

一种圆形晶格多孔光纤偏振拍长的消色差特性研究

刘 珍 石志东 张海燕 刘 丹 毛艳萍 解清明

(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)

摘要 针对一种圆形晶格微结构光纤,采用有限差分波束传播法对多孔光纤的模式双折射特性进行数值模拟。通过分析横截面结构参数的变化对模式双折射的影响,得到了合适的光纤结构参数,其偏振拍长可以在 1310 nm 附近较宽的波长范围内基本保持稳定,工作带宽可达 200 nm,具有较好的消色差特性。这种结构的光纤适合制作宽带稳定的消色差波片。

关键词 光纤光学;多孔光纤;模式双折射;偏振拍长;消色差特性

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.110601

Study on Achromatic Characteristics of Holey Birefringence Fiber with Round Lattice

Liu Zhen Shi Zhidong Zhang Haiyan Liu Dan Mao Yanping Xie Qingming

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract For a round lattice micro-structure optical fiber, the birefringence properties are simulated by the finite difference beam propagation method. After analyzing the influence of different cross-section structure parameters on birefringence, we obtain an appropriate set of structure parameters. With these parameters, the polarization beat length remains stable in a wide wavelength range near the 1310 nm communication window, and the working bandwidth can reach 200 nm, so it has a better achromatic characteristic. The fiber is suitable for making wideband achromatic plate.

Key words fiber optics; holey fiber; modal birefringence; polarization beat length; achromatic property

OCIS codes 060.2310; 060.2330; 060.2370

1 引言

消色差波片是光纤传感和通信系统中常用的光学器件,可以转换和调控光纤链路中的光学偏振态。采用云母、石英等各向异性材料制作的块状光学波片,不能与传输光纤直接相连,插入损耗较大。采用应力型保偏光纤制作的光纤波片温度稳定性较差^[1]。双折射多孔光纤具有较好的温度稳定性,也易于与光纤链路相连接,但其偏振拍长对波长较为敏感,若用其制作光纤波片,消色差特性有待于进一步优化^[2]。通过调节多孔光纤的横截面参数,如纤芯附近空气孔、本底空气孔及孔间距的大小,可以使偏振拍长随波长的变化曲线更为平坦,从而改善光纤波片的消色差特性,获得较大的波长带宽^[3]。董小鹏等^[4-5]采用增大纤芯附近一对气孔直径的方法设计了多孔光纤波片,工作带宽分别可达 40 nm 和 70 nm。文献^[6]采用横向伸缩的调节方式,对一种六边形晶格多孔光纤的非对称结构进行优化设计,得到了 310 nm 的工作带宽。上述文献所优化设计的多孔光纤结构,工艺制作难度较大,特别是要求气孔的形状和气孔的间距采用统一的压缩因子,

收稿日期: 2013-07-01; **收到修改稿日期**: 2013-07-16; **网络出版日期**: 2013-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(11074164, 61107075, 11274226)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)、上海市教委创新基金(11YZ17)

作者简介: 刘 珍(1988—),女,硕士研究生,主要从事微结构光纤设计仿真方面的研究。E-mail: txlz0420@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)

以目前的工艺水平还无法达到这样高的控制精度。文献[7]研究了圆形晶格多孔光纤,但其主要研究目的是提高双折射的大小。

本文提出了一种圆形晶格多孔光纤,对其横截面参数进行研究设计,通过调节纤芯附近一对特殊气孔直径 D 、本底气孔直径 d 及气孔间距 Λ ,来改善光纤波片的消色差特性,以优化偏振拍长的波长敏感性,获得了较好的结果。

2 研究方案及计算方法

光纤的模式双折射 B 和偏振拍长 L 定义为

$$B(\lambda) = \frac{\lambda}{2\pi} [\beta_y - \beta_x] = n_y - n_x, \quad (1)$$

$$L = \frac{2\pi}{|\beta_y - \beta_x|} = \frac{\lambda}{|B|}, \quad (2)$$

式中 β_x, β_y 和 n_x, n_y 分别为两个正交偏振模 HE_{11}^x 及 HE_{11}^y 的传播常数及其对应的有效折射率, λ 为传输光在自由空间中的波长。

