

文章编号: 0253-2239(2010)07-1950-05

矩形晶格双折射多孔光纤宽带稳定拍长的优化设计

李铭佳 石志东 林建强 葛 泉

(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 在矩形晶格多孔光纤的基础上,通过加入一对大直径圆孔,并进一步优化结构参数可以得到宽带稳定的双折射拍长。采用有限差分波束传播法计算了多孔光纤的模式双折射特性,分析了不同参数变化对模式双折射的影响。计算表明,这两种非对称结构分别具有正值和负值双折射,两者相互作用能够控制模式双折射随波长的变化斜率,在一定的波长范围内使模式双折射与波长呈现等比例的线性变化关系,从而得到基本不随波长变化的双折射拍长。通过优化结构参数,分别在 1310 nm 和 1550 nm 波长窗口获得了中心拍长为 10 mm 的平坦拍长曲线,相对带宽达到 12% 以上,这种光纤非常适合制作集成于全光纤大电流传感器之中的宽带光纤波片。

关键词 光纤光学; 多孔光纤; 模式双折射; 拍长; 矩形晶格; 波长敏感性

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.1950

Optimized Design for Rectangular Lattice Holey Birefringent Fiber with Wideband Stable Beat length

Li Mingjia Shi Zhidong Lin Jianqiang Ge Quan

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

Abstract A design scheme of holey fiber with the combination of rectangular lattice and a pair of large-diameter holes in the cross section is proposed, and wideband stable birefringence beat length can be obtained via optimization of the structural parameters. Finite-difference beam propagation method is used to calculate the modal birefringent characteristics of the holey fiber. The influence of different structural parameters on the modal birefringence is analyzed. The calculation suggests these two asymmetric structures can provide positive and negative birefringence respectively. And their interaction can control the variation slope of birefringence over wavelength. Then linear relation of proportional variation between the birefringence with wavelength can be achieved in some given bandwidth, so that wideband stable beat length can be obtained. By optimizing the lattice pitch and the diameter of air holes, stable beat length with the value of 10 mm at 1310 nm and 1550 nm is designed with relative bandwidth more than 12%. This optimal fiber is very suitable for make wideband fiber-optic wave-plate integrated in all-fiber large current sensor.

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

1 引 言

折射率导光型的多孔光纤一般由石英纤芯以及周期性排列着气孔的包层组成,气孔的存在使得包层的有效折射率低于纤芯,光束能和普通光纤一样通过全反射作用束缚在纤芯中进行传播^[1]。不同结

构的多孔光纤可以分别具有无截止单模^[2]、可调色散^[3,4]、大模场面积^[5]和高非线性^[6]等光学特性。通常情况下,包层中的气孔呈对称结构排列,正交偏振模 HE_{11} 及 HE_{11} 的传播常数相同^[7~9]。当多孔光纤横截面的对称性被应力、弯曲或制造过程中产生的

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-16

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

形变等因素破坏时,这对简并模的传播常数就不再相等,从而产生了模式双折射。由于组成多孔光纤的石英和空气之间的折射率差很大,因此通过诸如引入椭圆气孔或拉伸晶格等方法就能获得较高的模式双折射^[10~12]。由于双折射主要是由几何不对称性造成的,相比熊猫光纤和蝴蝶结型光纤等通过应力产生双折射的光纤而言,多孔光纤双折射具有良好的温度稳定性。

波片是光通信和光传感系统中的常用器件,一般起到转换偏振态的作用,其中 $1/4$ 波片能使两个偏振成分产生 $\pi/2$ 的相位差。传统的波片采用具有精确厚度的云母、方解石和铁电晶体等各向异性材料制作,存在不能与传输光纤直接相接、温度稳定性差和波长带宽小等缺点。拍长是双折射光纤的一个重要参量,经过一个拍长的光纤长度后,两个正交线偏振光分量恰好产生 2π 的偏振相位差。若将多孔光纤的长度切割为 $1/4$ 拍长长度,则对应波长的光通过该段光纤后能产生 $\pi/2$ 的偏振相位差,其作用等同于 $1/4$ 波片。利用多孔光纤制作光纤波片能克服块状光学波片无法直接连接光纤以及温度稳定性差的不足^[13]。本文提出了一种基于矩形晶格的多孔光纤截面结构设计方案,能够在较宽的波长范围内使光纤拍长具有波长不敏感性。若采用此种光纤制作光纤波片,则不仅可以改善其温度稳定性,还可以扩大光纤波片的工作带宽。

