

菱形晶格多孔光纤偏振拍长的波长敏感性优化

林建强

(广西科技大学电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006)

摘要 针对菱形晶格多孔光纤,应用全矢量有限差分光束传播法分析了纤芯附近一对特殊气孔、本底气孔以及对角线上的气孔间距对偏振拍长波长敏感性的影响,初步得出包层结构的优化参数,再通过横向伸缩形变引入两种新的非对称结构,进一步抑制多孔光纤原有双折射随波长的非线性变化,在降低偏振拍长波长敏感性的同时包层结构的几何参数也获得了较大的误差容忍,结果表明,偏振拍长的中值为 132.5 mm,在波长 1.2~1.7 μm 范围内,相对变化率小于 $\pm 4\%$,同时优化后包层结构的几何参数误差容忍大于 0.1 μm ,为制作多孔光纤宽带消色差波片提供了较为可行的工艺参数。

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 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s105002

Optimized Design for Beat-Length Stability of the Holey Birefringence Fiber with Diamond Lattice

Lin Jianqiang

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

Abstract For the holey fiber with diamond lattice, the influence of the special holes near the core, the bottom holes and the pitch of diagonal holes on the wavelength sensitivity of polarization beat length is analyzed. The preliminary optimal cladding structure parameters are obtained. Then two new asymmetric structures are introduced through the lateral deformation. The holey fiber original non-linear variation of birefringence with wavelength is further suppressed. The wavelength sensitivity of the polarization beat length is reduced while a larger error tolerance of the cladding structure geometrical parameters is obtained. The results show that the median value of polarization beat length is about 132.5 mm and the relative variation of polarization beat length is less than $\pm 4\%$ in wavelength range of 1.2~1.7 μm while the error tolerance of optimized geometric parameters is greater than 0.1 μm . The more feasible process structure parameters are provided for drawing the achromatic holey fiber wave plates with broadband.

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

OCIS codes 060.2310; 060.2380; 060.2400

1 引言

在光纤通信和传感系统中,如单模光纤传感器、光纤激光器、光纤环镜等,常常需要对光的偏振态加以控制^[1-4]。波片是实现偏振控制算法的重要器件,从 20 世纪 80 年代开始,人们开始研究利用光纤来制作波片^[5]。与块状晶体光学波片相比,光纤波

片体积小、重量轻、插入损耗低,而且易于集成在光纤通信和传感系统中。常见的光纤波片一般由单模光纤制作而成,主要有两种类型:1) 绕成环状的圆环式光纤波片,利用单模光纤弯曲时产生应力双折射;2) 挤压式光纤波片,利用侧向挤压单模光纤产生应力双折射^[6-7]。上述光纤波片的优点是可以实

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-11-02

基金项目: 广西高校科研项目(201203YB126)、广西科技大学博士基金项目(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等方面的研究。

E-mail: linwork@163.com

现光纤链路中偏振态的在线调节,缺点是受光纤的物理疲劳、残余热应力、偏振模色散等因素的影响,相位调节精度较低、温度稳定性较差、工作带宽较小,只适合于偏振态控制精度要求不高的场合。

理论上,“熊猫”、“领结”等传统双折射光纤也可以制作光纤波片,一般这些传统双折射光纤的双折射值较小而且不易调节,所以并不适合用来制作光纤波片。多孔光纤则不同,可以方便地通过调节包层结构的几何参数产生较大的双折射,而且这种几何双折射对于温度的变化不敏感,具有较好的温度稳定性^[8-9]。一般来说,多孔光纤的偏振拍长对于波长的变化比较敏感,要想获得较大的工作带宽,就必须对多孔光纤包层结构的几何参数进行优化设计,以降低偏振拍长的波长敏感性。由于涉及到多个几何参数的调节,偏振拍长的波长敏感性优化是非常复杂的。通过近年的研究,多孔光纤偏振拍长的波长敏感性问题已经得到了较好的解决,工作带宽基本上覆盖了 1310 nm 和 1550 nm 两个常用波长通信窗口^[10-17]。但是上述文献在优化过程中并未考虑制作工艺误差的影响,优化以后的偏振拍长对于包层结构几何参数的误差扰动高度敏感,误差容限一般在 0.001 μm 左右,目前的光纤拉丝工艺还无法达到这样高的控制精度,因此必须设法提高包层结构几何参数的误差容限。