图 1 中,圆形晶格双折射多孔光纤的包层有三层空气孔,纤芯附近两个对称的特殊空气孔直径为 D ,本底气孔直径为 d ,孔间距均为 Λ 。

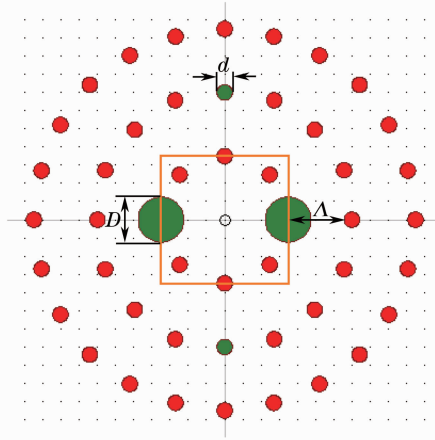


图 1 圆形晶格微结构光纤横截面示意图

Fig. 1 Cross section of the proposed round latticemicro-structure optical fiber

本文利用 Rsoft 光子学专业软件,采用有限差分波束传播法(FD-BPM)对多孔光纤中两个正交偏振模 HE_{11}^x 及 HE_{11}^y 的传输特性进行模拟仿真^[10],再用 Matlab 对其双折射率和偏振拍长进行数据分析。在 Rsoft 软件中调用 BeamPROP 模块,参数设置如下,计算窗口 x 方向为 $(-24 \mu\text{m}, 24 \mu\text{m})$, y 方向为 $(-24 \mu\text{m}, 24 \mu\text{m})$,横向网格间距 Δx 和 Δy 为 $0.02 \mu\text{m}$,纵向采用交替方向隐式(ADI)差分格式计算,空间步长 Δz 为 $0.2 \mu\text{m}$,传播 2048 步。入射到光纤端面的初始光场分布选为高斯型,边界条件采用透明边界条件(TBC)。在 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的波长范围内,每隔 $0.25 \mu\text{m}$ 分别计算出 x, y 方向的有效折射率 n_x, n_y 。再根据(1)式和(2)式分别计算其双折射 B 和偏振拍长 L ,从而得出其对应的波长敏感性曲线。

采用偏振拍长在给定波长范围内的相对变化率 R 来描述偏振拍长的消色差特性:

$$R = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_m} \times 100\%, \quad (3)$$

$$L_m = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}, \quad (4)$$

式中 L_{\max} 和 L_{\min} 分别为给定波长范围内偏振拍长的最大值和最小值, L_m 为拍长的中值。用于制作光纤波片的多孔光纤不宜太长也不宜太短,拍长太长则抗干扰能力较差,太短将不利于器件的加工制作,综合考虑器件性能的稳定性和加工工艺的可行性,光纤的偏振拍长值最好设计在 $40 \sim 200 \text{ mm}$ 之间^[11-14]。根据目前典

型的块状光学消色差波片的性能指标,用于制作光纤波片的多孔光纤的 R 值最好控制在 $-4\% \sim 4\%$ 之间^[6]。

3 数值计算结果与分析

为了考察不同横截面结构所对应的消色差特性,分别取本底气孔直径 $d=1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 \mu\text{m}$, 纤芯附近特殊气孔直径 $D=4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 5.0 \mu\text{m}$, 微孔间距 $\Lambda=6.6, 6.8, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 \mu\text{m}$, 这三个变量分别独立地变化,利用 Rsoft 软件,在 $1200 \sim 1700 \text{ nm}$ 波长范围内,模拟得出 x, y 方向的有效折射率 (n_x, n_y),计算出在不同波长点的双折射 B 和偏振拍长 L 。再根据(3)和(4)式计算在此波长范围内的偏振拍长中值 L_m 和相对变化率 R 。

3.1 纤芯附近特殊气孔直径大小 D 的优化

当本底空气孔的直径 $d=1.8 \mu\text{m}$, 孔间距均为 $\Lambda=7.2 \mu\text{m}$ 时,分别计算 $D=4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 5.0 \mu\text{m}$ 时的双折射和偏振拍长,如图 2 所示。

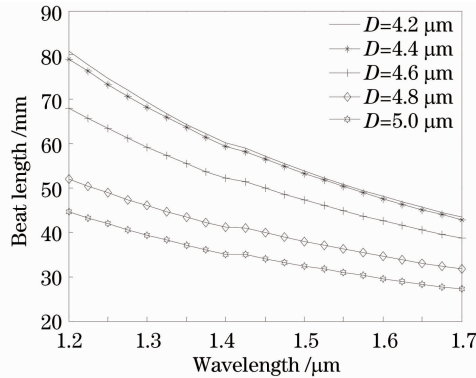


图 2 纤芯附近空气孔大小 D 变化时的偏振拍长(波长范围 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Beat lengths with different D (wavelength $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$)