2 基本理论与设计思路

光纤的模式双折射 B 和拍长 L_B 定义为

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

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

其中 n_x, n_y 和 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, λ 为波长。从(2)式可以看出,光纤的拍长是关于波长及双折射的函数。若要在一定波长范围内实现拍长基本不随波长变化,则必须确保模式双折射 B 在该波长范围内与波长保持同步变化,即双折射随波长的变化率应当接近波长本身的增长斜率。如果多孔光纤的横截面中仅有一种非对称结构,其产生的双折射随波长变化率通常情况下远远高于波长本身的增长斜率。因此,为了实现拍长的波长不敏感性,必须抑制双折射随波长的增长速率。

提出的多孔光纤设计方案如图 1 所示,其横截

面由两种非对称结构组成。图中, Λ_x 和 Λ_y 分别为横向和纵向孔间距, d_1 为包层一般孔的直径, d_2 为纤芯两侧沿 x 轴方向一对大圆孔的直径。该对大圆孔能使 x 方向的有效折射率减小,从而产生负值双折射($n_x > n_y$),而沿 y 轴方向拉伸产生的矩形晶格则能提供正值双折射($n_x < n_y$)。通过两种非对称结构的共同作用,就能对多孔光纤双折射随波长的变化率进行有效抑制。采用有限差分波束传播法(FD-BPM)^[14],对图 1 所示多孔光纤的双折射 B 在波长 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 范围内的变化情况进行了研究,结果如图 2 所示。计算过程中,气孔的折射率设定为 1.00,石英材料的折射率由 Sellmeier 方程给出^[15]。

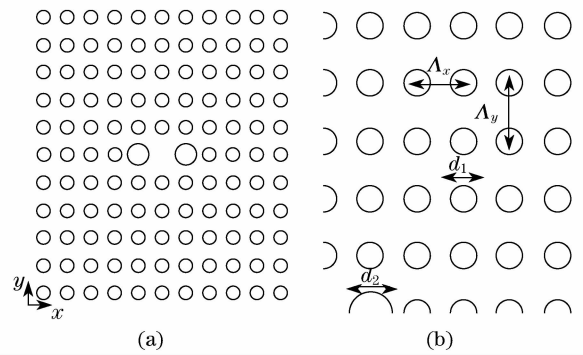


图 1 (a) 矩形晶格双折射多孔光纤截面结构;
(b) 四分之一截面结构图

Fig. 1 (a) Cross section of proposed rectangular lattice birefringent holey fiber; (b) quarter part of the cross-section

图 2 中有两条曲线表示图 1 多孔光纤横截面只存在一种非对称结构时双折射随波长的变化,其中图例 2 对应的曲线表示 $\Lambda_x = \Lambda_y$,仅有沿 x 方向的一对大直径圆孔的情况,图 3 对应的曲线则表示 $d_1 = d_2$,仅有 y 方向拉伸的矩形晶格的情况。从图中可以发现,在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 波长范围内,两种双折射分别呈现正值和负值,且都单调变化,其斜率随波长不断

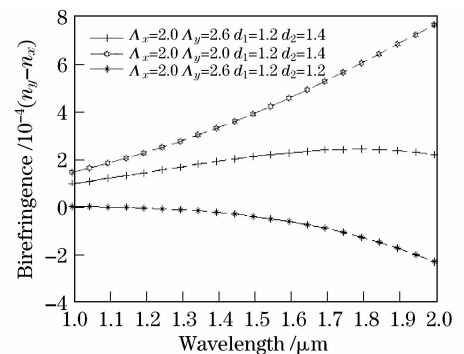


图 2 多孔光纤在不同结构参数下的模式双折射
Fig. 2 Modal birefringence of holey fiber with different structural parameters