由于偏振拍长对不同几何参数变化时的敏感性并不相同,利用不同几何参数变化时引起的不同偏振拍长变化趋势进行相互调节和补偿,可以降低偏振拍长对包层几何参数变化的敏感性,从而获得包层几何参数较大的误差容限。本文针对一种菱形晶格多孔光纤包层中纤芯附近一对特殊空气孔、本底空气孔和孔间距进行初步优化,再利用横向伸缩形变在多孔光纤的包层横截面中增添新的非对称性结构,与原有的双折射进行平衡和补偿,不仅使偏振拍长的波长敏感性达到制作宽带消色差 λ/4 光纤波片的性能要求,而且使包层截面结构的几何参数具有较大的误差容限,具备一定的工艺可行性。

2 包层横截面的几何结构

图 1 为多孔光纤的圆形空气孔呈对角为 90°的菱形晶格阵列分布,空气孔分为两类:1) 沿着正方形空气孔阵列对角线的芯边两个空气孔——芯边特殊空气孔;2) 本底空气孔。图 1 中选择光纤横截面位于 XY 平面内,轴向为 Z 方向,D、d 和 Δ 分别为芯边特殊空气孔直径、本底空气孔直径和 X、Y 轴上空

气孔间距,这时包层中仅存在一种类型的非对称性结构: $d \neq D$ 。图 1 所示多孔光纤仅使用石英一种材料控制,石英材料的折射率由 Sellmeier 方程给出: $n = (1 + n_1 + n_2 + n_3)^{1/2}$,其中 $n_1 = 0.6961663 \times \lambda^2 / (\lambda^2 - 0.0684043^2)$, $n_2 = 0.4079426 \times \lambda^2 / (\lambda^2 - 0.1162414^2)$, $n_3 = 0.8974794 \times \lambda^2 / (\lambda^2 - 9.896161^2)$,空气孔折射率设为 1.00。

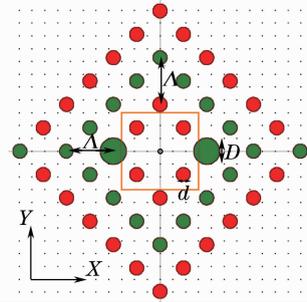


图 1 对角为 90°的菱形晶格多孔光纤截面

Fig. 1 Cross section of holey fiber with diamond lattice

偏振拍长 L 与模式双折射 B 满足关系式 $L = \lambda / |B|$,式中 λ 为自由空间中光的波长。模式双折射 $B = n_y - n_x$,式中 n_x 和 n_y 分别为 X 和 Y 方向的有效折射率。设多孔光纤包层的初始几何尺寸为 $d = 2.5 \mu\text{m}$, $D = 4.0 \mu\text{m}$, $\Delta = 7.5 \mu\text{m}$ 。采用 RSOFTE 软件,应用全矢量有限差分光束传播法对图 1 所示多孔光纤分别计算其 X 和 Y 方向的有效折射率 n_x 和 n_y ,进而分析研究该多孔光纤偏振拍长的波长敏感性。在计算过程中,横向采用中心差分格式离散,计算窗口 X 方向为 $(-26 \mu\text{m}, 26 \mu\text{m})$,Y 方向为 $(-26 \mu\text{m}, 26 \mu\text{m})$,横向网格间距 Δx 和 Δy 为 $0.02 \mu\text{m}$,纵向采用交替方向隐式差分格式计算,空间步长 Δz 为 $0.5 \mu\text{m}$ 。入射到光纤端面的初始光场分布选为高斯型,等效半径取为 $6.0 \mu\text{m}$,边界条件采用透明边界条件。

多孔光纤的双折射 B 一般随波长 λ 呈非线性指数变化趋势,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。偏振拍长的波长敏感性用相对变化率 R 来描述为

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

式中 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, $L_m = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}$ 为给定波长范围内偏振拍长的中值。