计算结果表明,5 种纤芯附近大孔尺寸对应的偏振拍长的相对变化率分别为 $60.3\%, 59.4\%, 54.9\%, 48.4\%, 48.9\%$, 其对应的拍长中值 L_m 分别为 $62.1, 61.0, 53.4, 41.9, 36.0 \text{ mm}$ 。纤芯附近大孔为 $4.8 \mu\text{m}$ 和 $5.0 \mu\text{m}$ 时,偏振拍长的相对变化率较小。显然这样相对变化率还很大,还需要进一步优化。

3.2 本底空气孔大小 d 的优化

取纤芯附近特殊空气孔的直径 $D=4.8 \mu\text{m}$ 和 $D=5.0 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda=7.2 \mu\text{m}$, 分别计算本底空气孔大小 $d=1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 \mu\text{m}$ 时的双折射和偏振拍长,结果如图 3(a)、(b)所示。

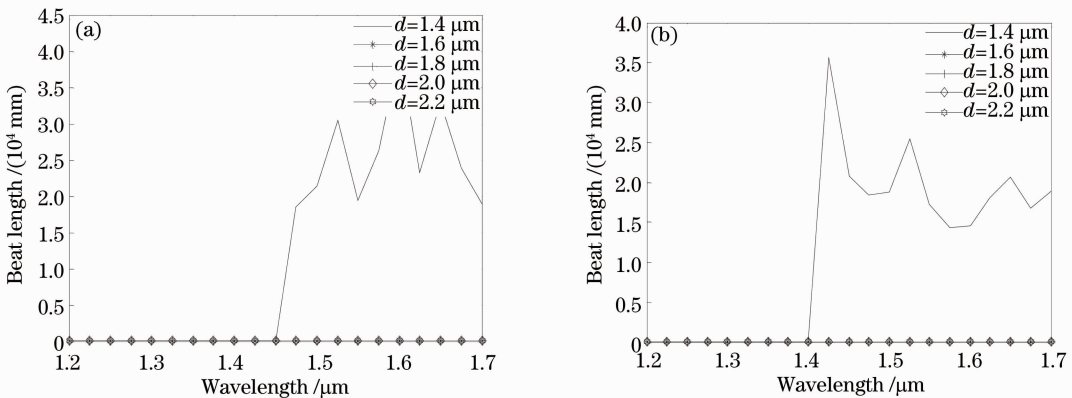


图 3 不同本底空气孔 d 的偏振拍长(波长范围 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$)。 (a) $D=4.8 \mu\text{m}, \Lambda=7.2 \mu\text{m}$; (b) $D=5.0 \mu\text{m}, \Lambda=7.2 \mu\text{m}$

Fig. 3 Beat lengths with different d (wavelength $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$). (a) $D=4.8 \mu\text{m}, \Lambda=7.2 \mu\text{m}$;

(b) $D=5.0 \mu\text{m}, \Lambda=7.2 \mu\text{m}$

图 3(a)中 5 种本底空气孔尺寸对应的偏振拍长的相对变化率分别为 200%, 30.9%, 48.4%, 52.6%, 55.5%, 本底空气孔 d 为 $1.6 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小; 本底空气孔 d 为 $1.4 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最大。图 3(b)中 5 种本底空气孔尺寸对应的偏振拍长的相对变化率分别为 199.5%, 194.1%, 48.9%, 53.7%, 56.6%, 本底空气孔 d 为 $1.8 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小; 本底空气孔 d 为 $1.4 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最大。从图 3(a)和(b)中偏振拍长变化趋势来看, 当 $d=1.4 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的变化率之所以很大, 主要是在波长 $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$ 内变化很大。当 $d\geq 1.8 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长在 $1.2\sim 1.7 \mu\text{m}$ 内变化相对较小; 当 $d\leq 1.6 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长随波长在 $1.2\sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内变化很大, 且主要在 $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内变化较剧烈。为了看清楚偏振拍长在波长 $1.2\sim 1.4 \mu\text{m}$ 内的变化趋势, 对该波段内的偏振拍长进行分析, 结果如图 4 所示。

