

降低空气孔参数微扰敏感性的多孔光纤 宽带波片设计

林建强^{1,2} 石志东¹ 刘珍¹ 季敏宁¹

¹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

²广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006

摘要 为降低双折射多孔光纤偏振拍长的波长敏感性, 制作宽带稳定的光纤偏振器件, 提出一种包层空气孔呈矩形阵列分布的多孔光纤包层结构设计方案, 在包层中引入具有不同双折射变化趋势的非对称性结构, 采用全矢量光束传播法并考虑熔融石英的材料色散, 计算分析了不同结构参数对偏振拍长稳定性的影响。研究结果表明, 这种多孔光纤的包层结构降低了偏振拍长的波长敏感性, 在 1.26 ~ 1.60 μm 波长范围内, 偏振拍长的相对变化率小于 $\pm 4\%$, 达到制作光纤波片的宽带稳定性能要求; 同时, 优化后包层结构的几何参数具有较大的误差容限, 进一步降低了制作工艺的难度。

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/LOP51.020603

Design for Holey Fiber Broadband Wave Plate by Reducing the Perturbation Sensitivity of the Air Hole Parameters

Lin Jianqiang^{1,2} Shi Zhidong¹ Liu Zhen¹ Ji Minning¹

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²School of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China

Abstract To reduce the polarization beat length wavelength sensitivity in birefringence holey fiber so as to produce a stable broadband fiber-optic polarizer, a holey fiber cladding structure design with a rectangular array distribution of air holes in cladding is presented. Asymmetric structures with different birefringence trends are introduced into the cladding. The influence of different structural parameters on the polarization beat length stability is calculated and analyzed by the full vector beam propagation method, including the material dispersion of fused silica. The results show that the fiber cladding structure reduces the sensitivity of the polarization beat length to the wavelength. In the wavelength of 1.26~1.60 μm , the relative change in polarization beat length is less than $\pm 4\%$ and the broadband stability requirements for producing optical wave plate are met. Moreover, the optimized geometrical cladding structure has a large error tolerance, further reducing the difficulty of fabrication.

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

OCIS Codes 060.2310; 060.2380; 060.2400

1 引言

波片(也称相位延迟器)是光通信和光传感系统中的常用器件,对于控制光信号的偏振态起着重要的作用。宽带波片(也称为消色差波片或消色差相位延迟器)的相位延迟量可在一定波长范围内基本保持不变,

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-09-09; 网络出版日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(11074164, 61107075)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108, 08DZ2231100)、广西教育厅科研项目(201203YB126)、广西科技大学博士基金(校科博 13Z07)

作者简介: 林建强(1964—),男,博士,副教授,主要从事光纤波导器件与微结构光纤光子学方面的研究。

E-mail: linwork@163.com

广泛应用于光谱整形、激光调谐、空间光通信等领域。目前应用比较成熟的宽带波片一般由二片或二片以上的块状晶体光学波片通过一定的方式组合而成。从20世纪80年代开始,有人开始利用光纤来制作光纤波片,这种光纤波片体积小、重量轻,易于集成在全光纤通信传感系统中。传统光纤波片大多由“熊猫”、“领结”或旋转光纤等应力型双折射光纤制作而成,受残余热应力、偏振模色散等因素的影响,这些传统双折射光纤制作的光纤偏振器件工作温度稳定性较差、波长的带宽较小^[1-6]。而多孔光纤与传统的应力型双折射光纤相比,具有很多优越的特性,其包层空气孔的几何参数具有很大的设计自由度,通过调节几何参数可以产生一定大小的双折射,这种几何双折射以及相应的偏振拍长对于温度的变化不敏感^[7-9],具有较好的温度稳定性,但是多孔光纤波片与传统双折射光纤制作的波片相比,在工作带宽方面并无明显的改善^[10],这是由于双折射多孔光纤的偏振拍长一般随波长的变化而变化,使得两个正交线偏振光分量的相位延迟量很难在一定波长范围内基本保持不变。近年来的研究通过对多孔光纤的包层结构进行优化设计,波片的工作带宽已经可以覆盖1310 nm和1550 nm常用通信波长窗口,基本解决了偏振拍长的波长敏感性问题^[11-17]。但是上述研究基本没有考虑偏振拍长对于包层结构参数变化的敏感性问题,优化设计的包层结构对于工艺误差有很高的精度要求,基本上在 10^{-3} μm 量级,甚至更高,目前的光纤拉丝工艺还无法达到这样高的控制精度。本文提出一种包层空气孔呈矩形阵列分布的多孔光纤包层结构设计方案,与空气孔呈六角形阵列分布的多孔光纤相比,这种矩形晶格多孔光纤可以更为方便地调节包层空气孔在横向或纵向(x 方向或 y 方向)上的间距,且在公差控制上更为方便。通过改变本底空气孔的形状、纤芯附近大孔的直径大小和空气孔间距,在包层中引入具有不同双折射变化趋势的非对称性结构,通过调节这些非对称性结构,既可以降低偏振拍长的波长敏感性,使偏振拍长的宽带稳定性达到制作宽带光纤波片的性能要求,同时又可以使包层结构的几何参数具有较大的误差容限,进一步降低制作工艺的难度。