3 包层结构的优化

3.1 纤芯附近特殊空气孔的优化

保持 $d=2.5\ \mu\text{m}$, $\Lambda=7.5\ \mu\text{m}$ 不变, 分别计算 D 在 $3.7\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 时的偏振拍长 L 及其相对变化率 R , 结果如图 2 所示。不同 D 值的偏振拍长相对变化率相差不大, 均在 $50\%\sim 60\%$ 之间, 说明偏振拍长相对变化率对于 D 的变化有着较低敏感性。 R 的大小反映了偏振拍长的波长敏感性, 应该选择 R 小的结构参数, 参考块状晶体光学消色差 $\lambda/4$ 波片

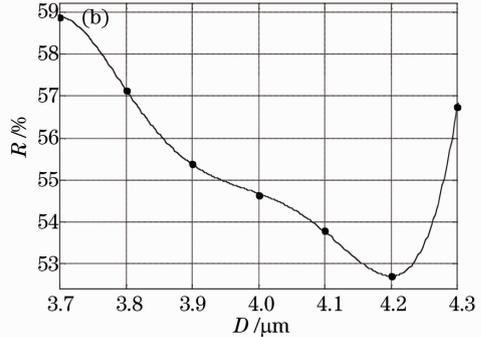
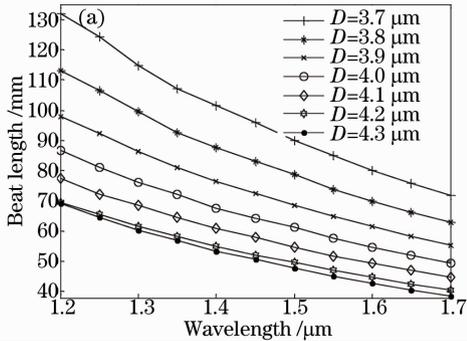


图 2 D 取不同值时的(a)偏振拍长及其(b)相对变化率 R

Fig. 2 (a) Beat length and (b) its R versus wavelength with different D

3.2 本底空气孔的优化

取 $D=4.1\ \mu\text{m}$, $\Lambda=7.5\ \mu\text{m}$, 分别计算 d 在 $1.5\sim 2.8\ \mu\text{m}$ 时的偏振拍长, 如图 3(a)、(b)所示, 对应的偏振拍长的相对变化率如图 3(c)所示, $d=2.2\ \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小。考虑到偏

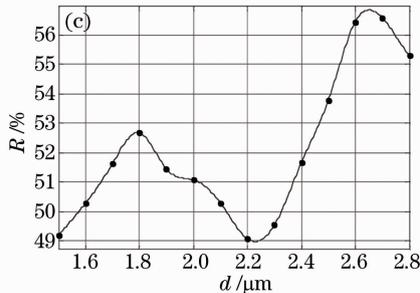
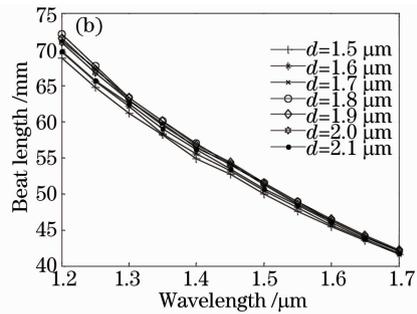
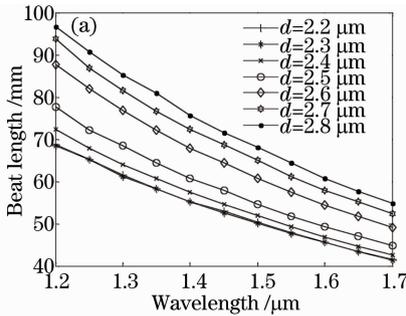


