

doi:10.3788/gzxb20144303.0306003

具有宽带稳定偏振拍长的新型多孔光纤

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:为制作宽带稳定的光纤偏振控制器件,提出了一种具有宽带稳定偏振拍长的多孔光纤模型.该模型通过调节纤芯附近一对特殊气孔和本底气孔的大小、形状以及气孔的间距,在包层中引入特定非对称结构.由于多孔光纤的偏振拍长对这些特定的非对称结构参量的误差扰动不敏感,而利用这些特定非对称结构产生的具有不同变化趋势的双折射相互补偿可以抑制双折射的非线性变化,因此不仅能有效降低偏振拍长的波长敏感性,而且能够同时降低偏振拍长对包层结构参量误差的敏感性.研究结果表明:以偏振拍长的相对变化率小于 $\pm 4\%$ 为限,在 1 550 nm 波长窗口附近工作带宽达到 200 nm,同时包层结构几何参量的误差容限达到 0.1 μm 量级,为实际控制具有宽带稳定偏振拍长的多孔光纤提供了较为可行的工艺结构参量.

关键词:光纤通信; 光纤光学; 光束传播法; 多孔光纤; 模式双折射; 偏振拍长; 波长敏感性; 波片; 偏振控制

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0306003-6

A Novel Holey Birefringence Fiber with Wideband Stable Beat-length

LIN Jian-qiang^{1,2}, SHI Zhi-dong¹, LIU Zhen¹, JI Min-ning¹

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

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

Abstract: For making a polarization control device with stable wideband, a novel holey birefringence fiber with stable beatlength in broadband was proposed. Some specific asymmetrical structures were introduced into the cladding by adjusting a pair of the special holes near the core, the shape and size of holes in background and the lattice pitches. The polarization beat length is not sensitive to disturbances of these asymmetric structure parameters. The polarization beat length sensitivity to wavelength was reduced effectively, and the polarization beat length sensitivity to the errors of the cladding structures was also reduced through the mutual compensation of birefringence with different trends to suppress non-linear changes. The research results showed that the operating bandwidth was up to 200 nm near the 1 550 nm wavelength window if the relative change of polarization beat length must to be less than $\pm 4\%$, while the error tolerance of the clad structure geometry parameter was reached 0.1 μm . A more feasible process structure parameters was provided for the actual drawing the holey fiber with broadband stable polarization beat length.

Key words: Fiber communication; Fiber optics; Beam propagation method; Holey fiber; Modal birefringence; Polarization beat length; Wavelength sensitivity; Wave plate; Polarization control

OCIS Codes: 060.2330; 060.2310; 060.4005; 060.5295; 260.5430

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 11074164, 61107075)、上海市重点学科和科委重点实验室项目(Nos. S30108, 08DZ2231100)、广西教育厅科研项目(No. 201203YB126)和广西科技大学博士基金项目(校科博 13207)资助

第一作者:林建强(1964—),男,副教授,博士,主要研究方向为微结构光纤波导器件的优化设计. Email: linwork@163.com

通讯作者:石志东(1964—),男,研究员,博士,主要研究方向为微结构光纤传输特性. Email: zdshi@shu.edu.cn

收稿日期:2013-07-18; **录用日期:**2013-10-12

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在包含偏振态敏感器件的光纤通信和传感系统中,必须控制传输光的偏振态^[1].常见偏振控制器多由晶体型波片或光纤型波片构成.由块状晶体光学波片制作的偏振控制器技术比较成熟^[2-4],缺点是不能与传输光纤直接相连,不仅会引入较大的插入损耗,而且增加系统的体积.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.目前常见的光纤波片又可以分为圆环型和挤压型两类,圆环型光纤波片是利用绕成环状的单模光纤制作的,每个光纤环相当于一个波片^[5].挤压型光纤波片的原理则是采用横向挤压的方法解除两个正交偏振传输基模的简并性,从而产生模式双折射^[6].上述光纤波片所采用的原型光纤大多为“熊猫”、“领结”或旋转光纤等应力型双折射光纤,受残余热应力、偏振模色散等因素的影响,温度的稳定性较差、工作波长的带宽较小.

