

文章编号: 0253-2239(2010)03-0665-06

双折射拍长对波长不敏感的多孔光纤结构设计

李铭佳 石志东 殷俊 林建强 陈华

(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 将两种分别具有正负双折射特性的缺陷结构相结合,在一定波长范围内,设计了一种拍长对波长变化不敏感的多孔双折射光纤。设计方案从均匀分布圆形微孔的光纤端面出发,将靠近中心的一对微孔的半径增大,同时将分布于包层中的其余微孔变为椭圆形状,在不同的波长上分别产生符号相反的模式双折射进行调节补偿。采用有限差分波束传播法计算分析了不同结构参数对多孔光纤双折射的影响,结果表明,调控这些结构参数能在特定的波长窗口获得稳定的拍长,且拍长值也可以根据实际需求设计调整。通过优化结构参数,在1310 nm波长窗口得到了带宽大于180 nm的平坦拍长曲线。

关键词 光纤光学;多孔光纤;波束传播法;双折射;波长敏感性

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0665

Design for Holey Fiber with Birefringent Beat Length Independent of Wavelength

Li Mingjia Shi Zhidong Yin Jun Lin Jianqiang Chen Hua

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

Abstract A holey fiber with beat length independent of wavelength is designed by combination of two defect structures respectively with positive and negative birefringence. The radius of a pair of air holes adjacent to the core is enlarged and the other circular air holes in the cladding are substituted with elliptical holes at the same time. Birefringence with different signs generated by these two changes may interact with each other so that the beat length is less sensitive with wavelength. Finite-difference beam propagation method (FD-BPM) is used to calculate and analyze the influence of different structural parameters on birefringence of holey fiber. Stable beat length can be achieved at some wavelength window by adjusting the structural parameters and the value of the beat length can also be tuned according to practical requirement. Uniform beat length with more than 180 nm bandwidth at 1310 nm wavelength window is obtained by optimizing structural parameters of holey fiber.

Key words fiber optics; holey fiber; beam propagation method; birefringence; wavelength sensitivity

1 引言

多孔光纤一般由纤芯和具有若干个微孔的包层组成,微孔使包层的有效折射率低于纤芯,将光信号束缚在纤芯中传输。不同截面结构的多孔光纤可以具有无截止单模传输、大模场面积、高非线性 and 可调

色散等常规光纤不具备的特性,在光纤传感、光纤激光器 and 色散补偿等方面有广泛的应用前景^[1~3]。多孔光纤包层截面中微孔的排列分布一般呈六边形对称结构,几乎不存在双折射现象。由于多孔光纤包层等效折射率和纤芯折射率的差值比常规单模光纤大

收稿日期: 2009-02-24; 收到修改稿日期: 2009-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(60777031)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108,08DZ2231100)和上海市教委创新基金(09YZ31)资助课题。

作者简介: 李铭佳(1985—),男,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: garfield_0610@shu.edu.cn

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)(中国光学学会会员号: S040111347S)

很多,因此可以方便地通过改变其包层截面结构的对称性来产生双折射。例如将气孔形状改为椭圆、增大纤芯附近两个气孔的直径或通过添加其他材料来破坏对称性结构等都能形成模式双折射^[4~6]。相比熊猫(Panda)和领结(Bow-tie)等内部应力型双折射光纤,环境温度和外部应力等因素对多孔光纤双折射的影响较小^[7,8]。由于截面结构中诸多的几何参数都与双折射直接相关,因此多孔光纤的双折射特性具有很高的设计自由度^[9],可以根据器件或系统的具体需要,设计其双折射的波谱特性。

$\lambda/4$ 波片是光纤通信和传感系统中的常用器件,其正交偏振相位差为 $\pi/2$,它能起到线/圆偏振态变换的作用。传统的波片采用云母、铁电晶体等各向异性材料制作,不仅加工难度高,而且存在无法与传输光纤直接相接、温度稳定性差和波长带宽小等缺点。拍长是反映光纤双折射大小的参量,经过一个拍长的光纤长度,正交偏振相位差为 2π 。若将光纤的长度切割为 $1/4$ 拍长,则可制作出光纤波片。鉴于双折射多孔光纤的诸多优点,如果将其用于制作光纤波片,就能很好地克服块状光学波片不能直接连接光纤以及温度稳定性差的不足。