图 3 d 取不同值时的(a)、(b)偏振拍长及其(c)相对变化率 R

Fig. 3 (a), (b) Beat length and (c) its R versus wavelength with different d

的相位延迟精度(一般为 $\pm\lambda/100$), 在工作带宽内偏振拍长的相对变化率不应超过 $\pm 4\%$ (或 8%)。另外, 为便于切割加工制作偏振器件, 必须考虑拍长值的大小, 如宽带 $\lambda/4$ 光纤波片, 拍长值最好选择在 $40\sim 160\ \text{mm}$ 之间。在图 2(b)中, $D=4.2\ \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率最小, 但是考虑到 $D=4.1\ \mu\text{m}$ 时偏振拍长要大一些, 而偏振拍长的相对变化率相差不大, 因此优选 $D=4.1\ \mu\text{m}$ 。显然这时偏振拍长的相对变化率还很大。

振拍长的相对变化率的变化趋势, 本底空气孔 d 小于 $2.2\ \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率有可能更小, 计算结果表明, 本底空气孔 d 小于 $2.2\ \mu\text{m}$ 时, 偏振拍长的相对变化率并没有进一步减小, 因此优选 $d=2.2\ \mu\text{m}$ 。

3.3 X 和 Y 轴上孔间距的优化

保持 $D=4.1\ \mu\text{m}$, $d=2.2\ \mu\text{m}$ 不变, 分别计算 Λ 在 $7.2\sim 7.8\ \mu\text{m}$ 时的偏振拍长 L 及其相对变化率

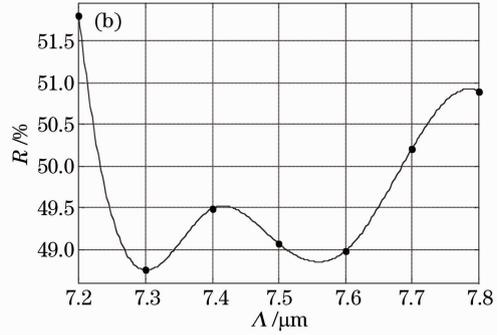
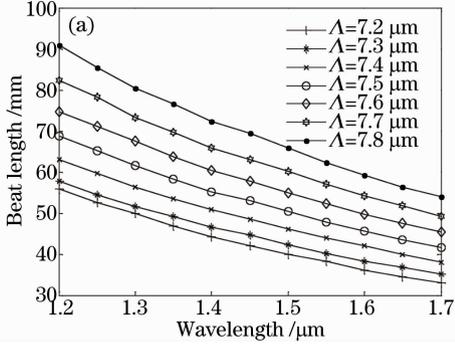


图 4 Λ 取不同值时的(a)偏振拍长及其(b)相对变化率 R

Fig. 4 (a) Beat length and (b) its R versus wavelength with different Λ

经过初步优化以后, 对于图 1 所示的原型光纤, 其结构参数为: $D=4.1\ \mu\text{m}$, $d=2.2\ \mu\text{m}$, $\Lambda=7.3\ \mu\text{m}$ 。

3.4 利用横向形变优化偏振拍长的稳定性

为了更好地优化偏振拍长的宽带稳定性, 通过垂直于两个芯边特殊空气孔连线的方向进行横向伸缩形变, 如图 5 所示。

图 5 中 D_x 和 D_y , d_x 和 d_y 分别为芯边特殊空气孔、本底空气孔在 X 和 Y 方向上的轴长, Λ_x 和 Λ_y 分别为 X 和 Y 轴上的空气孔间距。在没有横向伸缩形变时, $D_x = D_y = D$, $d_x = d_y = d$, $\Lambda_x = \Lambda_y = \Lambda$, 横向伸缩形变后, 包层中存在三种类型的非对称性结构: 非圆微孔 ($d_x \neq d_y$, $D_x \neq D_y$), 纤芯附近一对非圆大微孔 ($d_x \neq D_x$, $d_y \neq D_y$), 晶格常数的横(纵)向压缩 ($\Lambda_x \neq \Lambda_y$)。

Λ/k 。 $k > 1$ 代表沿 Y 方向压缩、X 方向伸展; $k < 1$ 代表沿 Y 方向伸展、X 方向压缩。

在横向形变前, $D > d$ 产生的双折射是正值, 横向形变后, $d_x > d_y$ 产生负值双折射, $\Lambda_x > \Lambda_y$ 也产生负值双折射, 均可抑制原有的正值双折射, 所以应该选择 X 方向拉伸、Y 方向压缩的方法, 即增大伸缩因子 k 以抑制原有双折射的非线性变化。只要伸缩因子的大小合适, 就可以很好地抑制原有正值双折射的非线性变化, 扩大双折射的线性变化区域, 从而降低偏振拍长的波长敏感性。

