

圆形晶格高双折射多孔光纤

林建强^{1,2} 石志东¹ 何伟¹ 季敏宁¹ 薛琴^{1,3}

¹ 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072
² 广西工学院信息与计算科学系, 广西 柳州 545006
³ 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022

摘要 提出了一种高双折射多孔光纤几何结构,其包层气孔呈圆形晶格阵列。应用有限差分波束传播法对其双折射特性进行了数值模拟,分析了截面结构参数对双折射特性的影响,比较了圆形、四边形和八边形晶格阵列产生的双折射。研究表明,这种圆形晶格多孔光纤的模式双折射在 $1.7\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 波长范围内可达到 10^{-2} 量级;在截面结构参数相同的情况下,圆形晶格多孔光纤比四边形和八边形晶格多孔光纤具有更高的双折射,其偏振拍长值在 $0.6\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 波长范围内都处于亚毫米量级。这种光纤适合于制作光纤偏振器件或偏振干涉型光纤传感器。

关键词 光纤光学;模式双折射;有限差分波束传播法;多孔光纤;偏振拍长

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.120601

A Highly Birefringent Holey Fiber with Round Lattice

Lin Jianqiang^{1,2} Shi Zhidong¹ He Wei¹ Ji Mingning¹ Xue Qin^{1,3}

¹ Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China
² Department of Information and Computation of Science, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China
³ School of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China

Abstract A high-birefringence holey fiber geometry is proposed, in which the cladding holes form a round lattice array. The birefringence properties are simulated by the finite difference beam propagation method. The influence of the cross-section structure parameters on birefringence is analyzed. The birefringence performances from round, quadrilateral and octagonal lattice arrays are compared. The results show that the modal birefringence of the holey fiber with round lattice can reach the order of 10^{-2} in $1.7\sim 2.0\ \mu\text{m}$ wavelength range. In the cross-section under the same structural parameters, the holey fiber with round lattice has a higher birefringence than those with quadrilateral and octagonal lattices. The polarization beat length is in sub-millimeter level in the $0.6\sim 2.0\ \mu\text{m}$ wavelength range. This fiber is suitable for making polarization interferometric fiber devices and sensors.

Key words fiber optics; modal birefringence; finite difference beam propagation method; holey fiber; polarization beat length

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.2370

1 引言

多孔光纤(HF),又称光子晶体光纤(PCF),其截面几何结构参数可以灵活地调节,能够实现常规光纤无法实现的许多特性,如无截止单模传输、高非线性效应、高双折射、色散平坦和超连续谱等^[1~7],因此多孔光

收稿日期: 2011-06-20; **收到修改稿日期**: 2011-08-09; **网络出版日期**: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(60777031, 11074164, 61107075)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)和广西教育厅科研立项项目(201010LX221, 201106LX403)资助课题。

作者简介: 林建强(1964—),男,博士研究生,主要从事微结构光纤优化设计方面的研究。E-mail: linwork@163.com

导师简介: 石志东(1964—),男,博士,研究员,主要从事特种光纤偏振特性方面的研究。E-mail: zdshi@shu.edu.cn

(通信联系人)

纤成为光纤通信和光纤传感领域的研究热点。就光纤偏振特性而言,通过适当地设计光纤截面结构的几何参数,可以获得较高的模式双折射。高双折射多孔光纤可用于制作光纤偏振器件或偏振干涉型光纤传感器,如光纤陀螺仪等,可以有效地提高系统的稳定性和可靠性。

通常高双折射多孔光纤的包层空气孔分布呈六边形、八边形和四边形等正多边形,其中对六边形晶格多孔光纤的研究相对较早、也较多^[8,9],对于八边形和四边形多孔光纤近年来也有不少研究涉及^[10~15]。目前所研究的多孔光纤模式双折射一般为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 量级。对于多孔光纤高双折射的影响因素,如空气孔的形状(如圆孔、椭圆孔、矩形孔)、空气孔的大小、空气孔的数量、空气孔的间距等截面结构几何参数已经有了较多的论述,而对于包层晶格阵列的分布形状对双折射的影响则研究较少。文献[14]对结构参数相似的八边形和六边形晶格多孔光纤的双折射特性等进行了比较,认为八边形晶格多孔光纤的双折射要优于六边形晶格多孔光纤。不过本文认为八边形和六边形晶格多孔光纤的截面结构参数有较大的差异:如果两者空气孔的层数相同,则两者的气孔数量有较大差别;如果两者空气孔直径相同,则两者的空气填充比会有较大差别。若要保证空气填充比一致,则两者的空气孔直径就会有较大的不同,有文献指出在空气填充比一致的情况下八边形晶格多孔光纤的气孔直径要比六边形晶格多孔光纤的气孔直径小 10% ^[15]。