增大。由(2)式可知,对应的拍长曲线将以较大的斜率随波长单调下降。图2中图1对应的曲线表示结合两种非对称结构的多孔光纤的双折射随波长变化情况。由于两种不对称结构产生的符号相反的双折射相互作用,使得双折射随波长的变化趋于平缓,从而在一定的波长范围内实现拍长值基本不变。在短波长区域,光波能很好地束缚在纤芯进行传播,此时靠近纤芯的大圆孔产生的双折射起到主要的作用,因此双折射为正值。随着波长增大,纤芯的束缚能力下降,场量开始逐渐扩散到包层,于是矩形晶格产生的负值双折射的作用逐渐增大。从图中可以看出,虽然双折射值仍然随波长增大,但其斜率却逐渐减小。随着波长继续增大,双折射将到达顶点并开始减小。在双折射逐渐增大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,多孔光纤就能实现拍长基本不随波长变化。

3 计算结果与优化设计

在图1所示多孔光纤横截面的四个结构参数中,大孔直径 d_2 和 y 方向晶格间距 Λ_y 主要决定了双折射的变化趋势。为了考察 d_2 和 Λ_y 的变化对双折射的影响,分别计算了 $d_1=1.2\ \mu\text{m}$, $\Lambda_y=2.6\ \mu\text{m}$ 不变情况下 $d_2=1.3, 1.4$ 和 $1.5\ \mu\text{m}$ 时的双折射以及 $d_1=1.2\ \mu\text{m}$, $d_2=1.4\ \mu\text{m}$ 不变情况下 $\Lambda_y=2.5, 2.6$ 和 $2.7\ \mu\text{m}$ 时的双折射,分别如图3和图4所示。由于文中矩形晶格是通过拉伸 y 方向间距获得,因此 x 方向间距 Λ_x 固定为 $2\ \mu\text{m}$ 。

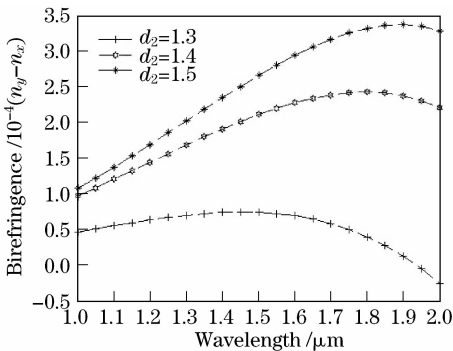


图3 不同 d_2 情况下多孔光纤的模式双折射曲线

Fig. 3 Modal birefringence for proposed holey fiber with different d_2

从图3中可以看出,在其他结构参数保持不变的条件下,双折射值及其变化率都随着大孔直径的增大而上升,最大双折射点所对应的波长也逐渐增大。这表明 d_2 的增大能提高大孔产生的正值双折

射。另一方面,图4则表明增大 y 方向间距能使双折射曲线呈现出相反的变化趋势,即 Λ_y 的增大加强了矩形晶格造成的负值双折射。由此可见,通过改变 d_2 和 Λ_y 中任何一个参数就能控制双折射的变化规律,从而使拍长在所需的波段内实现良好的平坦效果。若希望在长波长区域获得稳定的拍长,可以通过增大 d_2 或者减小 Λ_y 来实现。反之,减小 d_2 或增大 Λ_y ,可在短波长区域获得稳定拍长。

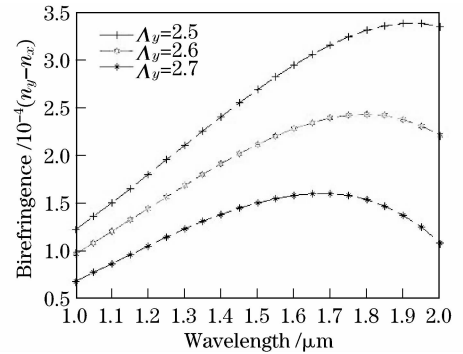


图4 不同 Λ_y 情况下多孔光纤的模式双折射曲线
Fig. 4 Modal birefringence for proposed holey fiber with different Λ_y