以 0.01 为步长, 伸缩因子 k 由 1.06 逐渐增大至 1.13, 计算波长 $1.2\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 范围内不同 k 值的偏振拍长 L 及其相对变化率 R , 结果如图 6 所示。

由图 6 可见, 在 $k=1.10$ 和 1.11 时偏振拍长色散曲线已经较为平坦, 偏振拍长的相对变化率分别为 7.7% 和 4.9%, 因此可以确定最优的伸缩因子 k 为 1.11。

根据初步优化得出的多孔光纤几何参数 $D=4.1\ \mu\text{m}$, $d=2.2\ \mu\text{m}$, $\Lambda=7.3\ \mu\text{m}$, 和伸缩因子 $k=1.11$, 可以得出经横向形变优化后的结构参数为 $D_x = kD = 4.55\ \mu\text{m}$, $D_y = D/k = 3.69\ \mu\text{m}$, $d_x = kd = 2.44\ \mu\text{m}$, $d_y = d/k = 1.98\ \mu\text{m}$, $\Lambda_x = k\Lambda = 8.10\ \mu\text{m}$, $\Lambda_y = \Lambda/k = 6.58\ \mu\text{m}$ 。优化后的菱形晶格多孔光纤在 $1.2\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波长范围内的偏振拍长相对变化率满足消色差波片的相位延迟精度要求 ($\leq \pm 4\%$), 工作带宽同时覆盖了 1310 nm 和 1550 nm 两个波长窗口, 偏振拍长的中值为 132.5 mm, 其大小也适合于加工制作零级消色差 $\lambda/4$ 光纤波片。

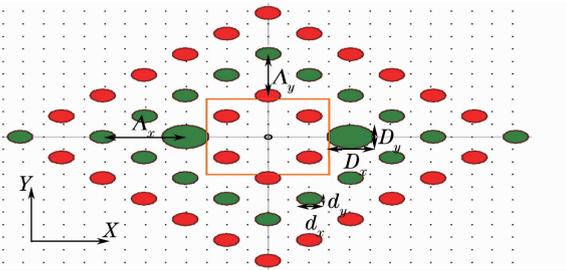


图 5 横向伸缩形变后的菱形晶格多孔光纤

Fig. 5 Lateral deformation holey fiber with diamond lattice

采用面积守恒原则来确定横向伸缩形变后的光纤结构尺寸, 将横向伸缩形变产生的三种非对称性采用统一的伸缩因子 k 来加以约束限制, 令 $k^2 = d_x/d_y = D_x/D_y = \Lambda_x/\Lambda_y$, 由面积守恒可得到 $d_x = kd$, $d_y = d/k$, $D_x = kD$, $D_y = D/k$, $\Lambda_x = k\Lambda$, $\Lambda_y =$