与应力型双折射光纤不同,多孔光纤的双折射是通过破坏包层中微气孔分布的几何对称性产生的,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^[7-11],若用其制作光纤波片可以获得很好的温度稳定性,但是一般来说,双折射多孔光纤的偏振拍长随波长的变化而变化,即偏振拍长的波长稳定性较差,这限制了多孔光纤波片的工作带宽,要想获得较大的工作带宽,就必须对多孔光纤的包层结构参量进行优化设计,降低其偏振拍长的波长敏感性.文献[12-16]的研究基本解决了多孔光纤偏振拍长的宽带稳定性问题,但是未考虑偏振拍长对包层结构参量扰动的敏感性问题.优化后包层结构几何参量的误差容限非常小,对于包层结构几何参量的控制准确度要求非常高,一般在 $0.001\ \mu\text{m}$ 量级,当前的拉丝工艺还无法达到这样高的控制准确度.因此,降低偏振拍长对包层结构参量的高敏感性对于多孔光纤波片的实用化具有十分重要的意义.本文通过对一种气孔分布呈六边形阵列的多孔光纤进行优化设计,在光纤包层中引入某些特定的非对称性结构,这些特定的非对称性结构所形成的偏振拍长对于包层结构参量的误差扰动不敏感,利用这些特定的非对称结构产生的具有不同变化趋势的双折射相互补偿,以抑制双折射的非线性变化,不仅能够降低偏振拍长的波长敏感性,而且能够有效提高包层结构几何参量的误差容限.

1 包层结构的模型设计

多孔光纤的偏振拍长 L 与模式双折射 B 满足关系 $L=\lambda/|B|$,其中, λ 为自由空间光波长, $B=n_y-n_x$, n_y 、 n_x 分别为两个正交偏振模的有效折射率.要降低偏

振拍长的波长敏感性,就必须设法使模式双折射 B 与波长 λ 基本同步线性变化.但是多孔光纤的双折射 B 一般随波长 λ 呈非线性指数变化,与 λ 同步线性变化的区间非常短,为扩大模式双折射随波长线性变化的波长区间,通常要在多孔光纤截面中引入多种非对称结构,利用各种非对称结构的双折射相互平衡和补偿来抑制双折射随波长的非线性变化,从而降低偏振拍长的波长敏感性.

图1所示多孔光纤仅使用石英一种材料拉制而成.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 $n_1=0.696\ 166\ 3\times\lambda^2/(\lambda^2-0.068\ 404\ 3^2)$, $n_2=0.407\ 942\ 6\times\lambda^2/(\lambda^2-0.116\ 241\ 4^2)$, $n_3=0.897\ 479\ 4\times\lambda^2/(\lambda^2-9.896\ 161^2)$,空气孔折射率设为 1.00 .包层横截面上空气孔的分布呈六边形阵列,空气孔分为两种:纤芯附近两个特殊的空气孔和本底空气孔,它们的大小和形状可以分别独立地变化.不失一般性,这两种空气孔的大小分别用 X 和 Y 方向上的轴长 D_x 和 D_y 、 d_x 和 d_y 表示,若两种空气孔为圆形时则大小分别用 D 、 d 表示,空气孔之间的距离用 Δ 表示,初始几何参量为: $D_x=D_y=D=6.0\ \mu\text{m}$, $d_x=d_y=d=4.0\ \mu\text{m}$, $\Delta=8.0\ \mu\text{m}$.

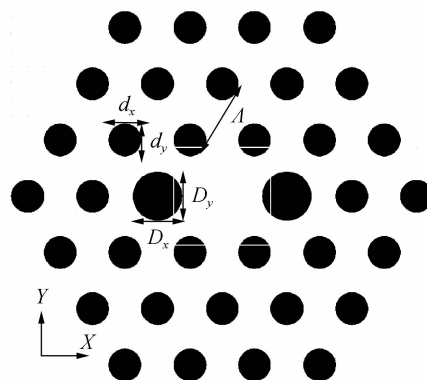


图1 六边形晶格多孔光纤横截面示意图

Fig.1 Cross section of holey fiber with hexagonal lattice

优化前,包层横截面中存在两种非对称性:一种是纤芯附近一对大边孔与本底空气孔大小不相等而形成的非对称性($d\neq D$),另外一种是非正六边形分布空气孔点阵不满足 90° 旋转对称性而形成的非对称性.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.其中,光纤横向(X - Y 方向)的计算窗口在 X 方向为 $(-32\ \mu\text{m}, 32\ \mu\text{m})$, Y 方向为 $(-28\ \mu\text{m}, 28\ \mu\text{m})$,网格间距 Δx 和 Δy 均为 $0.02\ \mu\text{m}$,在光纤的纵向(Z 方向)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择高斯型分布,等效半径取为 $6.0\ \mu\text{m}$,边界条件采用透明边界条件.波长的变化范围为 $1.2\sim 1.7\ \mu\text{m}$,偏振拍长的大

