

# 具有宽带稳定偏振拍长的双折射多孔光纤

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** 为降低偏振拍长对波长变化的敏感性, 扩大多孔光纤偏振器件的工作带宽, 针对一种包层空气孔呈圆形阵列分布的多孔光纤, 应用全矢量有限差分光束传播法分析了不同参数的包层结构对偏振拍长及其相对变化率的影响, 通过横向伸缩形变在包层中引入特定的非对称结构, 这种方法不仅有效降低了偏振拍长的波长敏感性, 而且偏振拍长对这些特定包层结构参数的误差微扰不敏感, 在 1.2~1.7  $\mu\text{m}$  波长范围内, 偏振拍长的相对变化率小于  $\pm 4\%$ , 工作带宽达到 500 nm, 同时包层结构几何参数的误差容忍度达到 0.1  $\mu\text{m}$  量级, 较好地兼顾了偏振拍长的宽带稳定性与多孔光纤工艺制作可行性。

**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/LOP51.060606

## A Birefringent Holey Fiber with a Stable Broadband Polarization Beat-Length

Lin Jianqiang

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

**Abstract** In order to reduce the sensitivity of the polarization beat length with wavelength and expand the operating bandwidth of the polarization device made by the holey fiber, 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 are analyzed. The preliminary optimal cladding structure parameters are obtained. The polarization beat length remains stable in a wide wavelength range. The results show that the relative variation of polarization beat length is less than  $\pm 4\%$  in wavelength range of 1.2~1.7  $\mu\text{m}$  and the operating bandwidth can reach 500 nm while the error tolerance of optimized geometric parameters is greater than 0.1  $\mu\text{m}$ . 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

在光纤通信和光纤传感系统中, 如光纤激光器、光纤环镜、单模光纤传感器等, 常常需要对传输光的偏振态加以控制<sup>[1-4]</sup>。在新兴的量子通信领域里, 量子密钥分发系统也需要通过偏振控制降低误码率。波片是实现偏振控制算法的重要器件, 常见的应力型光纤波片一般由单模光纤制作而成, 通过把光纤绕成环状、或通过光纤纵向扭转、或利用侧向挤压光纤来产生应力双折射<sup>[5-7]</sup>。上述光纤波片的优点是可以实现在线式调节光纤链路中的偏振态, 损耗很低, 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。“熊猫”、“领结”

收稿日期: 2013-11-08; 收到修改稿日期: 2014-01-17; 网络出版日期: 2014-05-20

基金项目: 广西高校科研项目(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

或椭圆芯等传统双折射光纤也可用于制作光纤波片。但是一般而言,这些传统双折射光纤的双折射值都比较小,而且不易调节,所以用来制作光纤波片也有很多局限性。

多孔光纤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,用多孔光纤来制作波片可以获得较好的温度稳定性<sup>[8-9]</sup>。但是多孔光纤的偏振拍长通常对于波长的变化比较敏感,这使得多孔光纤波片的工作带宽较窄。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,因此降低偏振拍长的波长敏感性是一件复杂的工作。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,目前优化后的多孔光纤偏振拍长的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<sup>[10-17]</sup>。但是上述文献在解决波长敏感性问题的时候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 0.1% 或更小,目前的多孔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,因此利用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,从而获得较大的误差容限。本文通过对一种气孔分布呈圆形晶格阵列分布的多孔光纤进行优化设计,即通过对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引入新的非对称性结构,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  $\lambda/4$  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,为实际拉制具有宽带稳定偏振拍长的多孔光纤提供了可行的技术参数。

## 2 包层结构与思路

偏振拍长  $L$  与模式双折射  $B$  满足关系式

$$L = \lambda / |B|, \quad (1)$$

$$B = n_y - n_x, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为自由空间中光的波长,  $n_x$  和  $n_y$  分别为两个正交偏振模  $HE_{11}^x$  和  $HE_{11}^y$  的有效折射率。多孔光纤的双折射  $B$  一般随波长  $\lambda$  呈非线性指数变化,故偏振拍长  $L$  对于波长  $\lambda$  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:

$$R = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_m} \times 100\%, \quad (3)$$