本文提出一种圆形晶格多孔光纤。首先对包层结构进行优化设计,以获得尽可能高的双折射,然后再比较相似结构参数的八边形和四边形晶格多孔光纤,分析包层晶格阵列对称性对双折射的影响。选择八边形和四边形晶格多孔光纤进行比较,是因为圆形晶格多孔光纤和这两种多孔光纤的截面结构几何参数如气孔的大小、数量和空气孔层的间距等可以完全一样,仅有包层晶格阵列的形状不同,所以有较强的可比性。研究表明,在气孔的大小、数量和空气孔层的间距等截面结构几何参数相同的条件下,圆形晶格多孔光纤可以获得比八边形和四边形晶格多孔光纤更高的双折射。

2 包层结构模型和分析方法

如图1所示,圆形晶格双折射多孔光纤的包层有三层空气孔,呈圆形阵列分布。靠近纤芯一层气孔中相互对称的一对气孔用 d_1 表示,其余的气孔用 d_2 表示;靠外的两层空气孔用 d_3 表示。 d_1, d_2 和 d_3 分别为三种空气孔的直径, Δ 为相邻两层空气孔的间距。

圆形晶格多孔光纤包层的几何结构比较复杂,其双折射特性很难用严格的解析方法进行理论推导。本文采用有限差分波束传播法对圆形晶格多孔光纤的双折射特性进行数值模拟分析。

有限差分波束传播法广泛用于集成光子和光纤器件的设计和分析,可以对很多复杂几何形状的波导进行模拟分析,很多商用数值模拟软件采用有限差分波束传播法。该方法是利用有限差分法对亥姆霍兹方程做抛物线或近轴近似,利用慢变包络近似沿传播方向(z 方向)将电磁场分量分解成快变项和慢变项,并代入亥姆霍兹方程,在横截面和轴向进行离散化处理,将微分方程化为差分形式,即可推导出多孔光纤内各点的场值:

$$j \frac{\partial E_x}{\partial z} = A_{xx} E_x + A_{xy} E_y, \quad (1)$$

$$j \frac{\partial E_y}{\partial z} = A_{yy} E_y + A_{yx} E_x, \quad (2)$$

$$j \frac{\partial H_x}{\partial z} = B_{xx} H_x + B_{xy} H_y, \quad (3)$$

$$j \frac{\partial H_y}{\partial z} = B_{yy} H_y + B_{yx} H_x, \quad (4)$$

式中 $A_{xx}, A_{xy}, A_{yx}, A_{yy}, B_{xx}, B_{xy}, B_{yx}, B_{yy}$ 为差分算子,边界上的场采用完全透明边界条件,通过邻近计算区

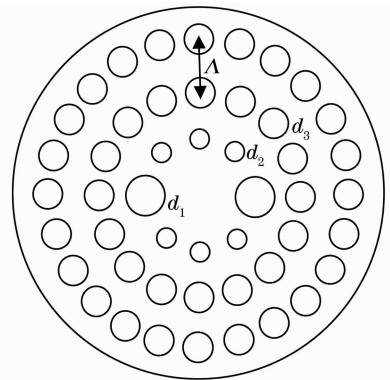


图1 圆形晶格高双折射多孔光纤示意图
Fig. 1 Schematic of highly birefringent holey fiber with round lattice

域内部的场量得到。

3 数值计算结果与分析

空气孔的折射率设为 1.00, 石英材料的折射率色散曲线由 Sellmeier 方程给出: $n = (1 + n_1 + n_2 + n_3)^{1/2}$, 其中 $n_1 = 0.6961663 \times \lambda^2 / (\lambda^2 - 0.0684043^2)$, $n_2 = 0.4079426 \times \lambda^2 / (\lambda^2 - 0.1162414^2)$, $n_3 = 0.8974794 \times \lambda^2 / (\lambda^2 - 9.896161^2)$ 。圆型多孔光纤截面的初始几何参数为 $d_1 = d_2 = d_3 = 1.50 \mu\text{m}$, $\Lambda = 3.00 \mu\text{m}$, 这时截面的几何对称性没有受到破坏, 所以没有双折射。