小以及波长敏感性分别用偏振拍长的中值 L_m 和偏振拍长的相对变化率 R 来描述: $L_m = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}$, $R = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_m} \times 100\%$, 其中 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。

2 纤芯附近特殊空气孔的优化

保持本底空气孔 X 和 Y 方向上的轴长 $d_x = d_y = d = 4.0 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 8.0 \mu\text{m}$ 不变, 首先考虑纤芯附近两个特殊空气孔的大小变化对偏振拍长的影响: 分别计算 $D_x = D_y = D = 2.8 \mu\text{m}$ 、 $3.2 \mu\text{m}$ 、 $3.6 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m}$ 、 $4.4 \mu\text{m}$ 、 $4.8 \mu\text{m}$ 、 $5.2 \mu\text{m}$ 、 $5.6 \mu\text{m}$ 、 $6.0 \mu\text{m}$ 时偏振拍长, 如图 2。对应的偏振拍长中值和相对变化率如表 1。为便于分析偏振拍长的变化规律, 计算偏振拍长时没有对双折射取绝对值。

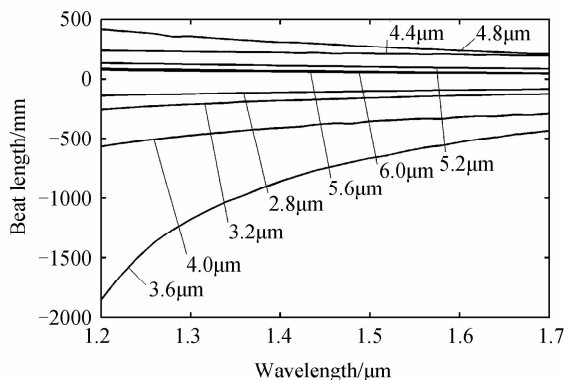


图 2 不同 D_x (D_y) 值时偏振拍长随波长变化的曲线
Fig. 2 Beat length versus wavelength with different D_x (D_y)

表 1 不同 D_x (D_y) 时的 L_m 及 R

Table 1 L_m and R with different D_x (D_y)

$D_x/\mu\text{m}$	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0
L_m/mm	109.6	189.1	1144.0	428.5	217.1	315.2	111.6	62.2	70.3
$R/\%$	52.2	70.6	124.2	65.0	18.6	66.8	44.1	47.9	56.4

为便于切割加工制作偏振器件, 必须考虑拍长值的大小, 若制作宽带 $\lambda/4$ 光纤波片, 拍长值最好选择在 $40 \sim 160 \text{ mm}$ 之间, 因此尽管 $D_x = D_y = 4.4 \mu\text{m}$ 时偏振拍长的相对变化率最小, 但拍长值大小并不合适。一般而言, 偏振拍长相对变化率 R 的大小反映了偏振拍长的波长敏感性, 应该选择 R 小的结构参量, 参考块状晶体光学消色差 $\lambda/4$ 波片的相位延迟准确度 (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%)。如果仅考虑偏振拍长相对变化率尽可能小的因素, 应选择 $D_x = D_y = 5.2 \mu\text{m}$, 但是考虑到要引入新的非对称性结构以抑制现有的双折射非线性变化, 将会使现有的双折射降低, 从而使偏振拍长增大, 因此综合来看, 应选择 $D_x = D_y = 5.6 \mu\text{m}$ 。另外, 由表 1 还可以看出, 此时偏振拍长对于包层结构参量的变化比较敏感, 如 $D_x = D_y =$ 从 $4.0 \mu\text{m}$ 变化到 $4.4 \mu\text{m}$,

