

六边形晶格多孔光纤偏振拍长的消色差特性研究

刘珍 石志东 杨少林 张海燕 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 针对六边形晶格微结构光纤,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,分析了横截面结构参数的变化对模式双折射的影响。得到了两组合适的光纤结构参数,其偏振拍长可以在较宽的波长范围内基本保持稳定,具有较好的消色差特性:一种结构的偏振拍长在 1310 nm 波长附近的工作带宽可达 200 nm;另一种结构的偏振拍长在 1550 nm 波长附近的工作带宽可达 260 nm。这两种结构的光纤均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;波长敏感性

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.100603

Polarization-Beat-Length-Based Achromatic Characteristics of Holey Birefringence Fiber with Hexagonal Lattice

Liu Zhen Shi Zhidong Yang Shaolin Zhang Haiyan Mao Yanping Xie Qingming

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

Abstract In view of the hexagonal lattice micro-structure optical fiber, the modal birefringence characteristics of holey fiber are simulated by the finite difference beam propagation method. The influence of the different cross-section structural parameters on modal birefringence is analyzed. Two groups of appropriate structural parameters are obtained. The polarization beat lengths of these structures remain stable in a wide wavelength range, and thus better achromatic characteristics can be got. The working bandwidths of these structures reach 200 nm near the 1310 nm communication window and 260 nm near the 1550 nm communication window, respectively. The fibers are suitable for making wideband achromatic wave plates.

Key words fiber optics; holey fiber; modal birefringence; polarization beat length; wavelength sensitivity

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。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^[1]。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^[2]。文献[3-4]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[5]采用横向伸缩的调节方

收稿日期: 2013-04-22; **收到修改稿日期**: 2013-06-06; **网络出版日期**: 2013-09-02

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)

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,以目前的工艺水平还无法达到这样高的控制精度。

本文首先对六边形均匀气孔微结构光纤的横截面参数进行设计,仅利用正六边形分布空气孔点阵不满足 90° 旋转对称性所形成的本底双折射,通过调节气孔孔径和孔间距来改善光纤波片的消色差特性。再尝试利用纤芯附近两对大边孔所形成的附加双折射,与本底双折射进行相互平衡和补偿,以优化偏振拍长的波长敏感性。

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 所示为一种常见的六边形晶格多孔光纤的包层横截面,采用相同孔径的微孔均匀排布。优化前的初始几何参数为:空气孔之间的距离 $\Delta = 8.0 \mu\text{m}$,均匀空气孔直径 $d = 4.4 \mu\text{m}$ 。包层横截面中正六边形分布的全同微孔点阵并不满足 90° 旋转对称性,这种本底非对称性使得该结构的多孔光纤具有一定大小的本底双折射。

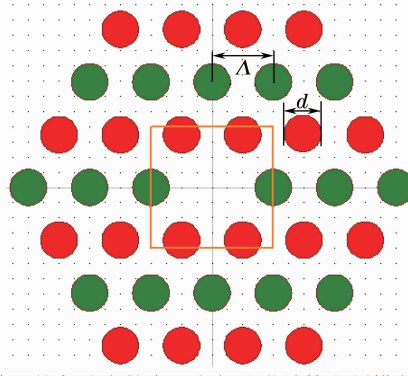


图 1 六边形晶格均匀分布的全同空气孔微结构光纤横截面示意图

Fig. 1 Cross-section of proposed hexagon lattice holey micro-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^[6],再用 Matlab 对其双折射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:计算窗口在 X 方向为 $(-32 \mu\text{m}, 32 \mu\text{m})$,在 Y 方向为 $(-28 \mu\text{m}, 28 \mu\text{m})$,横向网格间距 Δx 和 Δy 均为 $0.02 \mu\text{m}$,采用透明边界条件(TBC);光纤端面的入射光场选为二维高斯型强度分布。空间步长 Δz 为 $0.2 \mu\text{m}$ 。在 $1200 \sim 1700 \text{ nm}$ 的波长范围内,每隔 $0.1 \mu\text{m}$ 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}, 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

孔光纤偏振拍长不宜太长也不宜太短,拍长太长则抗干扰能力较差,太短将不易于器件的加工制作。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 40~200 mm 之间^[7-10]。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%~4% 之间^[5]。

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,分别取微孔直径 $d=2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6.0 \mu\text{m}$, 微孔间距 $\Lambda=7.7, 7.8, 7.9, 8.0, 8.1, 8.2 \mu\text{m}$, 这两个变量分别独立地变化,可以得到 60 组不同的结构参数,利用 Rsoft 软件,根据这 60 组结构参数进行仿真计算,在 1200~1700 nm 波长范围内,模拟得出 X, Y 方向的有效折射率(n_x, n_y),根据(1)式和(2)式分别计算出它们在不同波长点的双折射 B 和偏振拍长 L 。再根据(3)式和(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 ,结果如表 1 所示。