考察 d_1 对模式双折射的影响。令 $d_2 = d_3 = 1.50 \mu\text{m}$, $\Lambda = 3.00 \mu\text{m}$, 计算 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内不同 d_1 值的双折射色散曲线, 模拟结果如图 2 所示。结果表明, 双折射色散曲线随着 d_1 的增大而逐渐上移, 在波长较长的一端双折射曲线上移明显, 而在较短的波长一端影响不明显。换句话说, 增大 d_1 可以明显提高长波长端的双折射。因为随着波长的增加传输光会更多地进入包层, 所以包层结构的变化更多地影响波长较长的传输光, d_1 增大会改变 x 方向的空气填充比, 有效折射率随之变化, 而 y 方向的空气填充比没有变化, 所以 x 和 y 方向的有效折射率差增大。

考察 d_2 对模式双折射的影响。令 $d_1 = 2.40 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.50 \mu\text{m}$, $\Lambda = 3.00 \mu\text{m}$, 计算 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内不同 d_2 值的双折射色散曲线, 如图 3 所示。结果表明, d_2 对双折射色散曲线的影响远小于 d_1 的影响。 d_2 从 $1.65 \mu\text{m}$ 减小至 $1.05 \mu\text{m}$ 时, y 方向空气填充比下降, 双折射仅略微增大。尽管 d_2 变化对双折射的影响不大, 从预制棒制作的角度考虑, d_2 应该取较 d_1 小的值, 为增大的 d_1 气孔腾出空间; 但是 d_2 也不能过小, 在本例中, $d_2 < 0.90 \mu\text{m}$ 将使传输光大量渗入包层, 损耗急剧增加。

考察 d_3 对模式双折射的影响。令 $d_1 = 2.40 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.20 \mu\text{m}$, $\Lambda = 3.00 \mu\text{m}$, 在 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内不同 d_3 值的双折射色散曲线如图 4 所示。结果表明, d_3 对双折射色散曲线几乎没有影响, 这是因为 d_3 气孔在 x 和 y 方向上的对称性没有任何差别, d_3 的变化会同时影响两个方向的有效折射率, 但是对二者的有效折射率差, 即双折射没有什么影响。

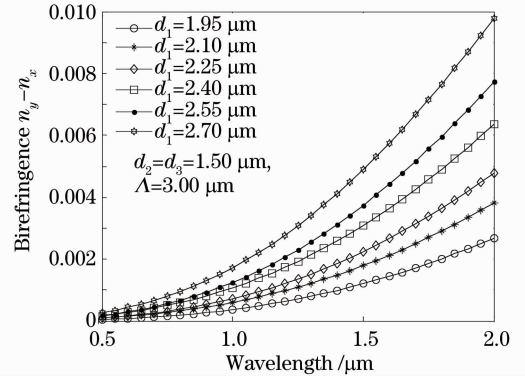


图 2 不同 d_1 值的双折射色散曲线

Fig. 2 Birefringence dispersion curves with different d_1

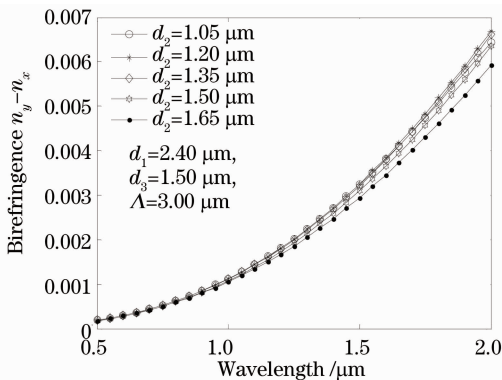


图 3 不同 d_2 值的双折射色散曲线

Fig. 3 Birefringence dispersion curves with different d_2

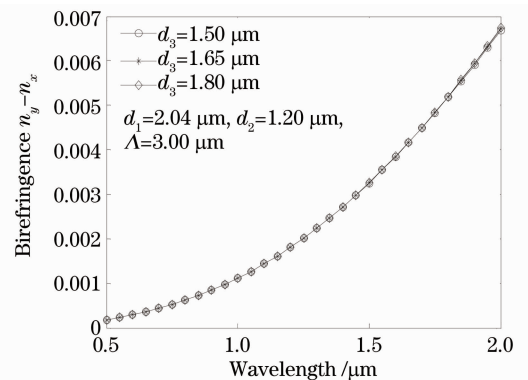


图 4 不同 d_3 值的双折射色散曲线

Fig. 4 Birefringence dispersion curves with different d_3

考察 Λ 对双折射的影响。令 $d_1 = 2.40 \mu\text{m}$, $d_2 = 1.20 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.50 \mu\text{m}$, 在 $0.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内不同 Λ 值的双折射色散曲线如图 5 所示。结果表明, Λ 对双折射色散曲线有较大影响, 空气层的间距越小, 双折射越高。