偏振拍长相对变化率的变动幅度超过 200% 。

其次考虑纤芯附近两个特殊空气孔的形状变化对偏振拍长的影响: 两个大边孔的面积保持 $3.14 \times (5.6 \mu\text{m}/2)^2$ 的大小不变, 其形状的变化用 D_x 和 D_y 的比值来表示, 定义形状因子 s_D 满足 $s_D^2 = D_x/D_y$, 分别计算 $s_D = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$ 时的偏振拍长, 如图 3。偏振拍长的大小和相对变化率如表 2。结果表明, 两个大边孔形状的变化对偏振拍长的波长敏感性抑制并不明显。

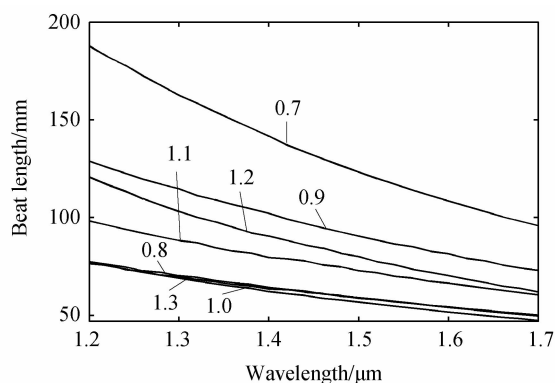


图 3 不同 s_D 的偏振拍长随波长变化曲线
Fig. 3 Beat length versus wavelength with different s_D

表 2 不同 s_D 时的 L_m 及 R

Table 2 L_m and R with different s_D

s_D	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
L_m/mm	141.7	63.8	100.9	62.2	79.3	91.4	63.1
$R/\%$	64.8	42.9	55.3	47.9	47.6	64.3	42.5

3 本底空气孔的优化

首先考察本底空气孔直径的变化对六边形晶格多孔光纤双折射和偏振拍长的影响。保持纤芯附近两个大边孔的面积 $3.14 \times (5.6 \mu\text{m}/2)^2$, 形状因子 1.3, 孔间距 $8.0 \mu\text{m}$ 不变, 考虑到工艺制作的难度和损耗, 分别计算 $d_x = d_y = d = 2.0 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 、 $2.8 \mu\text{m}$ 、 $3.2 \mu\text{m}$ 、 $3.6 \mu\text{m}$ 、 $4.0 \mu\text{m}$ 、 $4.4 \mu\text{m}$ 、 $4.8 \mu\text{m}$ 、 $5.2 \mu\text{m}$ 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。

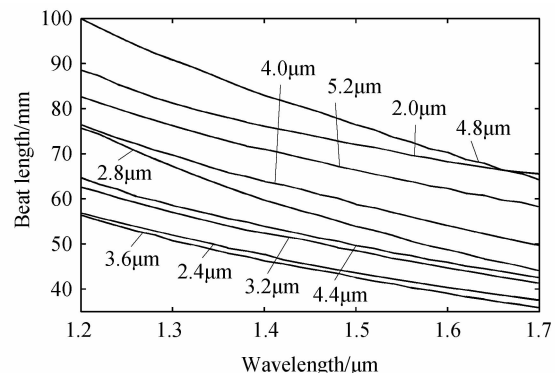


图 4 不同 d_x (d_y) 值时偏振拍长随波长变化曲线
Fig. 4 Beat length versus wavelength with different d_x (d_y)

表3 不同 $d_x(d_y)$ 时的 L_m 及 R
Table 3 L_m and R with different $d_x(d_y)$

$d/\mu\text{m}$	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2
L_m/mm	77.0	47.2	59.9	51.9	46.1	63.1	53.6	82.1	70.4
$R/(\%)$	29.8	40.9	52.8	40.9	44.4	42.5	41.3	43.6	34.7

综合考虑偏振拍长的中值和相对变化率两方面的结果,选择 $d_x = d_y = 2.0 \mu\text{m}$,此时偏振拍长在 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内的相对变化率已经下降到 30% 以下。

其次考察本底空气孔形状的变化对偏振拍长的影响。保持纤芯附近两个特殊空气孔的面积 $3.14 \times (5.6/2 \mu\text{m})^2$,形状因子 1.3,本底空气孔的面积 $3.14 \times (2.0/2 \mu\text{m})^2$,孔间距 $8.0 \mu\text{m}$ 不变,本底空气孔形状的变化同样用形状因子 s_d 来表示,令 $s_d^2 = d_x/d_y$,分别计算 $s_d = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$ 时的偏振拍长,如图 5 所示。相应偏振拍长的大小和相对变化率如表 4 所示。