表 1 d 和 Λ 变化时偏振拍长的中值及相对变化率(波长范围为 1200~1700 nm)

Table 1 Central beat length and relative change rate with different d and Λ (wavelength range is 1200~1700 nm)

$d / \mu\text{m}$	$\Lambda=7.7 \mu\text{m}$		$\Lambda=7.8 \mu\text{m}$		$\Lambda=7.9 \mu\text{m}$		$\Lambda=8.0 \mu\text{m}$		$\Lambda=8.1 \mu\text{m}$		$\Lambda=8.2 \mu\text{m}$	
	L_m/mm	$R/\%$	L_m/mm	$R/\%$	L_m/mm	$R/\%$	L_m/mm	$R/\%$	L_m/mm	$R/\%$	L_m/mm	$R/\%$
2.4	4418	154	484	25	128	63	406	6.9	435	11	1108	51
2.8	363	65	274	6	686	98	2098	34	603	29	735	13
3.2	4670	83	1907	74	1022	14	3578	107	2899	191	565	33
3.6	∞		992	70	473	13	330	39	669	43	4218	86
4.0	298	38	490	42	9389	101	1792	85	1158	59	456	14
4.4	557	52	1850	119	534	20	283	6.2	257	17	894	63
4.8	144	8.7	213	16	478	42	∞		805	26	1037	84
5.2	401	19	1746	20	1835	131	4178	195	420	6.8	156	23
5.6	252.4	15.2	295.2	6.42	207	20.7	154.9	34.1	5988	88.7	454	34.9
6.0	∞		274	16	612	75	480	67	467	12.2	180.2	6.38

从表中结果看, L_m 出现 ∞ , 是因为其横截面结构参数所对应的双折射 B 为 0, 计算出来的拍长就为无穷大。

由表 1 数据可见: 当 $\Lambda=7.7 \mu\text{m}, d=4.8 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长为 144 mm; 当 $\Lambda=8.2 \mu\text{m}, d=6.0 \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长为 180.2 mm。这两组结构参数所对应的拍长值不仅能满足制作波片对拍长中值大小的要求, 又具有较小的相对变化率(图 2), 接近消色差波片的带宽要求。

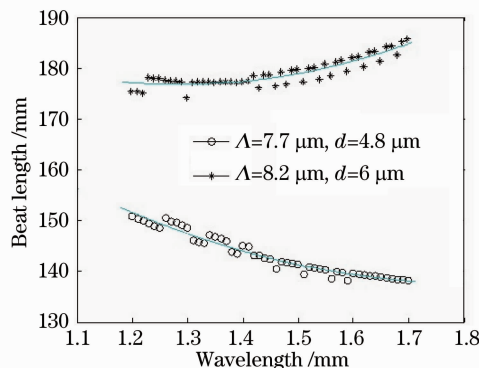


图 2 优化设计的多孔光纤偏振拍长随波长变化曲线图

Fig. 2 Polarization beat length varies with wavelength for optimized holey fiber

针对光通信常用的 1310 nm 和 1550 nm 波长窗口, 详细的数据分析结果如表 2 所示。

由表 2 看出, 当结构参数优化值 $\Lambda=8.2 \mu\text{m}, d=6.0 \mu\text{m}$ 时(方便起见, 下文统称为 A 组结构参数), 在 1310 nm 波长附近使偏振拍长的相对变化率仅为 2.3%, 工作带宽达到了 200 nm, 偏振拍长的大小约为 176.5 mm。当 $\Lambda=7.7 \mu\text{m}, d=4.8 \mu\text{m}$ 时(下文统称为 B 组结构参数), 在 1550 nm 波长附近工作带宽可以达到 260 nm, 拍长中值大小约为 141 mm, 变化率约为 3.6%。

表 2 优化得到的结构参数分析结果

Table 2 Analysis results of optimized structural parameters

	Wavelength near 1310 nm			Wavelength near 1550 nm		
	Wavelength range 1230~1380 nm			Wavelength range 1420~1680 nm		
$\Lambda=7.7 \mu\text{m}$ $d=4.8 \mu\text{m}$	L_m	$R / \%$	Bandwidth /mm	L_m	$R / \%$	Bandwidth /mm
	147.86	3.33	150	140.67	3.6	260
$\Lambda=8.2 \mu\text{m}$ $d=6.0 \mu\text{m}$	Wavelength range 1200~1400 nm			Wavelength range 1450~1650 nm		
	L_m	$R / \%$	Bandwidth /mm	L_m	$R / \%$	Bandwidth /mm
	176.51	2.28	200	181.16	2.81	200

