

# 横向形变对双折射多孔光纤偏振拍长色散特性的影响

石志东<sup>1</sup> 何伟<sup>1</sup> 林建强<sup>1,2</sup> 李铭佳<sup>1</sup> 季敏宁<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>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)  
<sup>2</sup>广西工学院信息与计算科学系, 广西 柳州 545006)

**摘要** 为了制作宽带稳定的光纤偏振器件,提出了一种改善双折射多孔光纤偏振拍长色散特性的方案。将具有圆孔包层阵列和芯边一对大圆孔的双折射多孔光纤,分别在两个正交方向上进行横向压缩或伸展,利用多种非对称结构产生的符号相反的双折射色散曲线进行平衡补偿,消除偏振拍长的波长敏感性。采用全矢量波束传播法计算分析了不同参数变化对模式双折射的影响,通过优化结构参数,在 1550 nm 波长窗口获得了中心拍长值约为 39.5 mm 的平坦拍长色散曲线,在 1380~1750 nm 波长范围内,拍长值相对变化率约为 1.27%。若用这种光纤制成 1550 nm 波长窗口的零级 1/4 波片,以  $2\pi/300$  作为带宽容限,则工作波段约为 1400~1710 nm 范围,相对带宽可达 20%。

**关键词** 光纤光学;多孔光纤;模式双折射;偏振拍长;横向形变;波长敏感性

中图分类号 TN253

OCIS 060.2310 060.2400

文献标识码 A

## Influence of Lateral Deformation on Polarization Beat-Length Dispersion of Holey Birefringence Fiber

Shi Zhidong<sup>1</sup> He Wei<sup>1</sup> Lin Jianqiang<sup>1,2</sup> Li Mingjia<sup>1</sup> Ji Minning<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)  
<sup>2</sup>Department of Information and Computation of Science, Guangxi University of Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

**Abstract** In order to produce fiber-optic polarization components and devices, a simple scheme is proposed for a birefringence holey fiber to improve dispersion characteristics of its polarization beat-length. The cross-section of the birefringence holey fiber with circular micro-holes cladding array and a pair of large holes near the cores is squeezed or expanded in orthogonal directions. To deduce the wavelength sensitivity of polarization beat-length, compensation and equilibrium are made among the birefringence dispersion curves with opposite signs induced by multiple asymmetric structures. The influence of different structural parameters on the modal birefringence is calculated and analyzed through full wave beam propagation method. By optimization to the structural parameters, a flatten dispersion curve of polarization beat length is obtained in 1550 nm wavelength windows with the central beat-length value around 39.5 mm. The relative variation of beat-length is 1.27% in wavelength range 1380~1750 nm. If this fiber is made into zero-order quarter wave plate in 1550 nm wavelength window, the operation wavelength band is about 1400~1710 nm under the retardation tolerance of  $2\pi/300$  and the relative bandwidth is up to 20%.

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

## 1 引言

多孔光纤的包层具有周期性分布的微孔阵列,纤芯由单点或多点缺陷形成。气孔的存在使得包层有效折射率低于纤芯,通过全内反射和光子带隙作用,光束可以束缚在纤芯中进行传播<sup>[1,2]</sup>。通常情况下,包层

收稿日期: 2010-06-11; 收到修改稿日期: 2010-07-16

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

作者简介: 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

中的微气孔呈正六边形对称排列,两个正交偏振模的传播常数相同;当多孔光纤横截面的对称性被打破时,这对简并模的传播常数不再相等,从而产生模式双折射。由于组成多孔光纤的石英与空气的折射率差很大,通过改变纤芯两侧气孔直径、将圆孔变为椭孔或晶格伸缩等方法均能获得较高的模式双折射<sup>[3~6]</sup>。这种双折射主要是由几何不对称性造成的,相比熊猫(Panda)光纤和领结(Bowtie)光纤等应力双折射光纤,多孔光纤的双折射具有良好的温度稳定性和抗扰动能力<sup>[7~9]</sup>。