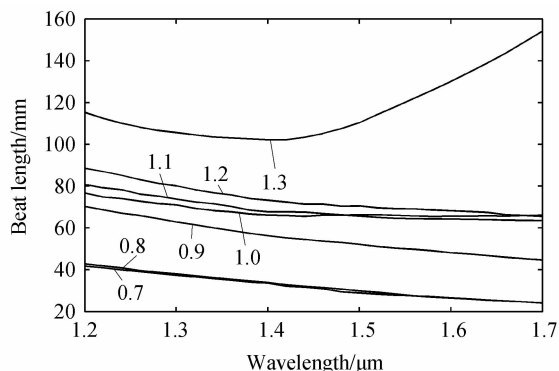


图5 不同 s_d 的偏振拍长随波长变化的曲线

Fig. 5 Beat length versus wavelength with different s_d

表4 不同 s_d 时的 L_m 及 R

Table 4 L_m and R with different s_d

s_d	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
L_m/mm	33.4	32.9	57.5	77.0	72.2	71.1	128.2
$R/(\%)$	55.7	53.1	44.8	29.8	24.0	15.7	40.5

综合考虑偏振拍长的大小和相对变化率两方面的结果,对于本底空气孔的形状,选择 $s_d = 1.2$ 是合适的,偏振拍长的波长敏感性得到了进一步的抑制。

4 空气孔间距的优化

保持纤芯附近两个大边孔的面积 $3.14 \times (5.6/2 \mu\text{m})^2$,形状因子 1.3,本底空气孔大小 $3.14 \times (2.0 \mu\text{m}/2)^2$,形状因子 1.2 不变,计算孔间距 $\Lambda = 7.8 \mu\text{m}, 7.9 \mu\text{m}, 8.0 \mu\text{m}, 8.1 \mu\text{m}$ 和 $8.2 \mu\text{m}$ 时的偏振拍长,如图 6。在 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 和 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内偏振拍长的相对变化率如表 5。结果表明,孔间距 Λ 的变化对偏振拍长的影响主要表现在偏振拍长的中值随孔间距 Λ 增大而增大,但是对于偏振拍长相对变化率的影响并不明显。通过对上述截面几何参数的优化,偏振拍长的相

对变化率在 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内从 50% 左右下降到 15% 左右,而在 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内,偏振拍长的相对变化率均在 5% 以下,已经达到消色差波片对于相位延迟准确度的要求,拍长的大小也适合加工零级消色差 $\lambda/4$ 光纤波片, $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段的中心恰为 $1.55 \mu\text{m}$ 通信窗口。更为重要的是,由表 5 可以看出,此时偏振拍长的相对变化率对于包层结构参量误差微扰的敏感性已被有效降低。

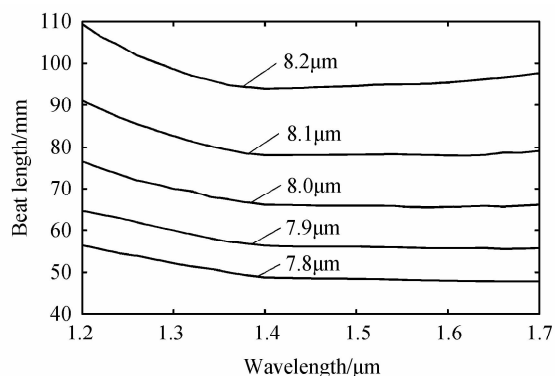


图6 不同 Δ 的偏振拍长随波长变化的曲线

Fig. 6 Beat length versus wavelength with different Δ

表5 不同 Δ 时的 R

Table 5 R with different Δ

s_D	s_d	$\Lambda/\mu\text{m}$	$R(1.2 \sim 1.7 \mu\text{m})$	$R(1.4 \sim 1.7 \mu\text{m})$
		7.8	16.2%	4.8%
		7.9	15.3%	4.9%
1.3	1.2	8.0	15.7%	4.3%
		8.1	15.5%	3.2%
		8.2	15.1%	3.8%