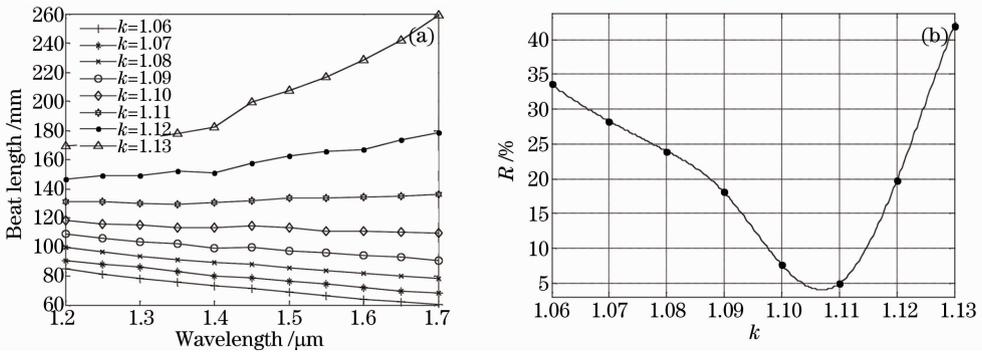


图 6 k 由 1.06 增大至 1.13 的 (a) 偏振拍长及其 (b) 相对变化率 R

Fig. 6 (a) Beat length and (b) its R versus different k from 1.06 to 1.13

4 误差容限分析

如能严格按照上述包层结构的优化参数控制多孔光纤, 相应的零级消逝差 $\lambda/4$ 波片的工作带宽可以达到 500 nm。目前多孔光纤的拉丝工艺对于包层空气孔几何参数的控制精度约为 $0.1 \mu\text{m}$ 量级, 所以必须考虑工艺误差对工作带宽的影响。假定在误差容限分析过程中, 仅有一个结构参数发生微扰, 其他结构参数的优化值保持不变。在波长 $1.2 \sim$

$1.7 \mu\text{m}$ 范围内, 包层结构参数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, 以消逝差 $\lambda/4$ 波片延迟误差小于 $\pm 4\%$ 为限, 不同误差条件下的偏振拍长相对变化率如图 7 所示。

通过误差容限的计算分析发现, 纤芯附近大孔和本底空气孔都有较大的误差容限, 其中纤芯附近特殊空气孔 X 和 Y 方向轴长的误差容限分别为 4% 、 21% , 本底空气孔 X 和 Y 方向轴长的误差容限

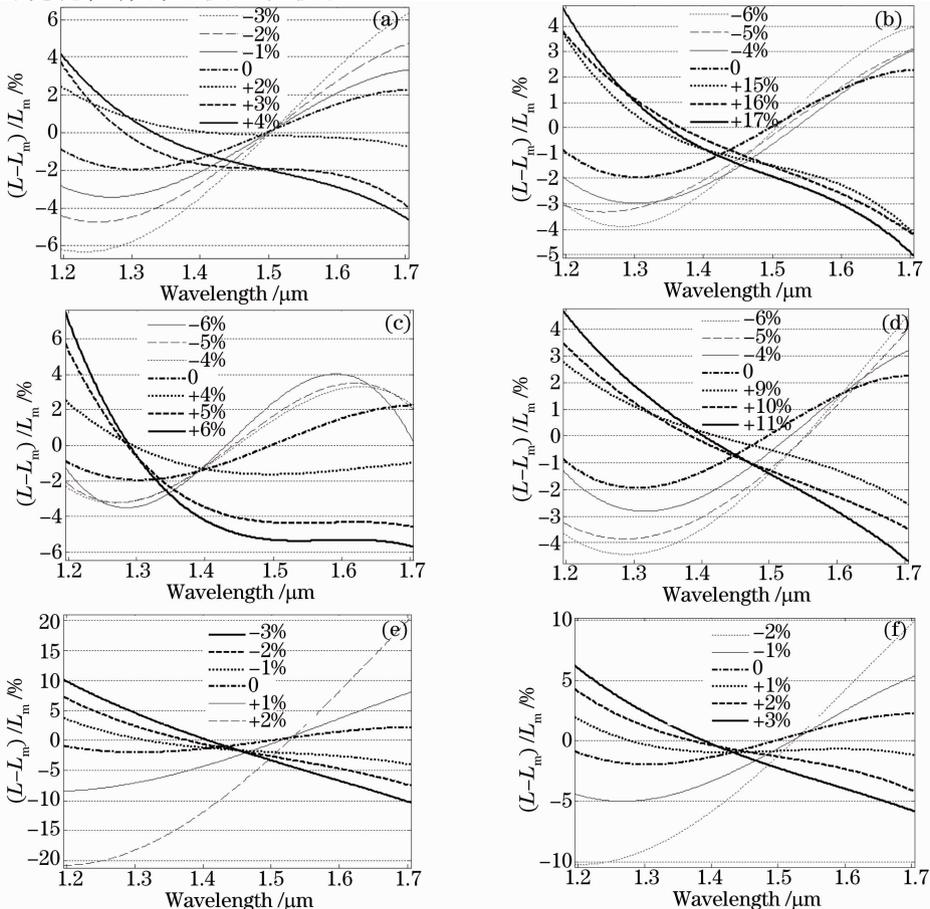


图 7 (a) D_x , (b) D_y , (c) d_x , (d) d_y , (e) Λ_x and (f) Λ_y 不同误差条件下的偏振拍长相对变化率