本文利用有限差分波束传播法(FD-BPM)对多孔光纤进行数值分析,设计了一种多孔光纤截面结构,在一定的波长范围内,使其拍长几乎不随波长变化。若截取一段制成光纤波片,则能使处于该波长范围内的光产生几乎相同的相位延迟量($\pi/2 \pm \pi/150$),扩大了光纤波片的工作带宽。

2 数值方法与设计思路

多孔光纤的截面结构比较复杂,很难用解析方法进行严格计算,采用 Optiwave 仿真软件,通过有限差分波束传播法对多孔光纤进行数值分析^[10]。根据横向电场和磁场分量的耦合方程:

$$\nabla^2 E_x + n^2 k^2 E_x = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \ln n^2}{\partial x} E_x \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \ln n^2}{\partial y} E_y \right), \quad (1a)$$

$$\nabla^2 E_y + n^2 k^2 E_y = -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \ln n^2}{\partial x} E_x \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \ln n^2}{\partial y} E_y \right), \quad (1b)$$

$$\nabla^2 H_x + n^2 k^2 H_x = \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial y} \left(\frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial x} \right), \quad (2a)$$

$$\nabla^2 H_y + n^2 k^2 H_y = \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial x} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right), \quad (2b)$$

采用近轴近似,将场量写成沿传播方向慢变的量与

快变的相位项的乘积:

$$E_i = \hat{E}_i \exp(-jn_0 kz), \quad (3)$$

$$H_i = \hat{H}_i \exp(-jn_0 kz), \quad (4)$$

其中 n_0 是相对折射率, $k = 2\pi/\lambda$ 表示波数, λ 为波长。将(3),(4)式代入(1),(2)式得到近轴矢量波方程如下:

$$j \frac{\partial \hat{E}_x}{\partial z} = A_{xx} \hat{E}_x + A_{xy} \hat{E}_y, \quad (5a)$$

$$j \frac{\partial \hat{E}_y}{\partial z} = A_{yy} \hat{E}_y + A_{yx} \hat{E}_x, \quad (5b)$$

$$j \frac{\partial \hat{H}_x}{\partial z} = B_{xx} \hat{H}_x + B_{xy} \hat{H}_y, \quad (6a)$$

$$j \frac{\partial \hat{H}_y}{\partial z} = B_{yy} \hat{H}_y + B_{yx} \hat{H}_x, \quad (6b)$$

其中 $A_{xx}, A_{xy}, A_{yx}, A_{yy}, B_{xx}, B_{xy}, B_{yx}, B_{yy}$ 为差分算子。采用完全透明边界条件(TBC)来求解边界处的场量,将邻近边界的场看成将要出射平面的波,边界上的场量通过邻近计算区域内部的场量得到^[11]。配合边界条件求解(5)式和(6)式两组耦合方程,模拟得出光束在多孔光纤中的传播特性。

光纤的模式双折射 B 和拍长 L_B 定义为

$$B = n_y - n_x = \frac{\beta_y - \beta_x}{2\pi/\lambda}, \quad (7)$$

$$L_B = \frac{\lambda}{|B|} = \frac{2\pi}{|\beta_y - \beta_x|}, \quad (8)$$

其中 n_x, n_y 以及 β_x, β_y 分别为两个正交偏振模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 的有效折射率和传播常数。从(8)式可以看出,如果要在某一段波长范围内使拍长的值保持不变,必须控制模式双折射 B 的变化,使其与波长保持同步变化。

对图 1 所示(a)包层椭孔和(b)纤芯附近一对大直径圆孔两种多孔光纤的双折射 B 随波长 λ 的变化情况进行了计算, A 型结构的基本参数为气孔间距 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$, 椭孔长轴 $d_x = 2.2 \mu\text{m}$, 分别计算了短轴 $d_y = 1.1, 1.0$ 和 $0.9 \mu\text{m}$ 时的双折射曲线,如图 2 所示。B 型结构的基本参数为气孔间距 $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$, 小孔直径 $d_1 = 2.2 \mu\text{m}$, 图 3 为大孔直径 $d_2 = 3.0, 3.5$ 和 $4.0 \mu\text{m}$ 时的双折射曲线。计算过程中,气孔的折射率设定为 1.0,石英材料的折射率由 Sellmeier 方程给出^[12]。