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。 $R$  的大小反映了偏振拍长的波长敏感性,对于块状晶体光学消色差  $\lambda/4$  波片来说,其相位延迟精度一般为  $\pm\lambda/100$ ,即工作带宽内  $R$  不超过  $\pm 4\%$  (或  $8\%$ ),本文以此为参考,宽带光纤波片的  $R$  也应该不超过  $\pm 4\%$  (或  $8\%$ )。另外,为便于切割加工制作偏振器件,必须考虑多孔光纤拍长值的大小,例如制作宽带  $\lambda/4$  光纤波片,拍长值最

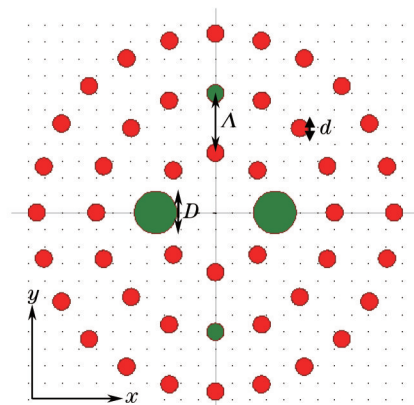


图1 圆形晶格多孔光纤横截面示意图

Fig.1 Cross section of holey fiber with round lattice

好选择在 40~160 mm 之间。

在图 1 中多孔光纤的包层空气孔呈圆形阵列分布, 纤芯附近两个对称的特殊空气孔直径为  $D$ , 本底空气孔直径为  $d$ ,  $X$  和  $Y$  轴上孔间距为  $\Lambda$ 。设光纤包层初始几何参数为:  $D=5.0 \mu\text{m}$ ,  $d=2.0 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$ 。

应用全矢量有限差分光束传播法分别计算两个正交偏振模的有效折射率  $n_x$  和  $n_y$ , 根据(1)~(3)式分析偏振拍长对于波长变化的敏感性。计算中, 光纤横向( $x$ - $y$  方向)采用中心差分格式离散, 计算窗口  $x$  方向为  $(-24 \mu\text{m}, 24 \mu\text{m})$ ,  $y$  方向为  $(-24 \mu\text{m}, 24 \mu\text{m})$ , 横向网格间距  $\Delta x$  和  $\Delta y$  为  $0.02 \mu\text{m}$ , 光纤纵向( $z$  方向)采用交替隐式差分格式计算, 空间步长  $\Delta z$  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  $7.0 \mu\text{m}$ , 边界条件采用透明边界条件。

### 3 优化过程

#### 3.1 纤芯附近空气孔的优化

多孔光纤包层结构几何参数可调节的自由度很大, 这其中就包括不同几何参数的调节顺序。就偏振拍长宽带稳定性的优化问题而言, 一般需要对多个几何参数进行综合调节, 这些几何参数往往是相互关联的, 采用不同的优化顺序, 将会得出不同的优化结构。本文优化纤芯附近一对特殊空气孔, 分别计算  $D=4.2 \mu\text{m}$ ,  $4.4 \mu\text{m}$ ,  $4.6 \mu\text{m}$ ,  $4.8 \mu\text{m}$ ,  $5.0 \mu\text{m}$  时的偏振拍长  $L$  及其相对变化率  $R$ , 如图 2 所示。