进一步分析发现,同时调节 d_2 和 Λ_y 的值不仅能在设定的波段内实现拍长的波长不敏感性,还能根据实际需要改变拍长值的大小。通过优化 d_1, d_2 以及 Λ_y 三个参数,分别在1310 nm和1550 nm两个波长窗口获得了中心拍长恰好为10 mm的两条拍长曲线,如图5所示。两组结构参数如表1所列。以优化1310 nm的拍长曲线为例,首先通过同时调节 d_2 和 Λ_y 的值获得了两组在1310 nm波长窗口具有稳定拍长的结构参数,分别为 $d_1=1.15\ \mu\text{m}$, $d_2=1.62\ \mu\text{m}$, $\Lambda_y=3.06\ \mu\text{m}$ 以及 $d_1=1.15\ \mu\text{m}$, $d_2=1.54\ \mu\text{m}$, $\Lambda_y=3.02\ \mu\text{m}$ 。第一组参数下中心拍长值为8.76 mm,略短于10 mm,第二组参数下中心拍长值为11.46 mm,略长于10 mm。以上两组参数确定了 d_2 和 Λ_y 的优化范围, d_2 在 $1.54\sim 1.62\ \mu\text{m}$ 之间, Λ_y 在 $3.02\sim 3.06\ \mu\text{m}$ 之间。在各自的优化范围内同时调节 d_2 和 Λ_y 的值,一方面使中心拍长值进一步趋近于10 mm,另一方面必须确保波段内拍长的稳定性。最后调节 d_1 使中心拍长恰好等于10 mm。

传统的块状光学波片通常以相移误差 $2\pi/300$ 作为带宽容限。将优化之后的多孔光纤截取 $1/4$ 拍长长度制成 $1/4$ 光纤波片,两组光纤波片在各自的波段内对应的工作带宽分别为170 nm和190 nm,相对带宽大于12%,是普通零级光学波片的3倍。考虑到两组多孔光纤的 $1/4$ 中心拍长长度为

2.5 mm,在工艺上截断这样长度的多孔光纤制作光纤波片是可以操作实现的。

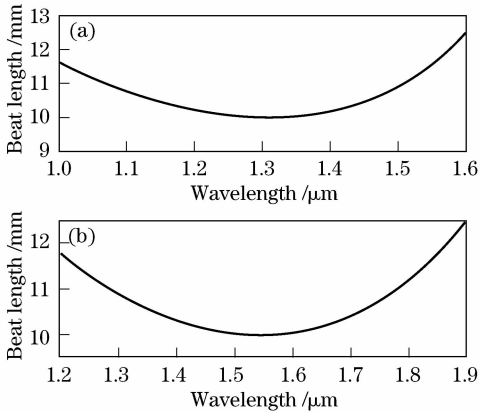


图5 优化所得(a)1310 nm和(b)1550 nm波段中心拍长恰好为10 mm的平坦拍长曲线

Fig. 5 Optimized stable beat length curve with the central beat length of 10 mm at (a) 1310 nm and (b) 1550 nm

表1 拍长曲线对应的多孔光纤结构参数

Table 1 Structural parameters of the optimized holey fiber corresponding to beat-length curve

1310 nm		1550 nm	
$d_1/\mu\text{m}$	1.145	$d_1/\mu\text{m}$	1.131
$d_2/\mu\text{m}$	1.585	$d_2/\mu\text{m}$	1.325
$\Delta_y/\mu\text{m}$	3.052	$\Delta_y/\mu\text{m}$	2.586
L_B/mm	10.00	L_B/mm	10.00

理论设计所得的三个结构参数的值都精确到了 $10^{-3} \mu\text{m}$ 以上,考虑到光纤制作工艺过程中产生的结构误差,在表1中1310 nm波段对应的结构参数基础上,分别计算了 d_1, d_2 以及 Δ_y 存在误差时拍长曲线的变化情况。表2列出了不同相对误差条件下1310 nm处的拍长值及对应的光纤1/4波片的工作带宽。