2 基本理论与包层结构的设计思路

偏振拍长是表征光纤中双折射性质的一个重要参量,它直接决定着光纤的偏振态保持能力及其相关器件(如光纤波片)的性能品质。多孔光纤的偏振拍长 L 与模式双折射 B 满足关系式 $L = \lambda/|B|$,其中 λ 为自由空间中光的波长。多孔光纤的双折射 B 一般随波长 λ 呈非线性指数变化,故偏振拍长 L 对于波长 λ 的变化有一定的敏感性,这种波长敏感性会限制多孔光纤偏振器件的工作带宽。通过在包层中引入双折射变化趋势相反的多种非对称结构,可以在一定程度上抑制双折射随波长的非线性变化,扩大模式双折射随波长线性变化的波长区间,从而降低偏振拍长的波长敏感性。偏振拍长的波长敏感性用相对变化率 R 来描述:

$$R = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_m} \times 100\%, \quad (1)$$

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

式中 L_m 为给定波长范围内偏振拍长的中值, L_{\max} 、 L_{\min} 分别为波长变化范围内偏振拍长的最大值和最小值。

如图1所示多孔光纤的气孔呈矩形阵列分布,纤芯附近有一对特殊空气孔,直径为 D ,其余的气孔为本底空气孔,直径为 d ,空气孔在 x 和 y 方向的间距分别为 Λ_x 和 Λ_y ,初始几何参数为 $D = 4.0$ μm , $d = 2.5$ μm , $\Lambda_x = \Lambda_y = 6.0$ μm 。

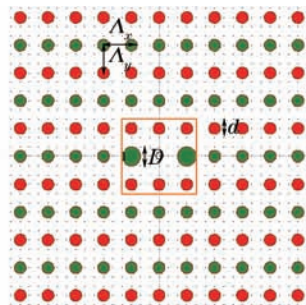


图1 矩形晶格多孔光纤的横截面示意图

Fig.1 Cross section of holey fiber with rectangular lattice

本文采用 RSoft 软件,应用全矢量有限差分光束传播法对图 1 所示多孔光纤偏振拍长的波长敏感性进行分析研究。横向(x - y 方向)采用中心差分格式离散,在 x 、 y 方向计算窗口的范围均为 $(-35 \mu\text{m}, 35 \mu\text{m})$, 横向网格间距 Δx 和 Δy 为 $0.02 \mu\text{m}$, 纵向(z 方向)采用 ADI 差分格式计算,空间步长 Δz 为 $0.5 \mu\text{m}$, 传播 1024 步。入射到光纤端面的初始光场分布选为高斯型,等效半径为 $8.0 \mu\text{m}$, 边界条件采用透明边界条件 (TBC),波长的变化范围为 $1.2\sim 1.7 \mu\text{m}$ 。

3 本底空气孔的优化

在参数优化前,多孔光纤的双折射来自于包层横截面中仅有的一种非对称性结构: $D>d$ 。因为 $D>d$ 形成的非对称性结构所产生的双折射为正值,因此考虑把本底空气孔从圆形变为椭圆形,若本底椭圆空气孔的长轴在 x 方向,那么这种非对称性结构($d_x>d_y$)产生的双折射为负值,该负值双折射可以抑制原有双折射的非线性变化。

假定本底空气孔的面积没有变化,只有形状变化,定义形状因子 s 表示本底空气孔形状的变化,令 $s^2=d_x/d_y$, 其中 $d_x=d \times s$ 和 $d_y=d/s$ 分别为本底空气孔在 x 和 y 方向上的轴长。分别计算形状因子 $s=1.0$ 、 1.1 、 1.2 、 1.3 时的偏振拍长,结果如图 2 所示,对应的偏振拍长中值和相对变化率如表 1 所示。计算结果表明,改变本底空气孔的形状之前,即 $s=1.0$ 时,偏振拍长的相对变化率在 50% 以上,改变本底空气孔的形状引入新的非对称性结构后,可以有效地抑制原有双折射的非线性变化;当形状因子 $s=1.2$ 时,偏振拍长的相对变化率得到了明显的改善,减少到了 30% 以下。