5 误差容限分析

经过优化以后,包层结构的几何参量为:纤芯附近大孔的面积等于 $3.14 \times (5.6 \mu\text{m}/2)^2$ 、形状因子等于 1.3、本底空气孔的面积等于 $3.14 \times (2.0 \mu\text{m}/2)^2$ 、形状因子等于 1.2、孔间距等于 $8.1 \mu\text{m}$,如能严格按照此包层结构参量控制多孔光纤,相应的零级消色差 $\lambda/4$ 波片的工作带宽可以达到 300 nm。考虑到目前多孔光纤的拉丝工艺对于包层空气孔几何参量的控制准确度约为 $0.1 \mu\text{m}$ 量级,所以必须分析工艺误差对工作带宽的影响。以偏振拍长的相对变化率小于 $\pm 4\%$ 为限,分别计算空气孔大小和孔间距的误差容限以及相应的零级消色差 $\lambda/4$ 波片的工作带宽,在误差容限分析过程中,假定一个结构参量发生微扰时,其它结构参量的优化值保持不变。

在 $1.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波长范围内, D_x, s_D, d_x, s_d 和 Λ 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 7 所示。以偏振拍长随波长的相对变化率小于 $\pm 4\%$ 为限, D_x, s_D, d_x, s_d 和 Λ 的误差容限分别为 $-5\% \sim +5\%$ 、 $-4\% \sim +4\%$ 、 $-1\% \sim +3\%$ 、 $-6\% \sim +3\%$ 和 $-7\% \sim +3\%$ 。

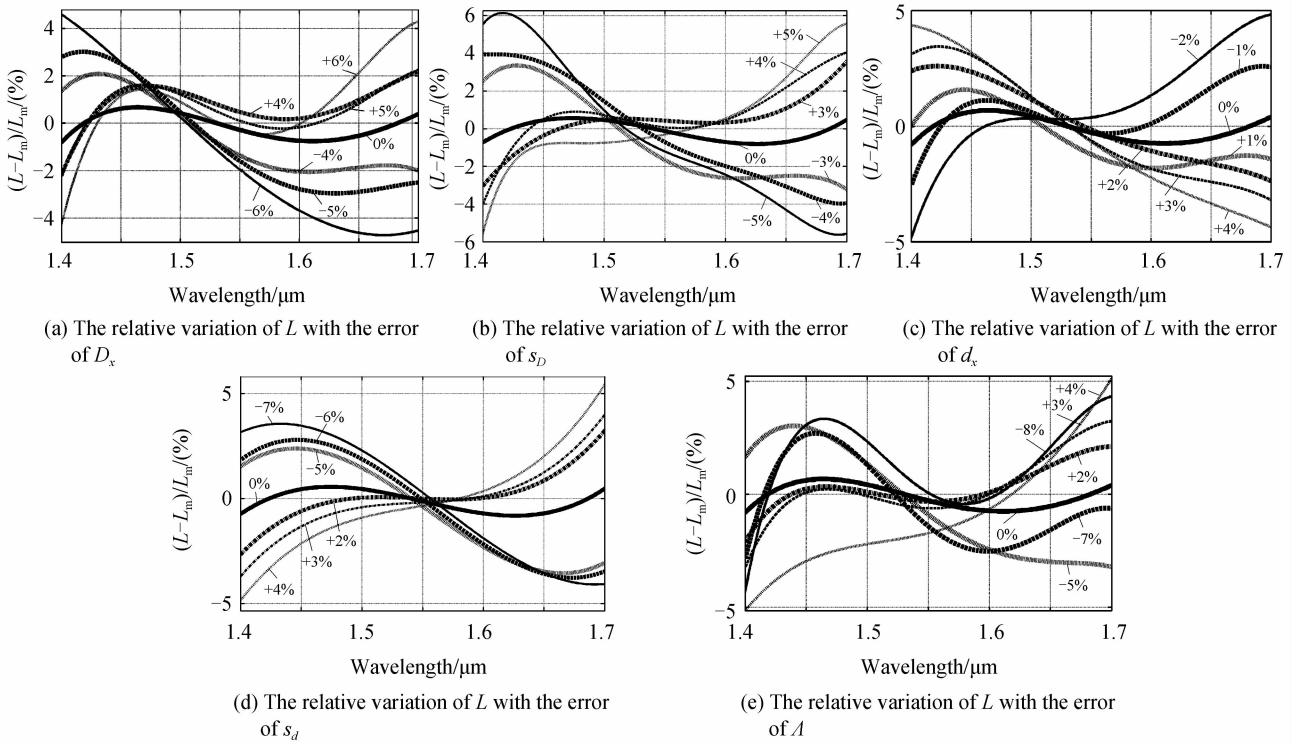


图7 结构参量存在不同误差时偏振拍长随波长的相对变化率(1.4~1.7 μm)