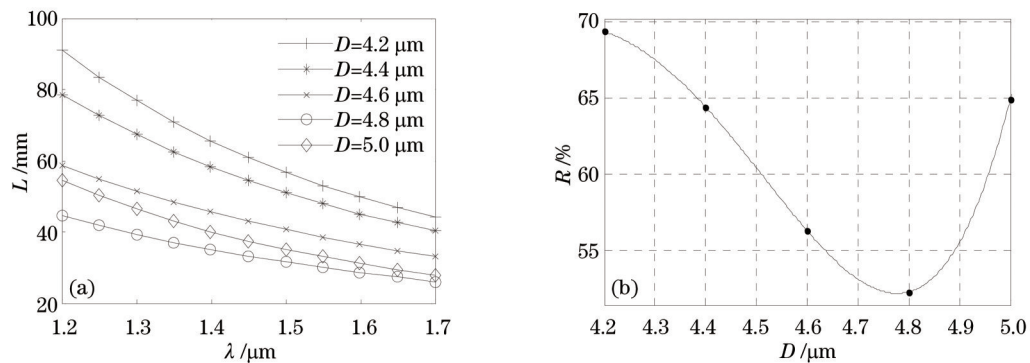


图 2 不同  $D$  值的偏振拍长  $L$  及其相对变化率  $R$

Fig.2 Beat length and its relative change rate  $R$  with different  $D$

计算结果表明, 纤芯附近大孔为  $4.8 \mu\text{m}$  时, 偏振拍长的相对变化率最小, 大小为 52.3%。参考块状晶体光学消色差  $\lambda/4$  波片的相位延迟精度, 偏振拍长的相对变化率不应超过  $\pm 4\%$  (或  $8\%$ )。显然这时偏振拍长的相对变化率还很大, 还需要进一步优化。

#### 3.2 本底空气孔的优化

取纤芯附近特殊空气孔的直径  $D=4.8 \mu\text{m}$ ,  $x$  和  $y$  轴上的孔间距  $\Lambda=7.0 \mu\text{m}$ , 分别计算本底空气孔大小  $d=1.7 \mu\text{m}$ ,  $1.8 \mu\text{m}$ ,  $1.9 \mu\text{m}$ ,  $2.0 \mu\text{m}$ ,  $2.1 \mu\text{m}$  和  $2.2 \mu\text{m}$  时的偏振拍长  $L$  及其相对变化率  $R$ , 结果如图 3 所示。计算结果表明, 本底空气孔直径为  $1.7 \mu\text{m}$  时, 偏振拍长的相对变化率最小。对于  $d < 1.7 \mu\text{m}$  的情形, 随着气孔直

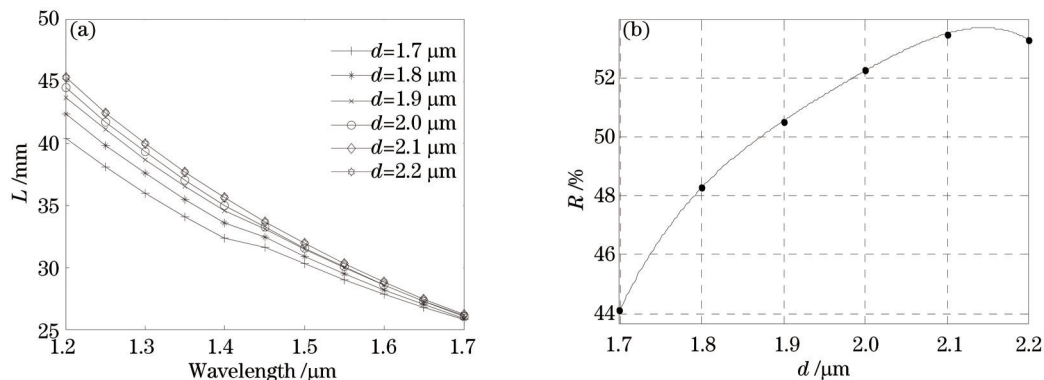


图 3 不同本底空气孔直径  $d$  的偏振拍长及其相对变化率

Fig.3 Beat length and its  $R$  with different  $d$

径变小,难以将传输光束束缚在纤芯中传输,因此不再计算分析  $d < 1.7 \mu\text{m}$  的情形。

### 3.3 $x$ 和 $y$ 轴上孔间距的优化

取纤芯附近的空气孔的直径  $D = 4.8 \mu\text{m}$ , 本底空气孔大小  $d = 1.7 \mu\text{m}$ , 分别计算  $x$  轴和  $y$  轴上的孔间距  $\Lambda = 6.6 \mu\text{m}$ 、 $6.8 \mu\text{m}$ 、 $7.0 \mu\text{m}$ 、 $7.2 \mu\text{m}$ 、 $7.4 \mu\text{m}$  时的偏振拍长  $L$  及其相对变化率  $R$ , 结果如图 4 所示。计算结果表明,  $x$  轴和  $y$  轴上的孔间距  $\Lambda$  为  $7.2 \mu\text{m}$  时, 偏振拍长的相对变化率最小, 相对变化率为  $43.5\%$ 。