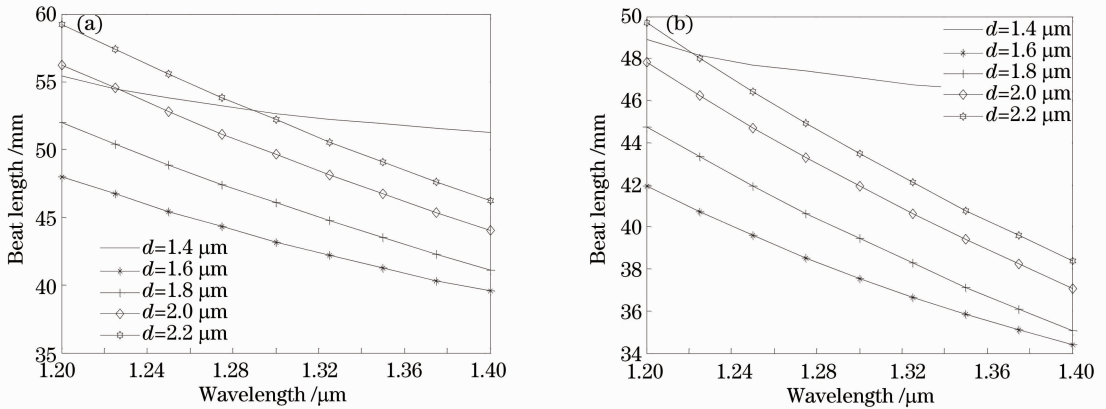


图 4 不同本底空气孔 d 的偏振拍长(波长范围 $1.2\sim 1.4 \mu\text{m}$)。 (a) $D=4.8 \mu\text{m}$, $\Lambda=7.2 \mu\text{m}$;
(b) $D=5.0 \mu\text{m}$, $\Lambda=7.2 \mu\text{m}$

Fig. 4 Beat length with different d (wavelength $1.2\sim 1.4 \mu\text{m}$). (a) $D=4.8 \mu\text{m}$, $\Lambda=7.2 \mu\text{m}$;
(b) $D=5.0 \mu\text{m}$, $\Lambda=7.2 \mu\text{m}$

图 4(a)中 5 种本底空气孔尺寸对应的偏振拍长的相对变化率分别为 7.76%, 19.3%, 23.4%, 24.2%, 24.7%, 其对应的拍长中值 L_m 分别为 53.3, 43.7, 46.6, 50.1, 52.7 mm。本底空气孔 $d=1.4 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小。图 4(b)中 5 种本底空气孔尺寸对应的偏振拍长的相对变化率分别为 5.2%, 19.7%, 24.3%, 25.3%, 25.7%, 其对应的拍长中值 L_m 分别为 47.6, 38.2, 39.9, 42.5, 44.0 mm。本底空气孔 $d=1.4 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小。从图 4 中还可以看出, 随着 d 的减小, 偏振拍长的相对变化率也在减小。对于 $d<1.4 \mu\text{m}$ 的情形, 偏振拍长的相对变化率有可能会更小, 但是考虑到随着气孔直径变小, 工艺难度会增加, 因此在这里没有就 $d<1.4 \mu\text{m}$ 的情形再做计算分析。

3.3 孔间距大小 Λ 的优化

取纤芯附近的空气孔的直径 $D=5.0 \mu\text{m}$, 本底空气孔大小 $d=1.4 \mu\text{m}$, 分别计算孔间距 $\Lambda=6.6, 6.8, 7.0, 7.2, 7.4, 7.6, 7.8 \mu\text{m}$ 时的双折射和偏振拍长, 结果如图 5 所示。

计算结果表明, 7 种孔间距对应的偏振拍长相对变化率分别为 199.3%, 199.4%, 199.2%, 199.5%, 199.3%, 200%, 200%, 偏振拍长的相对变化率都很大, 其主要是在波长 $1.4\sim 1.7 \mu\text{m}$ 内变化很大。下面对波长 $1.2\sim 1.4 \mu\text{m}$ 内的偏振拍长进行详细分析, 结果如图 6 所示。