从图 2 可以看出, A 型结构中椭圆孔产生的双折射在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 波长范围内都是负的,随着波长的增长,其绝对值越来越大。比较 3 条曲线可以发现,椭率越大,双折射的负值就越大,且负值的增长斜率也更大。从图 3 的 3 条曲线可以看出, B 型结构中

大孔造成的双折射在整个波长范围内始终是正值，且随波长增长而增大。大孔的直径越大，双折射的

值和增长率也越高。

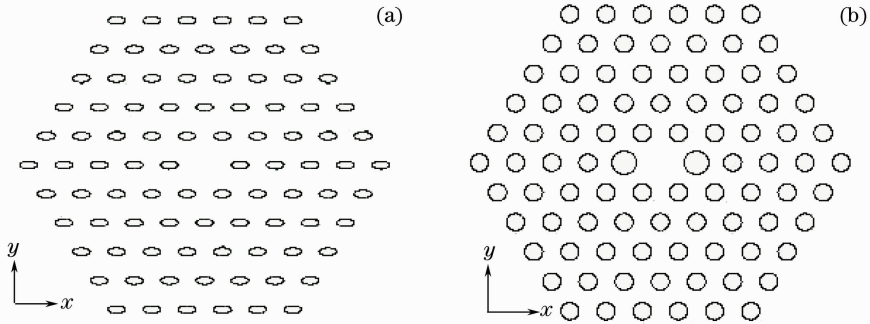


图 1 双折射多孔光纤截面结构。(a) A 型包层椭孔;(b) B 型纤芯附近一对大直径圆孔

Fig. 1 Cross section of birefringent holey fiber. (a) type A elliptic air holes; (b) type B large air holes adjacent to the core

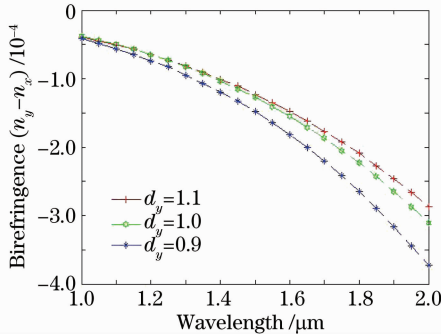


图 2 A 型多孔光纤的模式双折射

Fig. 2 Modal birefringence for holey fiber type A

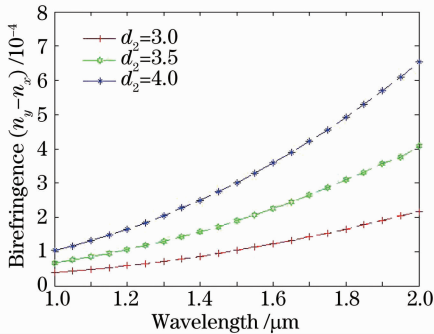


图 3 B 型多孔光纤的模式双折射

Fig. 3 Modal birefringence for holey fiber type B

分析比较这两种多孔光纤的双折射随波长的变化情况,可以发现,两种双折射的绝对值在 1~2 μm 的波长范围内都至少增长了 5 倍以上,而波长本身仅仅增加了 1 倍。由此可见,单一缺陷结构产生的双折射随波长的增长斜率往往比波长本身的斜率大得多。为了实现拍长随波长变化的不敏感性,考虑将上述两种缺陷结构结合在一起,通过正负双折射相互补偿,从而在特定的波长范围内使双折射值的

3 计算结果与分析

将以上两种分别具有正负双折射特性的缺陷结构相结合,设计的多孔双折射光纤截面结构(C 型)如图 4 所示,其基本参数为气孔间距 $\Lambda=4.4 \mu\text{m}$,椭孔长轴 $d_x=2.2 \mu\text{m}$,短轴 d_y 以及大孔直径 d_2 是可以优化调控的变量。计算了 $d_y=1.1 \mu\text{m}$, $d_2=3 \mu\text{m}$ 时双折射随波长的变化曲线,如图 5 所示。

比较图 2 和图 3 中 $d_y=1.1 \mu\text{m}$ 和 $d_2=3.0 \mu\text{m}$ 的两条曲线可以发现,A 型光纤中椭孔产生的负值