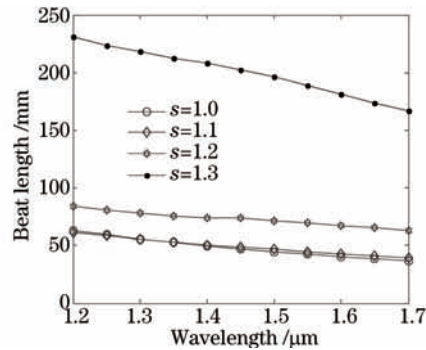


图 2 不同 s 值的偏振拍长随波长变化曲线

Fig.2 Variation of beat length versus wavelength with different s

表 1 不同 s 值的偏振拍长的中值和相对变化率

Table 1 Mean values and relative change rates of beat length with different s

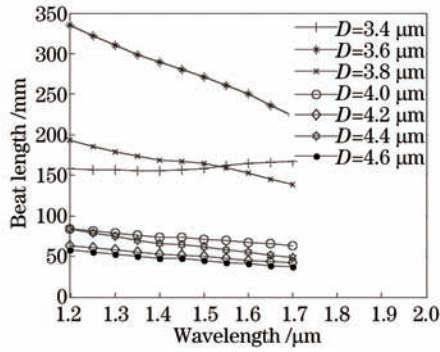
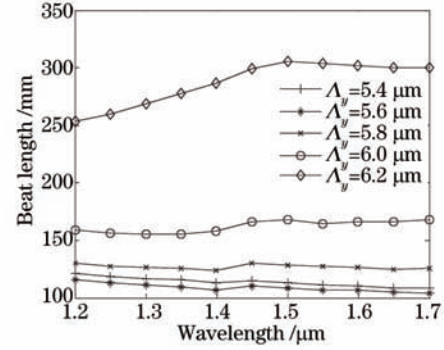
s	1.0	1.1	1.2	1.3
L_m / mm	49.6	50.4	73.6	198.8
$R / \%$	53.1	44.2	28.3	32.2

4 特殊空气孔的优化

确定 $s=1.2$,再寻求纤芯附近特殊空气孔的优化值。保持 $\Lambda_x = \Lambda_y = 6.0 \mu\text{m}$, 分别计算 $D=3.4$ 、 3.6 、 3.8 、 4.0 、 4.2 、 4.4 、 $4.6 \mu\text{m}$ 时的偏振拍长,结果如图 3 所示,对应的偏振拍长中值和相对变化率如表 2 所示。计算结果表明,在 $D=3.4 \mu\text{m}$ 时,偏振拍长的相对变化率得到了明显的改善。

5 空气孔间距的优化

保持纤芯附近特殊空气孔的直径 $D = 3.4 \mu\text{m}$, 本底气孔的形状因子 $s=1.2$, x 方向的孔间距 $\Lambda_x = 6.0 \mu\text{m}$ 不变,改变 y 方向的孔间距 Λ_y , 再引入第二种非对称性结构 ($\Lambda_x \neq \Lambda_y$), 以进一步抑制双折射的非线性变化。分别计算 $\Lambda_y = 5.4$ 、 5.6 、 5.8 、 6.0 、 $6.2 \mu\text{m}$ 时的偏振拍长,如图 4 所示,偏振拍长的大小和相对变化率如表 3 所示。

图3 不同 D 值的偏振拍长随波长变化曲线Fig.3 Variation of beat length versus wavelength with different D 图4 孔间距 A_y 变化时偏振拍长随波长变化的曲线Fig.4 Variation of beat length versus wavelength with different A_y 表2 不同 D 值的偏振拍长的中值和相对变化率Table 2 Mean values and relative change rates of beat length with different D

$D/\mu\text{m}$	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6
L_m/mm	161.4	279.0	165.8	73.6	52.7	66.7	47.5
$R/\%$	8.0	39.9	32.5	28.3	40.8	52.6	44.0

表3 孔间距 A_y 变化时偏振拍长的中值和相对变化率Table 3 Mean values and relative change rates of beat length with different A_y