双折射光纤可用于制作光纤偏振器件并集成于偏振干涉型光纤传感器中,拍长是衡量其双折射性质的重要参量,经过一个拍长的光纤长度后,两个正交线偏振光分量产生  $2\pi$  的偏振相位差,将多孔光纤切割为  $1/4$  拍长长度,便可得到光纤  $1/4$  波片<sup>[10]</sup>。采用双折射多孔光纤经精密切割制作的光纤波片比用应力型双折射光纤制作的光纤波片具有更好的温度稳定性,但其波长敏感性并无明显的改善<sup>[11]</sup>,这主要是由于偏振拍长的色散特性引起的,因此有必要优化设计多孔光纤的包层结构,使其偏振拍长具有平坦的色散曲线,在较宽的工作波长范围内尽可能降低其波长敏感性<sup>[12~14]</sup>。

借鉴于文献[6]的设计思路,为了制作宽带稳定的光纤偏振器件,我们提出一种改善双折射多孔光纤偏振拍长色散特性的简易方案:将具有圆孔包层阵列和芯边一对大圆孔的双折射多孔光纤,分别在两个正交方向上进行横向压缩或伸展,利用多种非对称结构产生的符号相反的双折射色散曲线进行平衡补偿,消除偏振拍长的波长敏感性。这种设计方案结构简洁,既能扩大工作带宽,又具有一定的工艺可行性。

## 2 基本概念与设计思路

光纤的模式双折射  $B$  和偏振拍长  $L_B$  定义为  $B = n_y - n_x = \frac{\beta_y - \beta_x}{2\pi/\lambda}$ ,  $L_B = \frac{\lambda}{|B|} = \frac{2\pi}{|\beta_y - \beta_x|}$ , 其中  $n_x$ ,  $n_y$  和  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  分别为两个正交偏振模的有效折射率和传播常数,  $\lambda$  为自由空间光波长。可以看出,偏振拍长是关于波长及双折射的函数,若要其在一定波长范围内基本不随波长变化,则必须模式双折射  $B$  在此波长范围内与波长同步线性变化。当多孔光纤的双折射仅由截面中的一种非对称结构产生时,双折射率  $B$  一般随波长  $\lambda$  呈现非线性的指数变化,远远高于波长本身的增长斜率,与波长同步线性变化的区间非常短。为了扩大模式双折射随波长线性变化的波长区间,降低偏振拍长的波长敏感性,我们考虑同时在多孔光纤截面中引入多种非对称结构进行平衡调节,根据不同波长偏振模场的空间分布优化其结构参数,利用正负双折射的相互补偿作用来抑制双折射随波长的非线性变化。

设计思路如图 1 所示,将图 1 左侧所示的双折射多孔光纤加热软化并进行侧向挤压,形成一种等比例横向伸缩的椭圆形光纤,其包层由纵向压缩而横向伸展的六边形椭孔晶格阵列组成(这些椭孔简称为本底椭孔),纤芯由单点缺陷形成,在  $X$  方向上纤芯两侧的大圆孔也等比例地变为一对大椭圆孔。

纤芯附近的微孔分布及尺寸如图 2 所示,  $L_x$  和  $L_y$  分别为  $X$  和  $Y$  方向上的晶格间距,  $D_x$  和  $D_y$  分别为大椭孔在  $X$  和  $Y$  方向上的轴长,  $d_x$  和  $d_y$  分别为本底椭孔在  $X$  和  $Y$  方向上的轴长。这种结构具有 3 种类型的非对称性:非圆微孔 ( $d_x \neq d_y, D_x \neq D_y$ ), 纤芯两侧一对大边孔 ( $d_x \neq D_x, d_y \neq D_y$ ), 晶格常数的纵横压缩 ( $L_y \neq \sin 60^\circ L_x$ )。

虽然可以互相独立地综合调节这 3 种非对称性的权重,达到所设计的预定目标,但是,考虑到工艺制作的可行性,尤其是多种不同椭率共存的工艺制作难度,这里将 3 种非对称性采用统一的伸缩因子  $k$  来加以约束限制,令  $k^2 = d_x/d_y = D_x/D_y = \sin 60^\circ L_x/L_y$ 。

