

一种新颖的 1/4 波片制作方法

王强龙**, 胡曙光*, 王云新, 杨旭东

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

摘要 光纤 1/4 波片是光纤电流传感系统中的关键器件,为此提出并实现了一种 1/4 波片制作方法。该方法将两段长度近似相等的高双折射光纤(HBF)以轴间夹角 90° 进行熔接,然后拉伸其中一段光纤使得它们的相位差为 $\pi/2$,从而制成 1/4 波片。调节时,将正交熔接的光纤接入到 3 dB 耦合器构成高双折射光纤环镜(Hi-Bi FLP),实时检测环镜的透过率以确定相位差。推导了检测系统的透过率公式,详细分析了调节过程中透过率曲线的变化规律,并根据透过率及透过率曲线的斜率来确定相位差。搭建了调节系统,验证了该方法的可行性。该方法具有准确度高、调节方便等优点。

关键词 光纤光学; 1/4 波片; 萨尼亚克光纤环镜; 高双折射光纤; 光纤传感

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0806001

A Novel Quarter-Wave Plate Fabricating Technique

Wang Qianglong**, Hu Shuyang*, Wang Yunxin, Yang Xudong

College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124

Abstract Quarter-wave plate is a key component in fiber current sensing system. A quarter-wave plate fabricating technique is proposed and demonstrated. The two sections of high-birefringence fibers (HBF) with approximately equal length are orthogonally fused and the angle between their fast axes is 90° . Stretching one of two fibers can adjust the phase difference between the two fibers to be $\pi/2$ precisely. A high-birefringent fiber loop mirror (Hi-Bi FLM) is realized by the two fibers fused to 3 dB coupler and the phase difference is determined by real-time detection of the transmissivity of the Hi-Bi FLM. The transmissivity function of the Hi-Bi FLM is deduced and the variation of the transmissivity is analyzed in detail. The phase difference is confirmed experimentally based on the transmissivity curve and its slope. The fabricating technique which has been achieved experimentally, and has excellent features, such as high accuracy and convenient operation.

Key words fiber optics; quarter-wave plate; Sagnac fiber loop mirror; high-birefringent fiber; fiber sensor

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 120.5790; 060.2420; 060.2370

1 引言

全光纤电流传感器因其绝缘性好测量范围大、不存在磁饱和危险等优点,在近几十年间得到了极大的发展^[1-3]。在光纤电流传感系统中,光纤 1/4 波片是关键器件,用于线偏振光和圆偏振光之间的转换,使得外接电流信号转化为光波相位差,从而实现电流传感。目前,在光纤电流系统中所采用的光纤 1/4 波片主要有两种制作方法:一种是将与保偏光纤 45° 熔接的一段高双折射光纤(HBF)截取或研磨为长度为其拍长的 1/4 或 3/4 或 5/4 的光纤,得到

1/4 波片^[4-6];另一种是将椭圆芯保偏光纤和传感光纤熔接,在椭圆芯保偏光纤上距熔接点半个拍长的一段光纤进行 90° 扭转,制成 1/4 波片^[7]。前一种方案由于制作出的光纤 1/4 波片体积较小,结构较为稳定,得到了广泛的使用。但是在实际的制造过程中,采用直接截取法制作 1/4 波片,对截取精度和光纤端面要求较高,导致成品率较低;采用研磨法制作波片,需要在特种装备上进行,常用光纤端面研磨机对略长的光纤进行研磨,光纤端面平整度要求较高,制作过程中,研磨和检测需要重复操作,增大了制作难度。后一种方案中,椭圆芯光纤的扭转需要特殊

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-02-03; 录用日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(51477028)

* E-mail: hushuyang@bjut.edu.cn; ** E-mail: wangql@emails.bjut.edu.cn

夹具,且扭转之后光纤的工作状态极不稳定,因此未得到广泛应用。此外,进行波片性能检测时,对检测光路提出了更高的要求。

在萨尼亚克(Sagnac)干涉仪中接入高双折射光纤构成的高双折射光纤环境(Hi-Bi FLM),具有结构简单、稳定性好等优点,被应用于光纤传感和光纤通信等方面。光纤环境的透过率函数反映了接入其中的各元件的双折射特性(如高双折射光纤快慢轴的光程差产生的相位差)以及元件之间相对夹角等信息。因此,通过观察环境的透过率曲线可以求得接入其中的高双折射光纤产生的相位差。