Fig. 7 Relative change rate of beat length with deviation of (a) D_x , (b) D_y , (c) d_x , (d) d_y , (e) Λ_x and (f) Λ_y

分别为 9%、15%，而 X、Y 轴上孔间距的误差容限相对较小，分别为 1.3%、2.4%。对比包层结构的优化值可知，纤芯附近大孔、本底空气孔和孔间距的误差容限分别为 0.18、0.77、0.21、0.29、0.10、0.15 μm ，均大于或等于 0.1 μm 。

5 结 论

在优化前，包层中仅存在一种类型的非对称性结构；纤芯两侧一对特殊空气孔直径大于本底空气孔直径，这种非对称性产生正值双折射($n_y > n_x$)，其偏振拍长对波长变化的敏感性较高，相对变化率在 50% 以上。通过调节纤芯附近空气孔的大小、本底空气孔的大小以及 X 轴和 Y 轴上的孔间距对原有双折射的非线性变化进行初步的抑制，再应用横向伸缩形变的方法，引入两种新的非对称性结构，同时调节包层横截面中的三种非对称结构，对其结构参数进行二次优化，进一步抑制双折射的非线性变化，得出了包层结构参数的优化值。计算分析表明，优化后该多孔光纤在波长 1.2~1.7 μm 范围内具有相对稳定的偏振拍长，相对变化率小于 $\pm 4\%$ ，满足消色差波片的相位延迟精度要求，工作带宽达到了 500 nm。对包层结构参数优化值的误差容限进行分析的结果表明，误差容限在 0.1 μm 以上，具有一定的工艺可行性，适合于制作同时覆盖波长 1310 nm 和 1550 nm 通信窗口的超宽带 $\lambda/4$ 光纤波片。

参 考 文 献

- 1 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Real-time polarization control algorithm under non-ideal situation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090604.
张启业, 朱 勇, 苏 洋, 等. 非理想情况下的实时偏振控制算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090604.
- 2 Sun Boshu, Huang Zihao, Wang Xiaoping, *et al.*. Intensity-modulated surface plasmon resonance array sensor based on polarization control [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312003.
孙博书, 黄子昊, 王晓萍, 等. 偏振控制光强调制型点阵 SPR 传感器研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312003.
- 3 Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensors[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 757-762.
宋牟平, 鲍 翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的布里渊光时域分析长距离分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 757-762.
- 4 Huang Zhimeng, Liu Cangli, Li Jianfeng, *et al.*. Fiber polarization control based on a fast locating algorithm[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(27): 6663-6668.
- 5 H C Lefevre. Single-mode fibre fractional wave devices and

- polarisation controllers[J]. *Electron Lett*, 1980, 16(20): 778-780.
- 6 Ma Haiqiang, Li Quanyue, Wang Long, *et al.*. A high-speed fiber polarization controller with high accuracy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 084217.
马海强, 李泉跃, 汪 龙, 等. 一种高速率、高精度的全光纤偏振控制方法[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 084217.
- 7 Zhang Qiye, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Research on the polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0506001.
张启业, 朱 勇, 苏 洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0506001.
- 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 Wang Xiaozhen, Dong Xiaopeng, Xie Zuosheng. Measurement and analysis of the birefringence of photonic crystal fiber with wavelength scanning method[J]. *Opt Quant Electron*, 2007, 39(12-13): 1081-1090.
- 10 Shi Zhidong, Ji Mingning, Lin Jianqiang, *et al.*. Quarter wave plate made by cutting straight holey 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]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(s1): 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(s1): 125-127.
- 12 Dong Xiaopeng, Hao Jiajian, Su Juan, *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 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.
- 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 Lin Jianqiang, Shi Zhidong, Li Mingjia, *et al.*. Structural design for birefringent holey fiber with a beat length insensitive to wavelength[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(25): F55-F60.
- 17 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.

栏目编辑: 李志兰