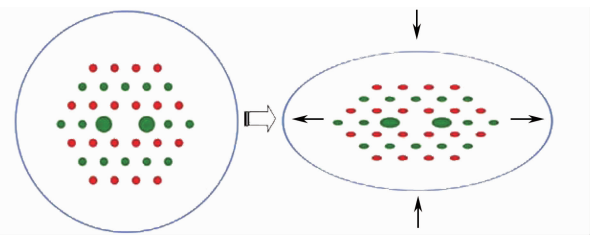


图 1 双折射多孔光纤横向形变示意图  
Fig. 1 Schematic lateral deformation of a holey birefringence fiber

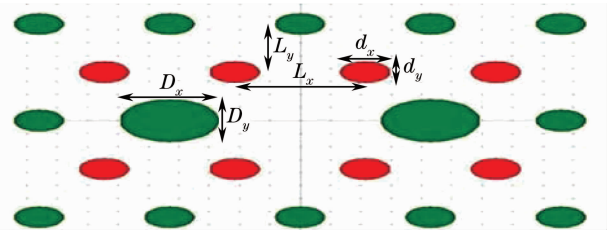


图 2 纤芯附近的微孔形状、尺寸及分布示意图  
Fig. 2 Shape, size and distribution of holes near fiber-core

针对图 1 左侧所示的原型光纤,它具有圆形微孔正六边形阵列和一对大圆边孔相结合的包层结构,设其正六边形晶格间距为  $\Lambda$ ,本底圆孔直径为  $d = k_1\Lambda$ ,芯边圆孔的直径为  $D = k_2d = k_1k_2\Lambda$ , $k_1$  表示包层本底圆孔直径与孔间距的比值, $k_2$  表示芯边圆孔与本底圆孔的孔径比。为简化计算,采用面积守恒的原则确定伸缩后的光纤结构尺寸: $d_x = kd$ , $d_y = d/k$ , $D_x = kD$ , $D_y = D/k$ , $L_x = k\Lambda$ , $L_y = \sin 60^\circ\Lambda/k$ 。当  $k = 1.0$  时,对应于未经侧向伸缩的原型光纤,此时  $k_2 \neq 1.0$ ,仅有一种非对称结构存在;当  $k > 1.0$  时,代表沿 Y 方向的纵向压缩和 X 方向的横向伸展;当  $k < 1.0$  时,代表沿 Y 方向的纵向伸展和 X 方向的横向压缩。

### 3 计算结果与分析

采用有限差分波束传播法(FD-BPM),对图 2 所示多孔光纤的双折射与偏振拍长的色散特性进行数值模拟,计算过程中,气孔的折射率设定为 1.00,石英材料的折射率色散曲线由 Sellmeier 方程给出。考虑工艺的可行性,并参照原型多孔光纤的几何尺寸,将模拟计算的参数范围限定为: $d = 2.00 \sim 2.40 \mu\text{m}$ , $\Lambda = 4.00 \sim 4.80 \mu\text{m}$ , $D = 2.20 \sim 4.60 \mu\text{m}$ , $k = 0.5 \sim 2.0$ 。对于给定的  $\Lambda$  值,递进改变  $k, k_1, k_2$  值,计算不同伸缩比及结构参数下双折射与偏振拍长在 1000~2000 nm 波长范围内的变化曲线。

对于图 1 左侧所示的原型光纤, $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ , $k_1 = 0.5$ , $k_2 = 2.0$ , $k = 1.0$ ,计算表明其具有正值双折射( $n_y > n_x$ )。首先考察  $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ , $k_1 = 0.5$  及  $k_2 = 2.0$  不变的情况下,伸缩因子  $k$  的变化对模式双折射的影响,如图 3 及图 4 所示。其中图 3 为  $k < 1$ ,即在 X 方向对光纤几何结构进行压缩而同时在 Y 方向拉伸的情况,图 4 为  $k > 1$ ,即在 Y 方向对光纤几何结构进行压缩而同时在 X 方向拉伸的情况。可以看出,在 X 方向进行压缩对正值双折射具有加强作用,反之,在 Y 方向进行压缩则能有效减小正值双折射,其斜率也能得到抑制。当  $k = 1/0.6$  时,双折射在  $1 \sim 2 \mu\text{m}$  的波长范围内都变为负值。对 X 方向进行压缩主要产生 Y 方向晶格拉伸及 X 轴为短轴的椭圆孔,计算表明,这两种非对称结构的作用是相反的,Y 方向晶格拉伸能减小正值双折射,而 X 轴为短轴的椭圆孔则能增大正值双折射。两者共同作用后正值双折射增强,表明椭圆孔的作用大于晶格拉伸。