由表2的结果可以看出, d_1 的误差产生的影响最小,仅会造成中心拍长值的少量偏移,计算表明当 d_1 的误差率小于5%时,光纤的拍长都具有良好的波长稳定性。 d_2 和 Δ_y 的误差会使中心拍长值产生较大幅度的偏差,其中 Δ_y 造成的影响更大,当误差率大于2%时,拍长的波长稳定性将会被破坏,从而使工作带宽急剧减小,多孔光纤制造过程中 d_2 和 Δ_y 的误差应分别控制在2%和1.5%以下。考虑到误差产生的中心拍长值偏差较大,截取光纤时应以实际测得的拍长为准。

从表2还可以发现,理想结构参数对应的带宽并不是最宽的。这是由于在优化设计的过程中,将

中心拍长设定为该波长范围内的最低值,目的是为了放弃一定的带宽以提高误差容忍。另外,在误差率相同的条件下,同一结构参数正、负误差对中心拍长值造成的影响也是不同的。 d_1 和 d_2 的正误差产生的拍长偏移较小,而 Δ_y 的正误差产生的拍长偏移则较大。从图5的拍长曲线可以看出,中心波长左侧的拍长曲线斜率比右侧略小, d_1 和 d_2 的正误差会使稳定拍长所处的波长区域向高波长方向移动,1310 nm将落在中心波长的左侧,因此与理想拍长偏差较小,而 Δ_y 的正误差则恰好相反。

表2 d_1, d_2 及 Δ_y 分别存在不同误差时1310 nm处拍长值及波片工作带宽的变化情况

Table 2 Beat length at 1310 nm and operation bandwidth for optimized holey fiber with different error

rate of d_1, d_2 and Δ_y				
	Error rate/ %	L_B/mm	Difference rate/%	Bandwidth/ nm
Error of d_1	± 0	10.00	± 0	170
	+1	9.91	-0.90	180
	+2	9.90	-1.02	185
	-1	10.37	+3.69	175
	-2	10.46	+4.63	185
	+1	9.13	-8.70	180
Error of d_2	+2	8.36	-16.45	185
	-1	10.97	+9.73	175
	-2	12.05	+20.51	180
	+1	11.77	+17.71	195
Error of Δ_y	+2	14.69	+46.93	45
	-1	8.79	-12.14	185
	-2	7.88	-21.17	100

4 结 论

将y方向拉伸的矩形晶格与沿x方向一对大圆孔,这两种非对称结构同时应用于多孔光纤的横截面,能够在一定的波长范围内使拍长具有波长不敏感性。通过调节y方向晶格间距和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。经过结构参数优化,分别在1310 nm和1550 nm两个波长窗口获得了中心拍长恰好为10 mm的平坦拍长曲线。若采用此种光纤制作光纤波片,则不仅可以改善温度稳定性,还可以扩大工作带宽,将其集成于全光纤大电流传感器中,可以提高系统的稳定性和可靠性。

参 考 文 献

1 J. C. Knight, P. St. J. Russell. Photonic crystal fibers: new

- ways to guide light[J]. *Science*, 2002, **296**(5566): 276~277
- 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 Yuan Jinhui, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Investigation of a step-structure photonic crystal fiber with flattened dispersion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1167~1171
苑金辉, 候蓝田, 周桂耀 等. 一种阶梯结构的色散平坦光子晶体光纤的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1167~1171
 - 4 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 539~542
吴 铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 539~542
 - 5 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
 - 6 Wang Qingyue, Hu Mingjie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66
王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
 - 7 P. R. McIsaac. Symmetry-induced modal characteristics of uniform waveguides-I: summary of results[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1975, **23**: 421~429
 - 8 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. 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
 - 9 Fang Hong, Lou Shuqin, Ren Guobin *et al.*. Mode cutoff in photonic crystal fiber with non-uniform holes[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 493~498
方 宏, 娄淑琴, 任国斌. 非均匀孔径光子晶体光纤的模式截止[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 493~498
 - 10 Daru Chen, Linfang Shen. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fibers with double defect[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9): 2700~2705
 - 11 P. Song, L. Zhang, Z. Wang *et al.*. Birefringence characteristics of squeezed lattice photonic crystal fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(7): 1771~1776
 - 12 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. 高双折射光子晶体光纤特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 559~562
 - 13 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
 - 14 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method[J]. *J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~2649
 - 15 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Boston: Academic Press, 3rd.