由分析可知, 4 个截面几何参数中, 纤芯附近大孔的尺寸和空气孔层的间距对双折射的影响较大, 它们

对双折射的影响规律可以为优化设计高双折射多孔光纤提供参考依据。

应当指出的是,尽管 d_2 和 d_3 对双折射的影响不大,但是从制作光纤预制棒的角度来看并不能够随意取值,其大小受限于微气孔排列成的圆形空气层直径。 d_3 的大小应该使得中间和外层空气层中相邻微气孔可以紧密排列,且有均匀的角间距;内层由于 x 轴上两个气孔直径 d_1 要尽可能增大,为保证内层空气层直径不变,势必要调整内层上其他气孔的直径 d_2 的大小;从便于制作的角度而言,可以只调整内层在 y 轴上的两个微气孔直径。

4 与四边形和八边形晶格多孔光纤的比较

图 6 所示的四边形和八边形晶格多孔光纤与图 1 所示圆形晶格多孔光纤具有类似的包层结构,也是纤芯缺失一个气孔,包层有三层空气孔,也具有三种直径的气孔 d_1, d_2 和 d_3 ,气孔大小、数量及相邻两层空气孔的间距 Λ 与图 1 所示圆形多孔光纤一样,它们的差别仅在于气孔晶格阵列不同。若假定以对角线长度 L (对于圆形则为直径)代表光纤包层气孔阵列的横向最大线度,那么对于同样的 L ,四边形的面积小于八边形的面积,八边形的面积又小于圆形的面积。由于三种多孔光纤气孔的数量是一样的,要保持两层空气孔的间距 Λ 一致,就要求四边形晶格的 L 大于八边形晶格,而八边形晶格的 L 大于圆形晶格,所以在 x 和 y 两个正交方向上,四边形晶格的线度最大,圆形的线度最小。

若令 $d_1=2.40 \mu\text{m}, d_2=1.20 \mu\text{m}, d_3=1.50 \mu\text{m}, \Lambda=2.55 \mu\text{m}$,具有这种截面结构参数的圆形晶格多孔光纤有较高的双折射。圆形晶格多孔光纤与具有相同截面结构参数的四边形和八边形晶格多孔光纤在 $0.5\sim 2.0 \mu\text{m}$ 波长范围内的双折射和偏振拍长色散曲线如图 7 所示。图 7 表明在截面结构参数一样的情况下,四边形晶格多孔光纤的双折射最低,八边形晶格多孔光纤的双折射次之,圆形晶格多孔光纤的双折射最高。如果一个系统绕某一固定轴转动 $2\pi/n$ 角度后状态保持不变,则该系统具有 n 重转动对称性,这表明双折射随着晶格阵列对称性重数的增加而增大。