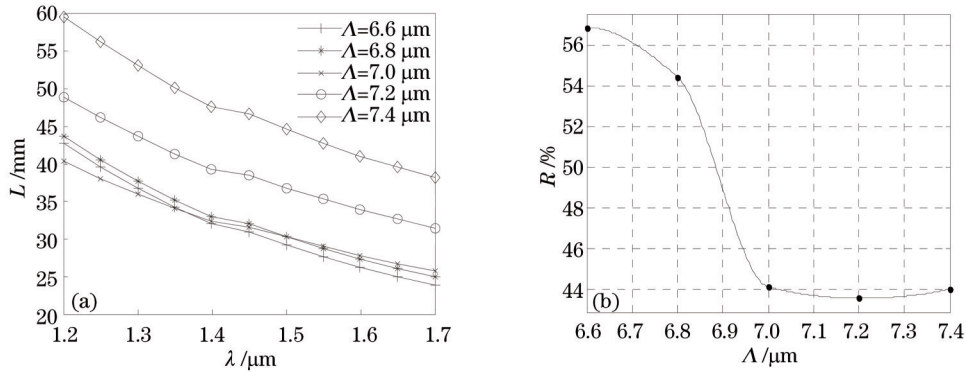


图4 不同  $\Lambda$  的偏振拍长及其相对变化率

Fig.4 Beat length and its  $R$  with different  $\Lambda$

### 3.4 利用横向形变优化偏振拍长的稳定性

经过上述初步优化, 横向形变前圆型多孔光纤横截面的初始几何参数为  $D = 4.8 \mu\text{m}$ ,  $d = 1.7 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 7.2 \mu\text{m}$ ,  $k = 1.0$  ( $k$  为伸缩因子)。

横向形变后整个多孔光纤的横截面变为椭圆形, 如图 5 所示。设横向形变后  $D_x$  和  $D_y$  分别为纤芯附近两个对称空气孔在  $x$  和  $y$  方向上的轴长,  $d_x$  和  $d_y$  分别为本底空气孔在  $x$  和  $y$  方向上的轴长,  $\Lambda_x$  和  $\Lambda_y$  分别为  $x$  和  $y$  轴上的晶格间距, 横向伸缩形变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  $D_x = kD$ ,  $D_y = D/k$ ,  $d_x = kd$ ,  $d_y = d/k$ ,  $\Lambda_x = k\Lambda$ ,  $\Lambda_y = \Lambda/k$ 。当  $k > 1$  时, 表示沿  $x$  方向伸展和  $y$  方向压缩; 当  $k < 1$  时, 表示沿  $x$  方向压缩和  $y$  方向伸展。在没有横向伸缩形变时, 包层中仅存在一种类型的非对称性结构: 纤芯附近一对大圆孔; 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、纤芯附近一对非圆大微孔和晶格常数的横(纵)向压缩。