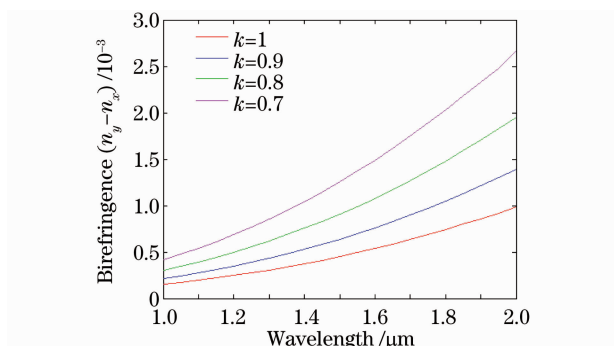


图 3 在 X 方向压缩且在 Y 方向拉伸时( $k < 1$ ),双折射随波长的变化曲线

Fig. 3 Variation of birefringence with wavelength when compressed in X and expanded in Y ( $k < 1$ )

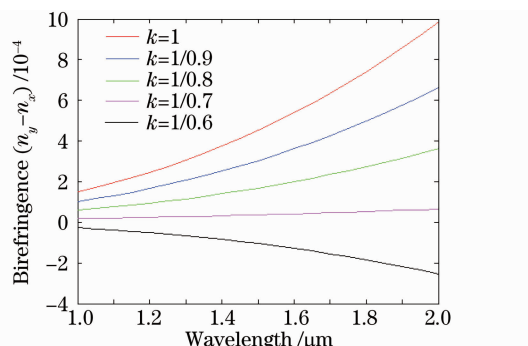


图 4 在 Y 方向压缩且在 X 方向拉伸时( $k > 1$ ),双折射随波长的变化曲线

Fig. 4 Variation of birefringence with wavelength when compressed in Y and expanded in X ( $k > 1$ )

第二步考察  $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ , $k = 1$  及  $k_2 = 2.0$  不变的情况下, $k_1$  的变化对模式双折射的影响,如图 5 所示。这里需要指出, $k$  及  $k_2$  不变时, $k_1$  的变化不仅会造成包层本底微孔尺寸的变化,同时还会改变芯边大孔的尺寸。可以看出,增大  $k_1$  使正值双折射增大,减小  $k_1$  则使正值双折射减小。这主要是由  $k_1$  变化所引起的芯边大孔直径变化对双折射的影响造成的,双折射对芯边大孔直径的变化十分敏感。

从分析可知,增大  $k$  或减小  $k_1$  能有效减小正值双折射并抑制其斜率。计算表明,若只调节其中一个参数来获得稳定拍长,则该组参数的误差容限较小;若同时增大  $k$  并减小  $k_1$  来获得稳定拍长,可获得较大的误差容限。通过同时对  $k$  及  $k_1$  进行调节,获得了一条较稳定的拍长曲线,如图 6 所示,其结构参数为  $\Lambda = 4.4 \mu\text{m}$ , $k = 1/0.77$ , $k_1 = 0.4$ , $k_2 = 2.0$ ,即  $d = 1.76 \mu\text{m}$ , $D = 3.52 \mu\text{m}$ 。在 1550 nm 波长处具有最小拍长值,约为 39.5 mm,在 1380~1750 nm 波长范围内,拍长值在 39.5~40.0 mm 范围内变化,相对变化率约为 1.27%;

在 12000~1900 nm 波长范围内,拍长值在 39.5~41.3 mm 范围内变化,相对变化率约为 4.44%。若用这种光纤制成 1550 nm 波长窗口的零级 1/4 波片,以  $2\pi/300$  作为带宽容限,则工作波段约为 1400~1710 nm 范围,带宽为 310 nm,相对带宽可达 20%。