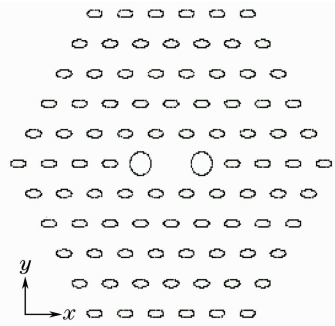


图 4 C 型多孔光纤的截面结构

Fig. 4 Cross section of type C holey fiber

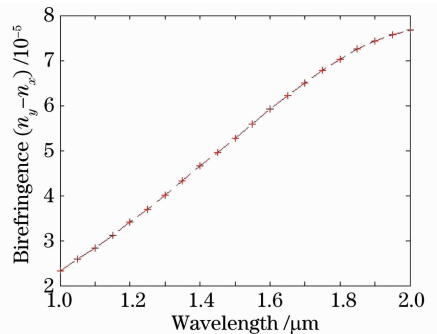


图 5 C 型多孔光纤的模式双折射

Fig. 5 Modal birefringence for type C holey fiber

双折射绝对值始终大于 B 型光纤中大孔产生的正值双折射,然而图 5 中双折射在波长 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 范围内都是正值,且随波长的增大而增大,但其斜率随波长增大逐渐减小,在 $2\ \mu\text{m}$ 波长处已经趋于平缓。这说明正负双折射之间不是简单的几何叠加,而是一个复杂的相互作用过程。在短波长区域,光束能很好地束缚在纤芯进行传输,此时更靠近纤芯的大孔双折射起到主要的作用,因此双折射为正值。随着波长的增大,纤芯的束缚能力下降,场量开始逐渐扩散到包层,于是由包层椭孔引起的负值双折射的作用逐渐显现出来,这就造成双折射的增长率随波长增大而不断减小。随着波长继续增大,双折射将到达顶点并开始减小。在双折射逐渐增长并到达顶点的过渡区,一定能找到一段斜率与波长本身的增长率相近的曲线,在相应的波长范围内,多孔光纤的拍长值就可以不随波长而变化。

为了考察 d_y 以及 d_2 的变化对 C 型多孔光纤双折射的影响,分别计算了 $d_2 = 3.0\ \mu\text{m}$ 不变情况下 $d_y = 1.1, 1.0$ 和 $0.9\ \mu\text{m}$ 时的双折射以及 $d_y = 0.9\ \mu\text{m}$ 不变情况下 $d_2 = 2.8, 3.0$ 和 $3.2\ \mu\text{m}$ 时的双折射,分别如图 6 和图 7 所示。从图 6 可以看出,在大孔直径不变的条件下,随着椭孔短轴 d_y 值的减小,在短波长区域双折射的值逐渐降低,其增长斜率也不断下降,双折射值到达顶点时所处的波长也逐渐减小。这些现象都表明 d_y 值的减小使椭孔负值双折射的作用加强。与之相反,图 7 中的 3 条曲线则说明大孔直径的增大能够使大孔正值双折射的作用加强。

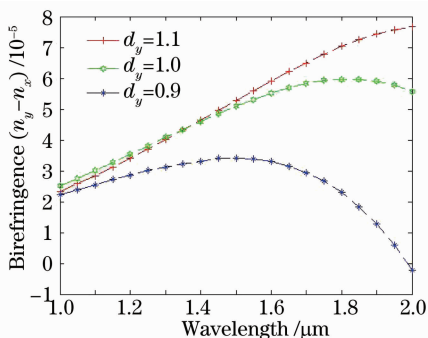


图 6 不同 d_y 情况下 C 型多孔光纤的模式双折射曲线

Fig. 6 Modal birefringence for type C holey fiber with different d_y

计算分析还发现,同时调节椭孔短轴 d_y 和大孔直径 d_2 的值不仅能够特定的波长窗口获得稳定的拍长,还可以根据实际需要设计此稳定拍长的大小。为了在指定波长处获得需要的拍长值,应当首先