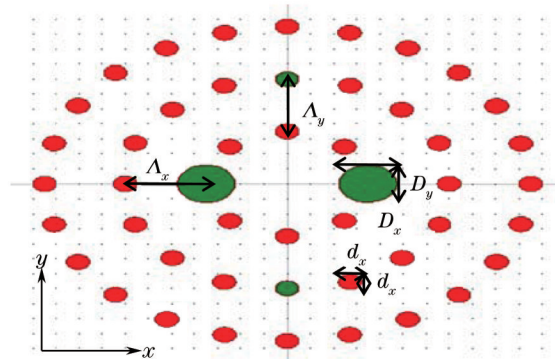


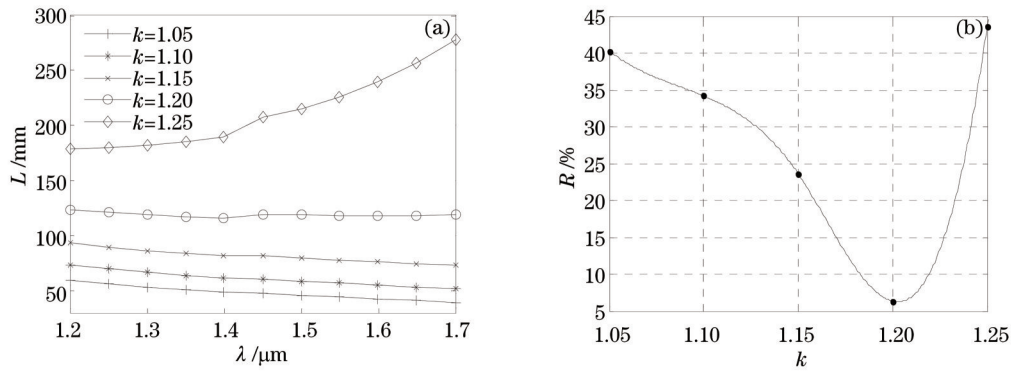
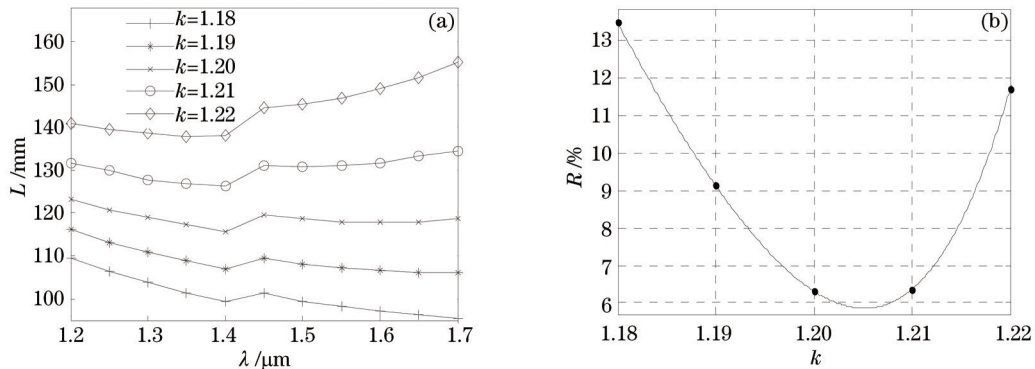
图5 圆形晶格多孔光纤的横向形变

Fig.5 Lateral deformation in the holey fiber with round lattice

在  $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$  波长范围内,  $k$  以  $0.05$  为步长从  $1.05$  依次变化到  $1.25$ , 相应的偏振拍长  $L$  及其相对变化率  $R$  如图 6 所示。计算结果表明,  $k = 1.20$  时偏振拍长色散曲线已经比较平坦, 对应的偏振拍长相对变化率为  $6.3\%$ 。

$k = 1.18$  和  $k = 1.22$  之间的偏振拍长及其相对变化率如图 7 所示。计算结果表明, 在  $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$  波长范围内,  $k = 1.20$  和  $1.21$  的偏振拍长色散曲线已经比较平坦, 对应的偏振拍长相对变化率分别为  $6.3\%$  和  $6.4\%$ 。



图6  $k=1.05$ 到 $k=1.25$ 的偏振拍长及其相对变化率Fig.6 Beat length and its  $R$  with different  $k$  from 1.05 to 1.25图7  $k=1.18$ 到 $k=1.22$ 的偏振拍长及其相对变化率Fig.7 Beat length and its  $R$  with different  $k$  from 1.18 to 1.22

这样,原型多孔光纤经过优化以后,包层结构的最佳参数为:进行横向伸缩形变之前的几何尺寸  $D=4.8\ \mu\text{m}$ ,  $d=1.7\ \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=7.2\ \mu\text{m}$ ,横向伸缩因子取  $k=1.20$ ,这种优化过的圆形晶格多孔光纤在  $1.2\sim 1.7\ \mu\text{m}$  波长范围内有较好的偏振拍长稳定性。消色差波片对于延迟精度的要求是在工作波段内偏振拍长相对变化率小于  $\pm 4\%$ ,所以这种优化过的圆形晶格多孔光纤已经达到消色差波片对于相位延迟精度的要求,拍长的大小也处于适合加工的范围。