Fig. 7 The relative variation of beat length versus wavelength with different error rate of the structural parameters(1.4~1.7 μm)

比较而言,本底空气孔大小 d_x 的误差容限相对较小,目前的拉丝工艺要实现这样小的误差容限还有一定困难,可以通过缩小工作带宽来获得较大的误差容限.在 1.45~1.65 μm 波长范围内, D_x 、 s_D 、 d_x 、 s_d 和 Δ

存在不同误差时偏振拍长随波长的相对变化率如图 8 所示.图 8 表明, D_x (或 D_y)、 s_D 、 d_x (或 d_y)、 s_d 和 Δ 的相对误差分别在 -16%~+7%、-4%~+6%、-3%~+5%、-8%~+5%和-9%~+6%以内时,偏振拍

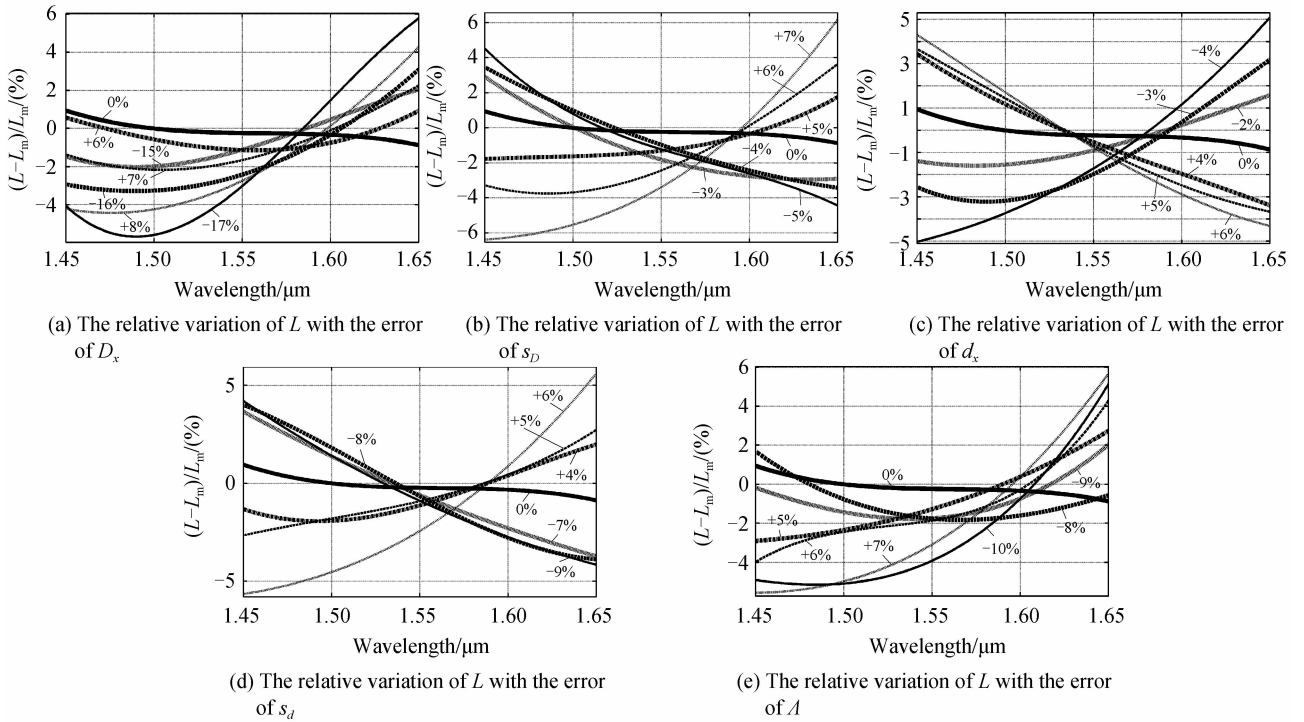


图8 结构参量存在不同误差时偏振拍长随波长的相对变化率(1.45~1.65 μm)

Fig. 8 The relative change rate of beat length versus wavelength with different error rate of the structural parameters (1.45~1.65 μm)

长随波长的相对变化率均小于 $\pm 4\%$,这些结构参量的误差容限已经与目前多孔光纤拉丝工艺的控制准确度相当,因此在 $1.45\sim 1.65\ \mu\text{m}$ 波长范围内制作上述优化设计的多孔光纤已经具备一定的工艺可行性.