图 6 中 7 种本底空气孔尺寸对应的偏振拍长的相对变化率分别为 3.4%, 5.5%, 6.2%, 5.2%, 4.9%, 7.2%, 11.1%, 相对应的偏振拍长中值 L_m 分别为 39.1, 46.9, 51.2, 47.6, 55.8, 69.0, 85.6 mm。孔间距 $\Lambda=6.6 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小。从图 6 还可以看出, 当 $D=5.0 \mu\text{m}$, $d=1.4 \mu\text{m}$ 时, 只有 Λ 变化时, 偏振拍长在 $1.2\sim 1.4 \mu\text{m}$ 范围内随波长变化都很稳定, 消色差特性都较好。

这样, 原型多孔光纤经过优化以后, 包层结构的最佳参数为: $D=5.0 \mu\text{m}$, $d=1.4 \mu\text{m}$, $\Lambda=6.6 \mu\text{m}$ 。这种优化过的圆形晶格多孔光纤在 $1.2\sim 1.4 \mu\text{m}$ 波长范围内有较好的偏振拍长稳定性, 相对变化率仅为 3.4%, 消色差波片对于延迟精度的要求是在工作波段内偏振拍长相对变化率小于 4%, 所以这种优化过的圆形晶格多孔光纤已经达到消色差波片对于相位延迟精度的要求, 拍长的大小为 39.1 mm 也处于适合加工的范围。

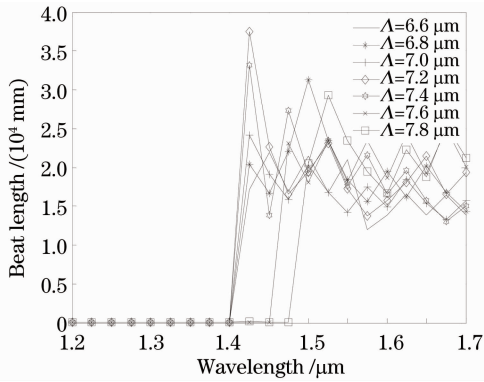


图5 不同孔间距 Λ 的偏振拍长(波长范围
1.2~1.7 μm)

Fig. 5 Beat length with different Λ (wavelength
1.2~1.7 μm)

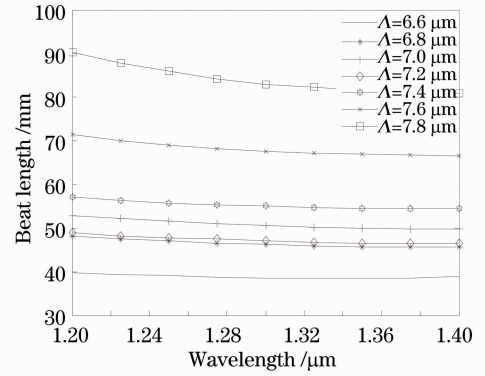


图6 不同孔间距 Λ 的偏振拍长(波长范围
1.2~1.4 μm)

Fig. 6 Beat length with different Λ (wavelength
1.2~1.4 μm)

考虑到光纤制作工艺过程中产生结构误差,表1列出了不同误差条件下的拍长值及对应光纤波片的工作带宽。

表1 横截面结构参数 D , d 及 Λ 存在不同误差时 1310 nm 处的拍长中值及对应的工作带宽

Table 1 Central beat length at 1310 nm and operation bandwidth with deviation of D , d and Λ

Deviation of D			Deviation of d			Deviation of Λ		
Error rate / %	L_m / mm	Bandwidth / nm	Error rate / %	L_m / mm	Bandwidth / nm	Error rate / %	L_m / mm	Bandwidth / nm
0	39.1	200	0	39.1	200	0	39.1	200
+1	38.0	200	+1	37.8	150	+1	42.1	175
+2	37.2	150	+2	36.7	125	+17	77.2	100
+3	37.3	75	+4	34.3	75	+18	85.6	50
-1	40.2	175	-1	41.0	200	-2	31.6	200
-2	40.8	150	-2	44.3	125	-6	26.6	125
-3	41.3	50	-3	50.1	50	-7	12.5	50

由表1可以看出,只要 D 误差控制在 $-2\% \sim 2\%$ 的范围内, d 误差控制在 $-2\% \sim 3\%$ 的范围内, Λ 误差控制在 $-6\% \sim 17\%$ 的范围内就能够满足偏振拍长要求,且具有较宽的工作带宽,这样以现有的加工工艺,具有一定的可行性。