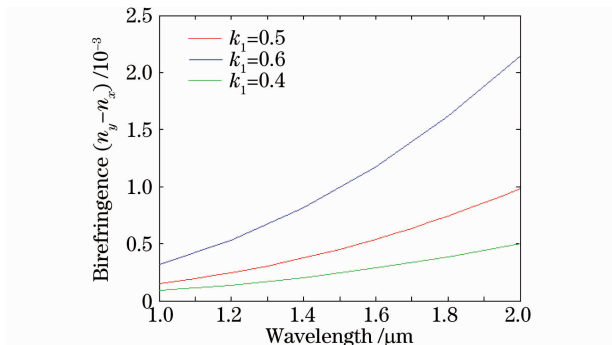


图 5  $k_1$  的变化对双折射色散曲线的影响

Fig. 5 Influence of  $k_1$  on the birefringence dispersion

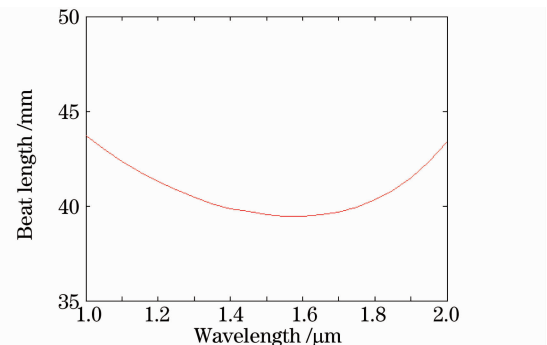


图 6 优化设计得到的偏振拍长色散曲线

Fig. 6 Optimized dispersion curve of polarization beat-length

## 4 结 论

对双折射多孔光纤偏振拍长的波长稳定性进行优化设计,能为研制宽带稳定的光纤器件提供可靠的参考数据。所设计的光纤端面结构可以采用光纤后加工的方法实现,一次引入多种非对称结构,既能有效地调节偏振拍长的色散曲线,又能保证一定的工艺可行性。为便于制作零级宽带光纤波片,所设计的光纤拍长值为厘米量级,设计重点放在偏振拍长的波长稳定性上,并不追求毫米量级的短拍长。采用 3 种非对称结构在不同波长上产生大小不同的正负双折射,互相补偿、平衡调节,形成了较为平坦的偏振拍长色散曲线。

## 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**(19): 1547~1549
- 2 J. C. Knight, P. St. J. Russell. New ways to guide light[J]. *Science*, 2002, **296**(5566): 276~277
- 3 A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth *et al.*. Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1325~1327
- 4 M. J. Steel, R. M. Osgood. Polarization and dispersive properties of elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(4): 495~503
- 5 Shuqin Lou, Guobin Ren, Zhi Wang *et al.*. Polarization properties of high birefringence photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1503~1507  
 娄淑琴, 任国斌, 王 智 等. 高双折射光子晶体光纤的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1503~1507
- 6 Y. Yue, G. Kai, Z. Wang *et al.*. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(5): 469~471
- 7 A. Michie, J. Canning, K. Lyytikainen *et al.*. Temperature independent highly birefringent photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5160~5165
- 8 T. Martynkien, M. Szpulak, W. Urbanczyk. Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal holey fibers[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(36): 7780~7788
- 9 Yan Wei, Deyuan Chang, Kai Zheng *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 等. 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
- 10 S. X. Short, A. A. Tselikov *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in sagnac interferometer-type current sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(7): 1212~1219
- 11 Z. Shi, M. Ji, J. Lin *et al.*. Quarter wave plate made by cutting straight holey birefringent fiber[C]. *SPIE*, 2008, **7134**: 713449
- 12 J. Lin, Z. Shi, M. Li *et al.*. Structural design for birefringent holey fiber with a beat length insensitive to wavelength[J].

- Appl. Opt.*, 2009, **48**(25): F55~F60
- 13 Z. Shi, M. Li, J. Yin *et al.*. Optimal cladding structure of holey fiber designed for broadband fiber-optic wave plate[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75037I
- 14 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