精确截取定长(1/4 或 3/4 或 5/4 拍长)的高双折射光纤难度很大。为此,本文提出一种新的方法制作 1/4 波片。该方法将两段长度近似相等的高双折射光纤以 90° 夹角熔接,即两光纤快轴与快轴之间、慢轴与慢轴之间夹角均为 90°,然后拉伸其中一段光纤,使得他们的相位差等于 $\pi/2$,从而得到 1/4 波片。为了在拉伸过程中实时检测并控制相位差,将正交熔接的高双折射光纤接入 3 dB 耦合器构成高双折射光纤环境。利用环境的透过率特性来确定它们之间的相位差。

本文详细推导了高双折射光纤环境的透过率,给出了 1/4 波片制作、调节的方法,并验证了制作 1/4 波片的可行性。该方法具有操作方便、准确度高等优点。

2 基本原理

2.1 1/4 波片的原理及构造

将长度为 l_1 、 l_2 的两段高双折射光纤 L_1 和 L_2

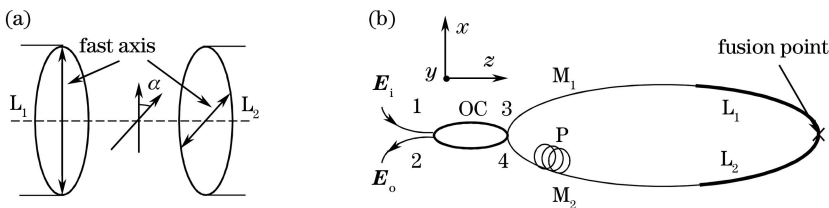


图 1 1/4 波片制作原理图。(a) 两段高双折射光纤的熔接;(b) 高双折射光纤环境检测系统

Fig. 1 Schematic of quarter-wave plate. (a) Fusion of two sections HBFs; (b) testing system based on the Hi-Bi FLM

对于 3 dB 耦合器,交叉耦合(端口 $1 \leftrightarrow 4$ 和 $2 \leftrightarrow 3$)与直通耦合($1 \leftrightarrow 3$ 和 $2 \leftrightarrow 4$)^[8]相比有 $\pi/2$ 的相位差。直通耦合的矩阵为

$$C_s = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

交叉耦合的矩阵为

正交熔接,即两段光纤的快轴间夹角 α 均为 90° ,如图 1(a)所示。光纤的拍长 $L_B = \lambda_0 / \Delta n$,其中: Δn 为光纤快慢轴的折射率差; λ_0 为所用光源的中心波长。光经过这两段正交熔接的光纤后,偏振方向沿快轴和慢轴的两束光的相位差 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\lambda_0 \Delta l}{\lambda L_B}, \quad (1)$$

式中: $\Delta l = l_1 - l_2$,为两段高双折射光纤的长度差。

由(1)式可知,当 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时, 90° 夹角熔接的两段高双折射光纤结构即为 1/4 波片。选用两段长度尽量相等的高双折射光纤,然后调节其中一段光纤,使得快慢轴方向的偏振光的相位差为 $\pi/2$ 。

2.2 检测系统特性分析

将两段正交熔接的高双折射光纤接入 3 dB 耦合器组成高双折射光纤环境检测系统,如图 1(b)所示。其中 OC 为常用的 3 dB 单模光纤 2×2 耦合器, M_1 和 M_2 为属于耦合器结构的单模光纤,器件 P 为偏振控制器, L_1 和 L_2 为同种高双折射光纤,且两段光纤采用快轴间夹角 90° 熔接。利用该环境作为 1/4 波片的检测系统,光从 1 端口入射,2 端口输出,入射光和出射光分别记作 E_i 和 E_o 。 $|E_i|^2 / |E_o|^2$ 即为检测环境系统的透过率。根据透过率曲线,可检测出两段正交熔接的高双折射光纤是否为 1/4 波片。

假设输入光波为线偏振光 E_i ,初相位为 0,它在实验坐标 x 轴和 y 轴上的分量分别记为 E_{ix} 和 E_{iy} 。采用琼斯矩阵法推导该高双折射光纤环境的透过率函数。光通过各元件时,该元件的属性用 2×2 矩阵来表示。

$$C_r = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} \exp(i\pi/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/2) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由(1)式可知,以 90° 夹角熔接后的两段同种高双折射光纤的传输矩阵为

$$T_{\text{HBF}} = \begin{bmatrix} \exp(i\Delta\varphi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为熔接的高双折射光纤产生的相位差。