4 结 论

本文所设计的圆形晶格的多孔光纤不是严格的晶体结构,结构上可以认为是一种准光子晶体光纤,纤芯的有效折射率大于包层的有效折射率,利用的是全内反射的导光机制。纤芯附近一对大的特殊气孔,认为也是一种缺陷,影响双折射的大小,合理地设计光纤的横截面参数,便可以得到满足要求的多孔光纤。通过对纤芯附近一对特殊气孔直径 D 、本底气孔直径 d 及气孔间距 Λ 三维参数空间仿真并计算分析发现:偏振拍长随波长在 1.2~1.7 μm 范围内变化很大,且主要在 1.4~1.7 μm 范围内变化较剧烈,只要合理地设计纤芯附近特殊气孔的大小和孔间距的大小,就能够有效降低偏振拍长的波长敏感性,偏振拍长可以在 1310 nm 附近较宽的波长范围内基本保持稳定,从而得到较好的消色差性能。所优化设计的微孔光纤,结构参数简单,易于制棒拉丝,具有一定的工艺可行性。其结构在 1310 nm 波长窗口附近使偏振拍长的工作带宽能达到 200 nm,相对变化率仅为 3.4%,相应的拍长为 39.1 mm。这种结构的光纤研制成功后,将适合于制作 1310 nm 波长通信窗口的消色差光纤波片。

参 考 文 献

- 1 M Wegmuller, M Legri, N Gisin, *et al.*. Experimental investigation of wavelength and temperature dependence of phase and group birefringence in photonic crystal fibers [C]. Proc Int Conf on Transparent Optical Networks, 2004. 111-114.

- 2 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(13): 961—963.
- 3 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(19): 1547—1549.
- 4 Dong Xiaopeng, Xie Zuosheng, Wang Xiaozhen, *et al.*. Design and analysis of novel wave plate made by the photonic crystal fibers [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2006, 17(suppl): 125—127.
董小鹏, 谢作生, 王小真, 等. 光子晶体光纤波片的设计与分析[J]. *光电子•激光*, 2006, 17(suppl): 125—127.
- 5 Xiaopeng Dong, Jiajian Hao, Juan Su, *et al.*. Temperature stabilized and broadband fiber waveplate fabricated with a birefringent photonic crystal fiber [J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2010, 3(1): 9—12.
- 6 Shi Zhidong, He Wei, Lin Jianqiang, *et al.*. Influence of lateral deformation on polarization beat-length dispersion of holey birefringence fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 120601.
石志东, 何伟, 林建强, 等. 横向形变对双折射多孔光纤偏振拍长色散特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(12): 120601.
- 7 Lin Jianqiang, Shi Zhidong, He Wei, *et al.*. A highly birefringent holey fiber with round lattice [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(12): 120601.
林建强, 石志东, 何伟, 等. 圆形晶格高双折射多孔光纤[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(12): 120601.
- 8 Jian-Qiang Lin, Zhi-Dong Shi, Ming-Jia Li, *et al.*. Structural design for birefringent holey fiber with a beat length insensitive to wavelength [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(25): F55—F60.
- 9 Li Mingjia, Shi Zhidong, Yin Jun, *et al.*. Design for holey fiber with birefringent beat length independent of wavelength [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 665—670.
李铭佳, 石志东, 殷俊, 等. 双折射拍长对波长不敏感的多孔光纤结构设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 665—670.
- 10 Xiaozhen Wang, Xiaopeng Dong, Zuosheng Xie. Measurement and analysis of the birefringence of photonic crystal fiber with wavelength scanning method [J]. *Opt Quant Electron*, 2007, 39(12-13): 1081—1090.
- 11 Andon A Rangelov. Achromatic polarization retarder realized with slowly varying linear and circular birefringence [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2716—2718.
- 12 H-C Huang. Fiber-optic analogs of bulk-optic wave plates [J]. *Appl Opt*, 1997, 36(18): 4241—4258.
- 13 You Baiqiang, Wang Chao, Zhou Jianhua. Design of the ultra-wideband quarter-wave plate with photonic crystal fibers [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2006, 17(suppl): 160—162.
游佰强, 王超, 周建华. 光子晶体光纤宽带四分之一波片的设计[J]. *光电子•激光*, 2006, 17(suppl): 160—162.
- 14 Guoguo Kang, Qiaofeng Tan, Xiaoling Wang, *et al.*. Achromatic phase retarder applied to MWIR & LWIR dual-band [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1695—1703.