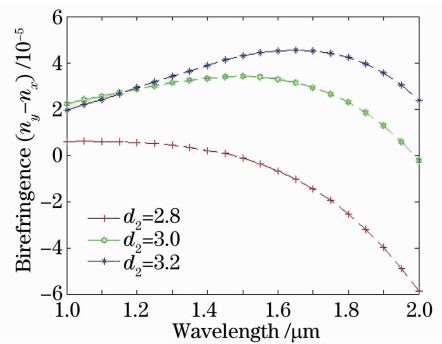


图 7 不同 d_2 情况下 C 型多孔光纤的模式双折射曲线

Fig. 7 Modal birefringence for type C holey fiber with different d_2

固定 d_y 和 d_2 中的一个,通过调节另一个参数使得拍长曲线在所需波长区域达到良好的平坦效果。在实现波长不敏感性的基础上,同时调整 d_y 和 d_2 两个参数就能使拍长值满足设计要求,若要减小拍长值,必须同时减小 d_y 并增大 d_2 ,若要增大拍长值,则应同时增大 d_y 并减小 d_2 。对这两个参数进行优化选择,在 $1310\ \text{nm}$ 波长窗口获得了 3 条拍长值各不相同的平坦拍长曲线,如图 8 所示。以相移误差 $\pi/150$ 为带宽容限,若截取 $1/4$ 拍长长度的多孔光纤制成光纤 $\lambda/4$,则优化后的波长带宽可达 $180\ \text{nm}$ 以上,相对带宽大于 12% ,是零级块状光学波片的 3 倍。即使截取 $3/4$ 或 $5/4$ 拍长长度,相应的波长带宽也分别可以达到 $60\ \text{nm}$ 和 $36\ \text{nm}$ 。可以看出,图 8 中 3 条曲线的拍长值都达到了厘米量级,因此截取 $1/4$ 拍长长度的多孔光纤制作光纤波片在工艺上还是可以操作实现的。

经过优化所得的 d_y 以及 d_2 的值都精确到纳米量级,现有的多孔光纤制作工艺很难满足要求,因此必须考虑制作过程中引入的误差对拍长值及其波长稳定性的影响。在图 8(a) 中曲线对应结构参数的基础上,分别计算了 d_y 误差为 $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ 以及 d_2 误差为 $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ 时拍长曲线的变化,如图 9 所示。表 1 列出了不同误差条件下 $1310\ \text{nm}$ 处的拍长值及对应的 $1/4$ 光纤波片工作带宽。

从表 1 可以看出, d_y 以及 d_2 的误差会使多孔光纤 $1310\ \text{nm}$ 处的拍长值产生一定幅度的偏差。在误差率相同的条件下, d_2 的误差对拍长值的影响更大。当误差率小于 2% 时,对应的 $1/4$ 光纤波片工作带宽比优化的结果更宽,即拍长仍然能保持良好的波长稳定性。在之前的优化过程中,将 $1310\ \text{nm}$ 处的拍长设定为整个波段内的最小值,这样就能通过牺牲一定的带宽来换取较大的误差容

限。当误差率大于 2% 时,拍长的波长稳定性将大幅下降。因此,在制作 C 型多孔光纤时必须将 d_y 以及 d_z 的误差率分别控制在 2% 和 1.5% 以下才能保证拍长在所要求的波长窗口内基本不变。考虑到