$A_y/\mu\text{m}$	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2
L_m/mm	114.5	109.8	126.9	161.4	279.1
$R/\%$	11.1	10.3	5.1	8.0	18.6

计算结果表明,引入第二种非对称性结构后,偏振拍长的波长敏感性得到了进一步的改善。其中 $A_y = 5.8 \mu\text{m}$ 时,偏振拍长的相对变化率为5.1%,已经满足制作宽带消色差光纤波片的延迟精度要求,而且偏振拍长的中值为126.9 mm,其大小也适合于加工制作零级消色差 $\lambda/4$ 光纤波片。

6 误差容限分析

该矩形晶格多孔光纤的包层结构几何参数的优化值为: $D=3.4 \mu\text{m}$, $d_x=3.0 \mu\text{m}$, $d_y=2.1 \mu\text{m}$, $A_x=6.0 \mu\text{m}$, $A_y=5.8 \mu\text{m}$ 。当结构参数的优化值存在不同误差时偏振拍长随波长的相对变化率用 $(L-L_m)/L_m$ 表示,如图5所示。计算结果表明,以偏振拍长的相对变化率小于 $\pm 4\%$ 为限,在1.26~1.60 μm 波长范围内, D 、 d_x 、 d_y 、 A_x 和 A_y 的误差容限分别为 $-1\% \sim +1\%$ 、 $-3\% \sim +3\%$ 、 $-2\% \sim +3\%$ 、 $-1\% \sim +1\%$ 、 $-11\% \sim +4\%$,与现有多孔光纤加工工艺误差控制水平相当,且该波长范围覆盖了1.31 μm 和1.55 μm 两个常用通信窗口。

比较而言,引入的两种非对称性结构($d_x \neq d_y$ 和 $A_x \neq A_y$)的调节参数 d_x 、 d_y 和 A_y 有比较大的误差容限,纤芯附近空气孔大小 D 和 x 方向孔间距 A_x 的误差容限相对较小,因此在拉制这种多孔光纤时,应特别注意 D 和 A_x 的误差控制。

7 结论

对一种包层空气孔呈矩形阵列分布的多孔光纤的非对称性结构进行了优化设计。在优化前这种多孔光纤的正双折射特性主要由纤芯附近一对大孔缺陷产生,偏振拍长的相对变化率大于50%,波长敏感性较高。通过引入具有负双折射特性的椭圆本底空气孔缺陷,使正负两种双折射相互补偿,再调节 y 方向上的孔间距引入新的非对称性结构进一步精细优化调节,在1.26~1.60 μm 波长范围内偏振拍长相对变化率小于 $\pm 4\%$,且包层结构参数有较大的误差容限,较好地兼顾了宽带波片相位延迟精度与工艺可行性之间的矛盾。