考虑到光纤制作工艺过程中产生结构误差,表 3 和表 4 分别列出了 A、B 两组结构参数在不同误差条件下的拍长值及对应光纤波片的工作带宽。

由表 3 和表 4 可以看出,A、B 两组结构的偏振拍长对孔间距 Λ 的变化较为敏感,但只要 Λ 误差控制在 $+0.5\% \sim -0.5\%$ 的范围内就能够满足拍长要求。而气孔直径 d 可以有相对较大的误差容限,A 组结构参数的 d 的误差可以在 $+2\% \sim -1\%$ 的范围内;B 组结构参数 D 的误差可以在 $+2\% \sim -2\%$ 的范围内。以现有的加工工艺,具有一定的可行性。

表 3 A 组结构参数 d 及 Λ 存在不同误差时 1310 nm 处的中心拍长值及对应的工作带宽Table 3 Central beat length at 1310 nm and operation bandwidth with different errors of d and Λ for group A

Error rate /%	Deviation of d		Error rate /%	Deviation of Λ	
	L_m/mm	Bandwidth /nm		L_m/mm	Bandwidth /nm
0	176.51	200	0	176.51	200
+1	184.37	185	+0.5	182.23	180
+2	197.22	162	+1	202.47	53
+4	397.40	35	-0.5	163.44	154
-1	179.22	193	-1	87.43	73
-2	182.51	180			
-4	239.17	94			

表 4 B 组结构参数 d 及 Λ 存在不同误差时 1550 nm 处的中心拍长值及对应的工作带宽Table 4 Central beat length at 1550 nm and operation bandwidth with different errors of d and Λ for group B

Error rate /%	Deviation of d		Error rate /%	Deviation of Λ	
	L_m/mm	Bandwidth /nm		L_m/mm	Bandwidth /nm
0	140.67	260	0	140.67	260
+1	141.88	215	+0.5	147.53	218
+2	143.92	235	+1	208	93
+3	367.86	57	-0.5	145.84	242
-1	143.25	237	-1	191.15	73
-2	157.32	128			
-3	301.18	81			

为了得到更好的消色差性能,尝试在纤芯附近取四个特殊空气孔(其孔径为 D),横截面结构如图 3 所示,这种包层结构将在原有的本底双折射上引入一种附加双折射(纤芯附近两对大边孔与本底空气孔大小不相等而形成的非对称性所产生的双折射)。将这种附加双折射与本底双折射进行相互平衡和补偿,考察其是否能够降低偏振拍长的波长敏感性。

首先保持本底空气孔直径 $d=2.4 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda=8.0 \mu\text{m}$ 不变,单独考察纤芯附近四个特殊空气孔大小 D 的变化对偏振拍长的影响。 D 分别取 2.4、2.8、3.2、3.6、4.0、4.4、4.8、5.2、5.6、6.0 μm ,利用 Rsoft 软件,在 1200~1700 nm 波长范围内,模拟计算得出 X、Y 方向的有效折射率 n_x 、 n_y 。根据(1)式和(2)式分别计算它们在不同波长点上的双折射 B 和偏振拍长 L ,再根据(3)式和(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 ,结果如表 5 所示。

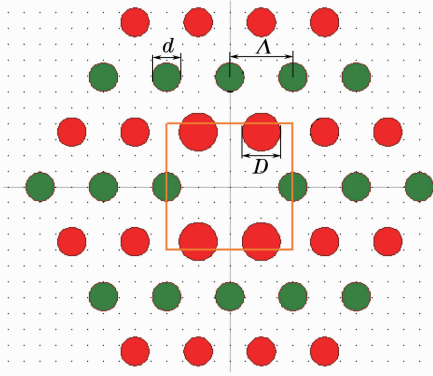


图3 两对大边孔六边形晶格多孔光纤横截面示意图

Fig. 3 Cross section of hexagon lattice holey micro-structure optical fiber with two pairs of special holes adjacent to the core

表5 不同 D 值时偏振拍长的中值和相对变化率(波长范围为 1200~1700 nm)Table 5 Central beat length and relative change rate while changing D (wavelength range is 1200~1700 nm)

$D / \mu\text{m}$	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0
L_m / mm	406	69202	656.5	327.5	157	107.6	82	55	49.3	33.5
$R / \%$	6.92	196	104.7	86.3	73.1	71.6	68.8	65.1	67.4	61.9

表5中, L_m 的变化趋势是先增加后减小,说明两种非对称性产生的双折射是先相互抵消到最小,再相互增强。当 $D=2.8 \mu\text{m}$ 时,双折射最小,拍长最长;当 $D=2.4 \mu\text{m}$ 时,也就是 $D=d$ 时,拍长的相对变化率只有 6.92%。

再来考察本底气孔的大小变化对偏振拍长消色差性能的影响。保持纤芯附近特殊空气孔直径 $D=4.4 \mu\text{m}$,孔间距 $\Lambda=8.0 \mu\text{m}$ 不变,在 1200~1700 nm 波长范围内,分别计算 $d=2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4.0, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6.0 \mu\text{m}$ 时偏振拍长随工作波长的变化曲线,如图4所示,偏振拍长的中值和相对变化率列于表6。