结构参数误差对拍长值的影响,必须精确测量实际多孔光纤在中心波长处的拍长值,并以此为基准截取 1/4 拍长长度用于制作光纤波片。

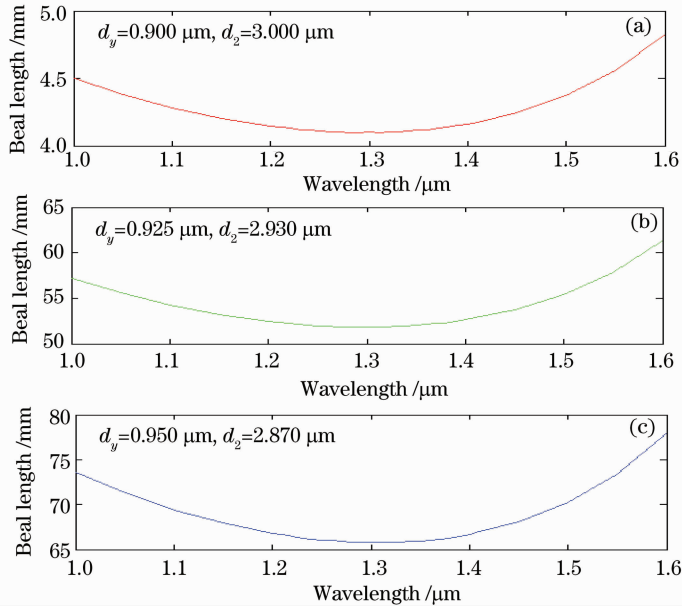


图 8 结构参数优化后 C 型多孔光纤在 1310 nm 波长窗口的拍长曲线

Fig. 8 Beat length for optimized type C holey fiber at 1310 nm wavelength window

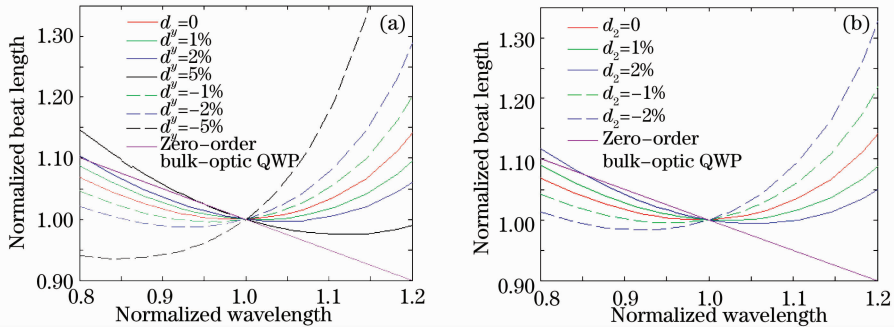


图 9 (a) d_y 及(b) d_z 存在不同误差时的归一化拍长曲线

Fig. 9 Normalized beat length with deviation of (a) d_y and (b) d_z

表 1 d_y 及 d_z 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 1 Central beat length at 1310 nm and operation bandwidth with deviation of d_y and d_z

Error rate /%	Deviation of d_y		Error rate /%	Deviation of d_z	
	L_B /mm	Bandwidth /nm		L_B /mm	Bandwidth /nm
±0	40.985	200	±0	40.985	200
+1	38.791	205	+1	35.409	215
+2	37.096	235	+2	32.721	250
+5	33.913	80	-1	48.761	235
-1	43.899	225	-2	58.414	95
-2	47.800	275			
-5	60.865	35			

4 结 论

将分别具有负双折射特性的椭孔包层缺陷结构与具有正双折射特性的大孔缺陷结构相结合,可以在一定的波长范围内使多孔光纤的拍长值对波长的敏感性降低。通过调节椭孔短轴或椭圆度以及大圆孔的直径可以同时调节稳定拍长所处的波长区域以及拍长的大小。通过优化参数,在 1310 nm 波段得到了比较平坦且具有较长拍长值(厘米量级)的拍长曲线。采用这种双重缺陷结构并优化其结构参数,能够制作在特定波长窗口同时具备波长稳定性和温度稳定性的光纤,这种拍长适中且对波长不敏感的双折射多孔光纤特别适于制作集成化、高性能的宽带光纤波片。

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, R. F. Cregan *et al.*. Large mode area photonic crystal fiber [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1347~1348
- 3 X. Z. Sang, L. Chup, X. Yuc. Application of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications[J]. *Opt. Quant. Electron.*, 2005, **37**(4): 965~994
- 4 Daru Chen, Linfang Shen. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fibers with double defect [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2700~2705
- 5 D. Chen, L. Shen. Ultrahigh birefringent photonic crystal fiber with ultralow confinement loss [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(4): 185~187
- 6 Fang Hong, Lou Shuqin, Guo Tiejing *et al.*. Novel-high birefringence photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 202~206
方 宏, 娄淑琴, 郭铁英. 一种新结构高双折射光子晶体光纤 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 202~206
- 7 Wei Yan, Chang Deyuan, Zheng Kai *et al.*. Numerical simulation of temperature properties of photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 945~951
卫 延, 常德远, 郑 凯. 光子晶体光纤的温度特性数值模拟 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 945~951
- 8 Andrew Michie, John Canning, Katja Lyytikainen *et al.*. Temperature independent highly birefringent photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5160~5165
- 9 Soan Kim, U. C. Paek, Kyunghwan Oh. New defect design in index guiding holey fiber for uniform birefringence and negative flat dispersion over a wide spectral range [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6039~6050
- 10 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~2649
- 11 G. R. Hardley. Transparent boundary condition for the beam propagation method [J]. *Quant. Electron.*, 1992, **28**: 363
- 12 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed. Academic, 2001