#### 4 误差容限分析

上述圆形晶格多孔光纤包层结构经过横向伸缩形变之后的最佳几何尺寸为:  $D_x = kD = 1.2 \times 4.8\ \mu\text{m} = 5.76\ \mu\text{m}$ ,  $D_y = D/k = 4.8/1.2\ \mu\text{m} = 4.00\ \mu\text{m}$ ,  $d_x = kd = 1.2 \times 1.7\ \mu\text{m} = 2.04\ \mu\text{m}$ ,  $d_y = d/k = 1.7/1.2\ \mu\text{m} = 1.42\ \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_y = k\Lambda = 1.2 \times 7.2\ \mu\text{m} = 8.64\ \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_x = \Lambda/k = 7.2/1.2\ \mu\text{m} = 6.00\ \mu\text{m}$ 。由于受到光纤拉制工艺的限制,实际制作的多孔光纤与设计参数之间必然存在一定的偏差,这势必影响工作波段内偏振拍长的相对变化率,因此有必要进一步分析几何参数的误差容限。在  $1.2\sim 1.7\ \mu\text{m}$  波长范围内,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。以消色差  $\lambda/4$  波片延迟误差小于  $\pm 4\%$  为限,在计算分析某个结构参数的误差过程中,假定其他参数的优化值保持不变,在不同误差条件下的偏振拍长相对变化率如图8所示。

误差容限的计算分析结果表明,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椭圆在  $x$  和  $y$  方向轴长的误差容限分别为  $-4\%\sim +2\%$ 、 $-7\%\sim +3\%$ ,本底空气椭圆在  $x$  和  $y$  方向轴长的误差容限分别为  $-4\%\sim +3\%$ 、 $-2\%\sim +1\%$ ,在  $x$  轴和  $y$  轴上孔间距的误差容限分别为  $-1\%\sim +2\%$ 、 $-4\%\sim +6\%$ 。

#### 5 结论

根据消色差波片对相位延迟精度的要求和多孔光纤的工艺制作要求,对一种包层空气孔排列呈圆形点阵分布的多孔光纤进行优化设计。通过调节本底气孔和纤芯两侧特殊气孔的大小以及  $x$  轴和  $y$  轴上的孔间距,初步抑制原有双折射的非线性变化,再应用横向伸缩形变法,引入两种新的非对称性结构进一步抑制双