表6 本底气孔大小 d 变化时偏振拍长的中值和相对变化率(波长范围为 1200~1700 nm)Table 6 Central beat length and relative change rate while intrinsic holes diameter d changes (wavelength range is 1200~1700 nm)

$d / \mu\text{m}$	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0
L_m / mm	108	100.8	152.9	407.1	339.9	283.3	428.1	124.5	66.2	72
$R / \%$	71.6	57.7	72.9	90.4	72.8	6.21	78.9	41.5	50	56.3

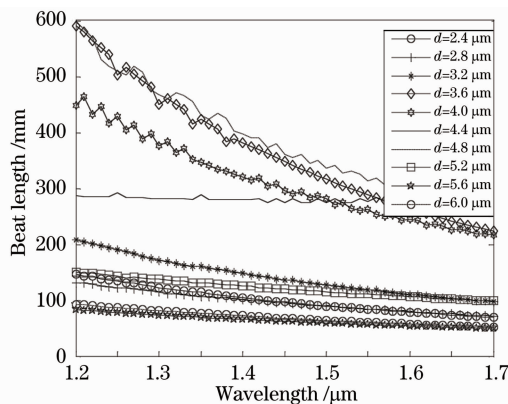
图4 本底气孔大小 d 变化时偏振拍长随工作波长的变化曲线Fig. 4 Polarization beat length varies with operation wavelength with different intrinsic holes diameters d

表6中, L_m 的变化趋势也是先增加后减小,同样,两种双折射也是先相互抵消到最小,再相互增强。当 $d=3.6 \mu\text{m}$ 时,双折射最小,拍长最长,对波长也较为敏感。当 $d=4.4 \mu\text{m}$ 时,也就是 $D=d$ 时,拍长相对变化率较小,只有 6.21%。

从表5和表6中可以看出,不管是改变纤芯附近特殊空气孔的大小,还是改变本底气孔的大小,都是在 $D=d$ 时,偏振拍长变化最小,但是此时的偏振拍长中值较大。另外,在二维参数空间取 D 和 d 分别独立

地在 $2.4\ \mu\text{m}$ 到 $6\ \mu\text{m}$ 之间变化时,仿真计算结果显示当 $D=d$ 时的 R 较小。文献[11]中B型结构的设计思路是采用附加双折射($d\neq D$)和六边形本底双折射相互平衡和补偿,而本文说明纤芯附近两对大边孔与本底空气孔大小不相等($d\neq D$)而引入的附加双折射并未能改善拍长的消色差特性,而采用全同微孔的正六边形均匀分布的包层结构,只要选择合适的结构参数,就可以优化得出消色差性能较好的光纤拍长。

4 结 论

对一种包层气孔分布呈六边形阵列的多孔光纤的结构进行了优化设计,经大量的数据仿真验证,当引入非对称结构($d\neq D$)时,虽然能够有效地调节双折射的大小,但同时也使得偏振拍长随波长变化较大,而当 $D=d$ 时,偏振拍长对波长敏感性较低,消色差特性较好。

通过对气孔间距 Λ 和气孔大小 d 二维参数空间仿真并计算分析发现:无需引入其他的非对称性^[5,12-13],仅利用六边形的 90° 旋转不对称性,合理地设计空气孔间距和空气孔的大小,就能够有效降低偏振拍长的波长敏感性,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。一种结构在 $1310\ \text{nm}$ 波长窗口附近能使偏振拍长的工作带宽达到 $200\ \text{nm}$,相对变化率仅为 2.3% ;另一种结构在 $1550\ \text{nm}$ 通信窗口附近工作带宽可以达到 $260\ \text{nm}$,变化率约为 3.6% 。这两种结构的光纤研制成功后,将分别适合于制作 $1310\ \text{nm}$ 和 $1550\ \text{nm}$ 波长通信窗口的消色差光纤波片。

参 考 文 献

- 1 T A Birks, J C Knight, P St J Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Opt Lett, 1997, 22(13): 961-963.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Andon A Rangelov. Achromatic polarization retarder realized with slowly varying linear and circular birefringence[J]. Opt Lett, 2011, 36(14): 2716-2718.
- 8 H-C Huang. Fiber-optic analogs of bulk-optic wave plates[J]. Appl Opt, 1997, 36(18):4241-4258.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 M J Steel, R M Osgood. Polarization and dispersive properties of elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. J Lighwave Technol, 2001, 19(4): 495-503.
- 13 Jianqiang Lin, Zhidong Shi, Mingjia Li, *et al.*. Structural design for birefringent holey fiber with a beat length insensitive to wavelength[J]. Appl Opt, 2009, 48(25): F55-F60.