Li *et al.*. Fabrication of glass photonic crystal fibers with a die-cast process[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(18): 4433~4436
- Y. Xu, A. Yariv. Loss analysis of air-core photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**: 1885~1887
- K. Tajima, J. Zhou, K. Nakajima *et al.*. Ultralow loss and long length photonic crystal fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**: 7~10
- G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Third Edition, San Diego: Academic Press, 2001. 29
- Li Chunlei, Sheng Qiuqin, Kai Guiyun *et al.*. Research of the nonlinearity of the photonic crystal fiber [J]. *Optoelectronic Technology*, 2005, **25**(2): 85~96
李春雷, 盛秋琴, 开桂云等. 光子晶体光纤的非线性特性研究[J]. *光电子技术*, 2005, **25**(2): 85~96
- Liu Yan, Liu Jianguo. The modal cutoff properties and exciting conditions of higher order resonant modes for ge-doped photonic crystal fiber Bragg grating[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(2): 147~150
李燕, 刘建国. 光子晶体光纤光栅模式截止与高阶模的谐振条件[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(2): 147~150
- R. K. Sinha, Shailendra K. Varshney. Dispersion properties of photonic crystal fibers[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, **37**(2): 129~132
- Yanfen Li, Bowen Liu, Zihan Wang *et al.*. Influence on photonic crystal fiber dispersion of the size of air holes in different rings within the cladding[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2): 75~77
- Y. Ni, L. Zhang, L. An. Dual-core photonic crystal fiber for dispersion compensation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6): 1516~1518
- Lou Shuqin, Wang Zhi, Ren Guobin *et al.*. Polarization properties of elliptical core crystal fiber[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(9): 1021~1025
娄淑琴, 王智, 任国斌等. 椭圆芯光子晶体光纤的偏振特性[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(9): 1021~1025
- Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~562
龚桃荣, 延凤平, 王琳等. 高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 559~562