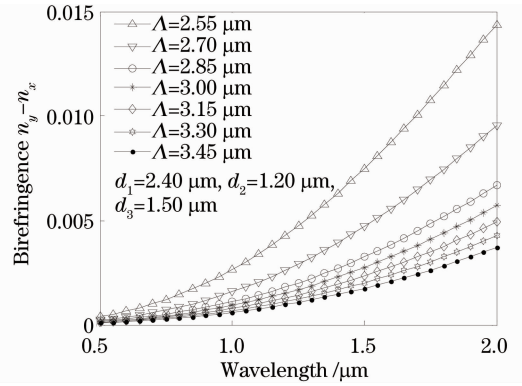


图 5 不同 Λ 值的双折射色散曲线

Fig. 5 Birefringence dispersion curves with different Λ

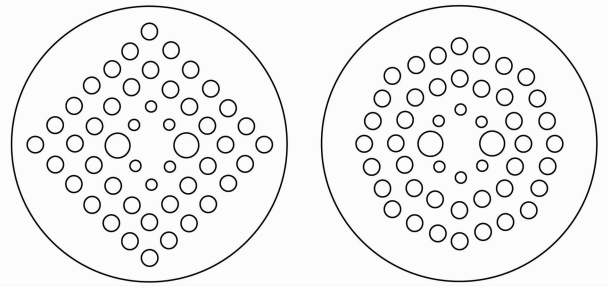


图 6 四边形、八边形晶格多孔光纤示意图

Fig. 6 Schematic of holey fibers with quadrilateral and octagonal lattices

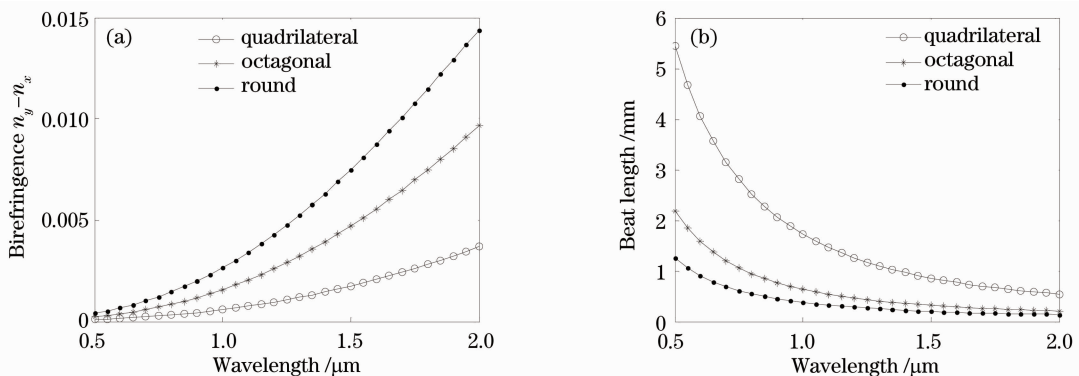


图 7 圆形、四边形和八边形晶格多孔光纤的双折射(a)和偏振拍长(b)色散曲线

Fig. 7 (a) Birefringence and (b) polarization beat length dispersion curves of holey fibers with round, quadrilateral and octagonal lattices

5 结 论

提出了一种高双折射多孔光纤几何结构,其包层气孔呈圆形晶格阵列,在其截面结构参数中,纤芯附近大气孔和空气孔层的间距对双折射有较大的影响,纤芯附近的小气孔和其他本底气孔则影响较小。包层晶格阵列的形状对双折射也有较大影响,在截面结构参数一样的情况下,双折射随着晶格阵列的形状从正多边形向圆形过渡而增大,所以圆形晶格多孔光纤比四边形和八边形晶格多孔光纤具有更高的双折射。在 $1.7\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 波长范围内,其模式双折射可达到 10^{-2} 量级,其偏振拍长值在 $0.6\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 波长范围内都处于亚毫米量级。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Cheng Tonglei, Chai Lu, Li Yanfeng *et al.*. Novel cluster-solid-core photonic crystal fiber with high nonlinearity and large effective mode-field area[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 658~662
程同蕾, 柴路, 栗岩锋等. 具有高非线性和大有效模场面积的多固体芯集束型光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 658~662
- 3 Haifeng Xuan, Jian Ju, Wei Jin. Highly birefringent optical microfibers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(4): 3828~3838
- 4 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
- 5 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
- 6 Liang Fang, Jianlin Zhao, Xuetao Gan. Ultra broadband-flattened dispersion photonic crystal fiber for supercontinuum generation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1028~1031
- 7 Guo Changying, Li Aiping. Studies on mechanism of supercontinuum generation in anomalous dispersion region of photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 49~53
郭常盈, 李爱萍. 光子晶体光纤反常色散区超连续谱产生机理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(7): 49~53
- 8 Guo Lixia, Wu Yanrong, Xue Wenrui *et al.*. Dispersion properties of photonic crystal fiber with composite hexagonal air hole lattice[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 935~939
郭丽霞, 武延荣, 薛文瑞等. 复合六边形空气孔格点光子晶体光纤的色散特性分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 935~939
- 9 Zhang Xia, Wang Zinan, Yang Guangqiang *et al.*. Birefringence in squeezed hexagonal lattice microstructure fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 25~28
张霞, 王子南, 杨广强等. 椭圆六角分布微结构光纤中的双折射[J]. 光学学报, 2006, **26**(1): 25~28
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 S. M. A. Razzak, Y. Namihira. Proposal for highly nonlinear dispersion-flattened octagonal photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(4): 249~251
- 14 Yang Qianqian, Hou Lantian. Octagonal photonic crystal fiber of birefringence[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(12): 8345~8350
杨倩倩, 侯蓝田. 八边形结构的双折射光子晶体光纤[J]. 物理学报, 2009, **58**(12): 8345~8350
- 15 Tan Xiaoling, Geng Youfu, Wang Peng *et al.*. Propagation properties of the octagonal photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 729~733
谭晓玲, 耿优福, 王鹏等. 八角格子光子晶体光纤的传输特性[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 729~733