6 结论

通过分别改变纤芯附近一对特殊气孔的大小和形状、本底气孔的大小和形状、气孔间距,使不同非对称性结构的双折射相互补偿和调节,抑制原有双折射的非线性变化,不仅有效降低了偏振拍长的波长敏感性,而且与以往文献相比,包层结构的误差容限提高了2个数量级.计算分析表明,以偏振拍长的相对变化率小于 $\pm 4\%$ 为限,在 $1.45\sim 1.65\ \mu\text{m}$ 波长范围内,纤芯附近特殊气孔的大小和形状因子、本底气孔的大小和形状因子以及孔间距的误差容限分别达到了 $-16\%\sim +7\%$ 、 $-4\%\sim +6\%$ 、 $-3\%\sim +5\%$ 、 $-8\%\sim +5\%$ 和 $-9\%\sim +6\%$,该包层结构几何参量的误差容限已经与目前多孔光纤拉丝工艺的控制准确度相当,具备了一定的工艺可行性.

参考文献

- [1] LI Wei-wen, JIN Xiao-feng, ZHANG Xian-min, *et al.* Research of polarization controller based on single rotatable-variable waveplate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 114-117.
李伟文,金晓峰,章献民,等. 可变可转单波片偏振控制器研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 114-117.
- [2] LI Wei-wen, LIN Wei-peng, DONG Xiao-peng. Equivalent linearly rotating plates constructed by variable plates[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1780-1783.
李伟文,林伟鹏,董小鹏. 可变波片构造等效线性可转波片的研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1780-1783.
- [3] TIAN Feng, XI Li-xia, ZHAO Xin-yuan, *et al.* Analysis on the performance of the polarization controller controlled by DSP[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 278-282.
田凤,席丽霞,赵鑫媛,等. 基于数字信号处理器控制的偏振控制器的性能分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 278-282.
- [4] LI Xu-dong, SONG Zhe, FU Li-li, *et al.* Voltage-controlled half-wave plate based on LiNbO_3 crystal [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, **8**(1): 63-66.
李旭东,宋哲,付丽丽,等. 基于铌酸锂晶体的电控 $\lambda/2$ 波片[J]. *光学与光电技术*, 2010, **8**(1): 63-66.
- [5] MA Hai-qiang, LI Quan-yue, 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、高准确度的全光纤偏振控制方法[J]. *物理学报*, 2013, **62**(8): 084217.
- [6] ZHANG Qi-ye, 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.
- [7] ANDREW M, JOHN C, KATJA L, *et al.* Temperature independent highly birefringent photonic crystal fibre [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(21): 5160-5165.
- [8] KIM D, KANG J U. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(19): 4490-4495.
- [9] MARTYNKIEN T, SZPULAK M, URBANCZYK W. Modeling and measurement of temperature sensitivity in birefringent photonic crystal holey fibers [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(36): 7780-7788.
- [10] ROSE A H, FEAT N, ETZEL S M. Wavelength and temperature performance of polarization transforming fibers [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(34): 6897-6904.
- [11] WANG Xiao-zhen, DONG Xiao-peng, XIE Zuo-sheng. 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.
- [12] DONG Xiao-peng, XIE Zuo-sheng, WANG Xiao-zhen, *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.
- [13] YOU Bai-qiang, WANG Chao, ZHOU Jian-hua. Design of the ultra-wideband quarter-wave plate with photonic crystal fiber [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2006, **17**(suppl.): 160-162.
游佰强,王超,周建华. 光子晶体光纤宽带四分之一波片的设计 [J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(suppl): 160-162.
- [14] DONG Xiao-peng, HAO Jia-jian, 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.
- [15] SHI Zhi-dong, HE Wei, LIN Jian-qiang, *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.
- [16] LIN Jian-qiang, SHI Zhi-dong, 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.