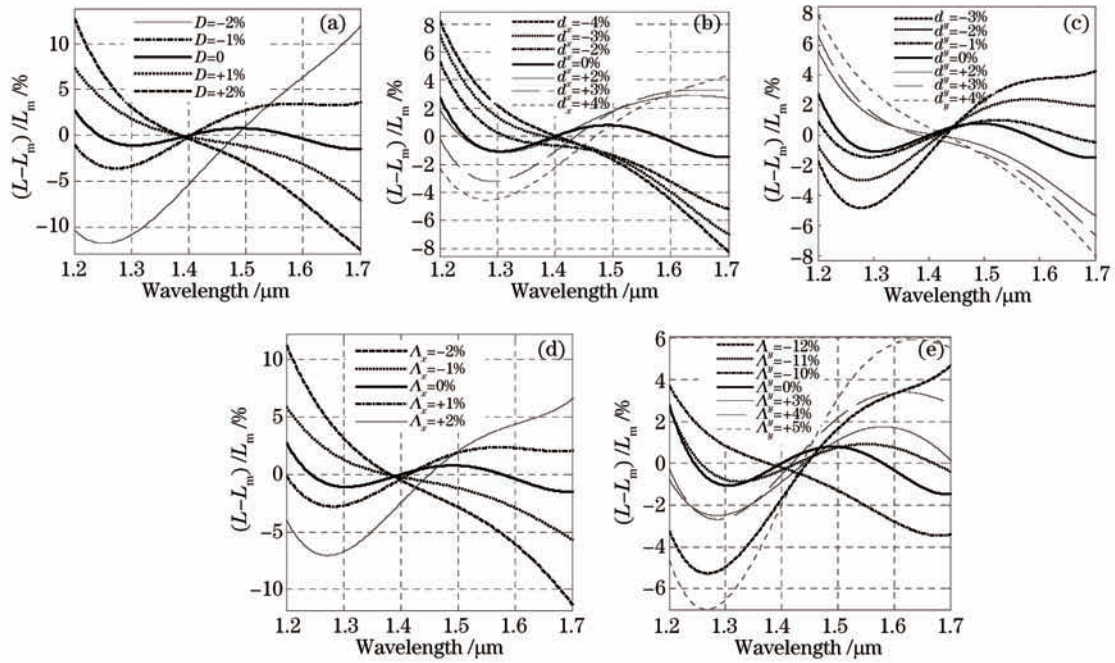


图5 (a) D 、(b) d_x 、(c) d_y 、(d) A_x 和(e) A_y 不同误差条件下偏振拍长相对变化率随波长变化曲线

Fig.5 Relative change rate of beat length with deviation of (a) D , (b) d_x , (c) d_y , (d) A_x and (e) A_y

参考文献

- 1 H C Lefevre. Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers[J]. Electron Lett, 1980, 16(20): 778-780.
- 2 Xiang Yongjiang. Research on ordinary single-mode fibre wave plates and polarization controllers[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1992, 13(6): B335-B338.
向永江. 普通单模光纤波片及偏振控制器的研究[J]. 航空学报, 1992, 13(6): B335-B338.
- 3 Xiang Yongjiang. Frequency shifter and polarization controller based on birefringence of bending ordinary single-mode fibre[J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(1): 79-83.
向永江. 基于双折射效应的普通单模光纤频率偏移器和偏振控制器[J]. 光学学报, 1990, 10(1): 79-83.
- 4 Yao Yi, Shi Kun, Lu Weidong, *et al.*. In-line single mode fiber polarization controller[J]. Acta Optica Sinica, 1995, 15(5): 636-640.
姚毅, 施昆, 路伟东, 等. 在线单模光纤偏振控制器研究[J]. 光学学报, 1995, 15(5): 636-640.
- 5 Ruan Yinglan, Xiang Qing, Huang Dexiu. Bending-induced birefringence in single-mode fiber and its measurement[J]. Chinese J Lasers, 1996, 23(10): 901-905.
阮迎澜, 向清, 黄德修. 单模光纤应力诱导双折射及其测试研究[J]. 中国激光, 1996, 23(10): 901-905.
- 6 H-C Huang. Fiber-optic analogs of bulk-optic wave plates[J]. Appl Opt, 1997, 36(18): 4241-4258.
- 7 S X Short, A A Tselikov, de Arruda J U, *et al.*. Imperfect quarter-waveplate compensation in Sagnac interferometer-type current sensors[J]. J Lightwave Technol, 1998, 16(7): 1212-1219.
- 8 A H Rose, N Feat, S M Etzel. Wavelength and temperature performance of polarization transforming fibers[J]. Appl Opt, 2003, 42 (34): 6897-6904.
- 9 Xiaozhen Wang, Xiaopeng Dong, Zuosheng Xie. Measurement and analysis of the birefringence of photonic crystal fiber with wavelength scanning method[J]. Opt Quantum Electron, 2007, 39(12-13): 1081-1090.
- 10 Zhidong Shi, Minning Ji, Jianqiang Lin, *et al.*. Quarter wave plate made by cutting straight hole birefringent fiber[C]. SPIE, 2008, 7134: 713449.
- 11 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.

- 12 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.
- 13 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.
- 14 Lin Jianqiang, Shi Zhidong, He Wei, *et al.*. Optimization of polarization beat length stability of rectangular lattice microstructure optical fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(11): 110608.
林建强, 石志东, 何伟, 等. 矩形晶格微结构光纤偏振拍长稳定性的优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(11): 110608.
- 15 Li Mingjia, Shi Zhidong, Lin Jianqiang, *et al.*. Optimized design for rectangular lattice holey birefringent fiber with wideband stable beat length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 1950–1954.
李铭佳, 石志东, 林建强, 等. 矩形晶格双折射多孔光纤宽带稳定拍长的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 1950–1954.
- 16 Shi Zhidong, Lin Jianqiang, Li Mingjia, *et al.*. Optimal design for holey birefringence fiber with stable polarization beat-length in super-wide band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(s1): s100303.
石志东, 林建强, 李铭佳, 等. 双折射多孔光纤超宽带稳定拍长的优化设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(s1): s100303.
- 17 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.