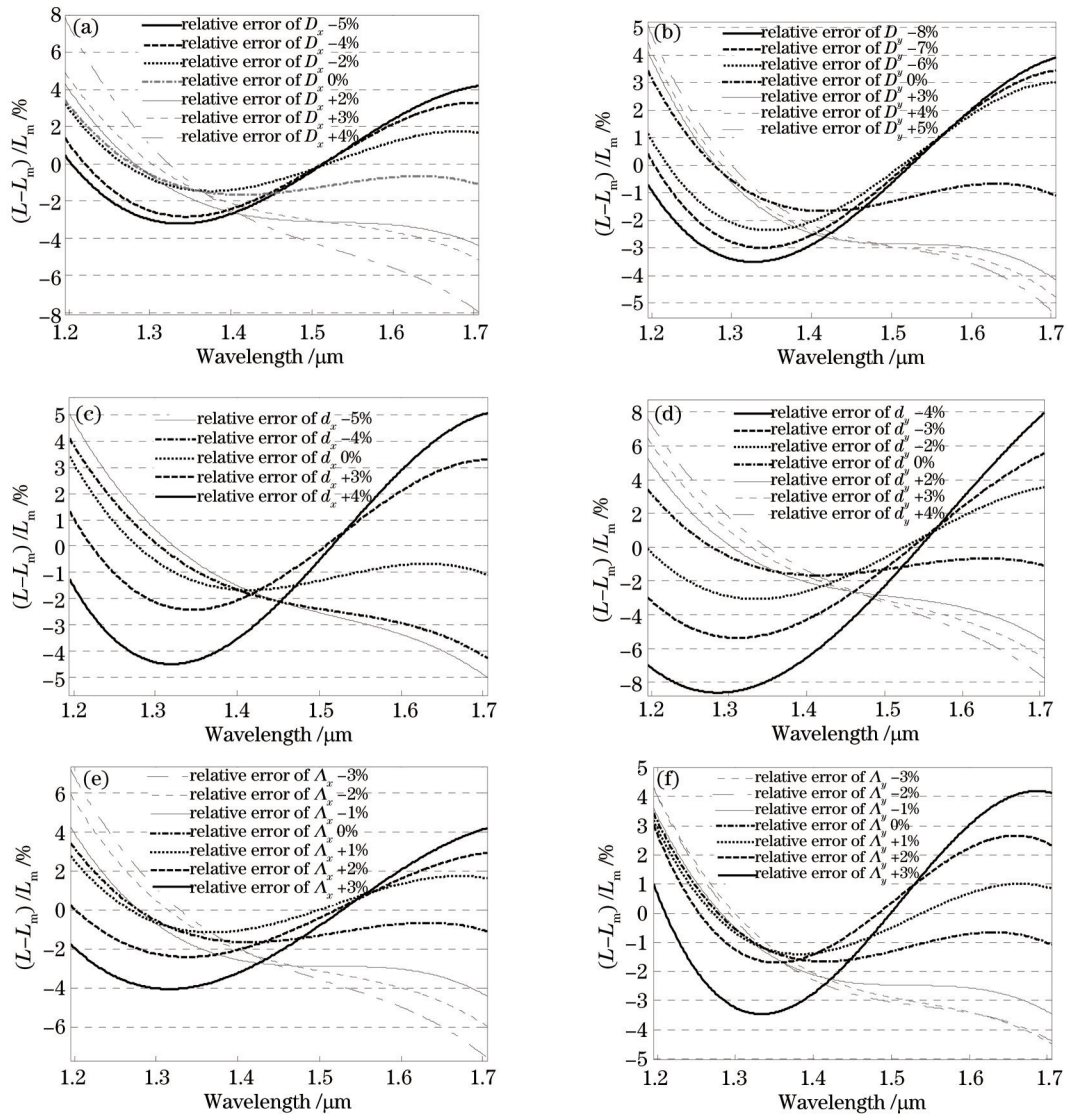


图8 不同误差条件下的偏振拍长相对变化率

Fig.8 Relative change rate of beat length with different errors

折射的非线性变化。通过改变伸缩因子的大小,同时调节包层横截面中的三种非对称结构产生的双折射,使其偏振拍长在1.2~1.7  $\mu\text{m}$  波长范围内的相对变化率能够控制在 $\pm 4\%$ 以内,很好地满足消色差波片的相位延迟精度要求。包层结构参数的优化值具有一定的误差容限,降低了工艺制作的难度,适合于制作同时覆盖1310 nm和1550 nm波长通信窗口的 $\lambda/4$ 波片。

### 参考文献

- 1 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.
- 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 Ju Haijuan, Ren Liyong, Liang Jian, *et al.*. Stability improvement of SBS slow light in optical fibers based on polarization management technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030603.  
巨海娟, 任立勇, 梁 健, 等. 基于偏振控制技术提高光纤受激布里渊散射慢光稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013,

- 50(3): 030603.
- 4 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.
- 5 Lefevre H C. 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 Rose A H, Feat N, Etzel S M. 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]. *Optical and Quantum Electronics*, 2007, 39(12-13): 1081-1090.
- 10 Shi Zhidong, Ji Minning, 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(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 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 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 Liu Zhen, Shi Zhidong, Yang Shaolin, *et al.*. Polarization-beat-length-based achromatic characteristics of holey birefringence fiber with hexagonal lattice [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100603.  
刘珍, 石志东, 杨少林, 等. 六边形晶格多孔光纤偏振拍长的消色差特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100603.
- 17 Liu Zhen, Shi Zhidong, Zhang Haiyan, *et al.*. Study on achromatic characteristics of holey birefringence fiber with round lattice [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(11): 110601.  
刘珍, 石志东, 张海燕, 等. 一种圆形晶格多孔光纤偏振拍长的消色差特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(11): 110601.