对于无损耗单模光纤,线偏振光在光纤中传播时偏振态发生旋转的矩阵 $\mathbf{R}(\sigma)^{[9]}$ 为

$$\mathbf{R}(\sigma) = \begin{bmatrix} \cos \sigma & \sin \sigma \\ -\sin \sigma & \cos \sigma \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: σ 表示为光波偏振态旋转的角度。

当线偏振光入射到高双折射光纤时,若实验坐标系与高双折射光纤的快轴方向存在夹角 δ ,需将线偏振光的光波矩阵旋转角度 δ ,待乘以高双折射光纤的传播矩阵后,再将光波矩阵旋转角度 $-\delta$ 。此时的旋转矩阵与(5)式相同。

光波在回折光纤中传播时,由于坐标系发生转换,因此需乘以坐标变换矩阵。坐标变换矩阵 $\mathbf{R}_{\text{rot}}^{[10]}$ 为

$$\mathbf{R}_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

忽略光纤的传输损耗和熔接损耗。偏振光经过 M_1 和 M_2 段单模光纤时,其偏振态旋转的角度记为 θ_1 和 θ_2 ;将 L_1 和 L_2 正交熔接,偏振方向沿快、慢轴方向的光通过后产生的相位差记为 $\Delta\varphi$, L_1 的快轴与实验室坐标 x 方向的夹角记为 α 。

在这种光纤环境系统中,沿顺时针方向传播的光(1→3→4→2 端口)的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{cor}} \\ \mathbf{E}_{\text{coy}} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_s \mathbf{R}(\theta_2) \mathbf{R}_{\text{rot}} \mathbf{R}(-\alpha) \mathbf{T}_{\text{HBF}} \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{R}(\theta_1) \mathbf{C}_s \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{ir}} \\ \mathbf{E}_{\text{iy}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

同理,逆时针方向传播的光(1→4→3→2 端口)的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{aor}} \\ \mathbf{E}_{\text{aoy}} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_r \mathbf{R}(-\theta_1) \mathbf{R}(-\alpha) \mathbf{T}_{\text{HBF}} \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{R}_{\text{rot}} \mathbf{R}(-\theta_2) \mathbf{C}_r \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{ir}} \\ \mathbf{E}_{\text{iy}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将(2)式~(6)式分别代入(7)式和(8)式中,可得

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{cor}} \\ \mathbf{E}_{\text{coy}} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} -A & -B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{ir}} \\ \mathbf{E}_{\text{iy}} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{aor}} \\ \mathbf{E}_{\text{aoy}} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} A & -C \\ B & -D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{ir}} \\ \mathbf{E}_{\text{iy}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: A 、 B 、 C 和 D 为

$$\begin{cases} A = \cos(\alpha + \theta_1) \cos(\alpha + \theta_2) \exp(i\Delta\varphi) + \sin(\alpha + \theta_1) \sin(\alpha + \theta_2) \\ B = \sin(\alpha + \theta_1) \cos(\alpha + \theta_2) \exp(i\Delta\varphi) - \cos(\alpha + \theta_1) \sin(\alpha + \theta_2) \\ C = \cos(\alpha + \theta_1) \sin(\alpha + \theta_2) \exp(i\Delta\varphi) - \sin(\alpha + \theta_1) \cos(\alpha + \theta_2) \\ D = \sin(\alpha + \theta_1) \sin(\alpha + \theta_2) \exp(i\Delta\varphi) + \cos(\alpha + \theta_1) \cos(\alpha + \theta_2) \end{cases} \quad (11)$$

综上所述,由(4)式可知,在耦合器的 4 端口的输出光波为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{or}} \\ \mathbf{E}_{\text{oy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{cor}} \\ \mathbf{E}_{\text{coy}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{aor}} \\ \mathbf{E}_{\text{aoy}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \sin(2\alpha + \theta_1 + \theta_2) [1 - \exp(i\Delta\varphi)] \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{\text{ir}} \\ \mathbf{E}_{\text{iy}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

高双折射光纤环境的透过率为

$$T = \frac{|\mathbf{E}_{\text{or}}|^2 + |\mathbf{E}_{\text{oy}}|^2}{|\mathbf{E}_{\text{ir}}|^2 + |\mathbf{E}_{\text{iy}}|^2} =$$

$$\sin^2(2\alpha + \theta_1 + \theta_2) \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = \sin^2 \theta \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (13)$$

式中: $\theta = 2\alpha + \theta_1 + \theta_2$ 。由(13)式可知,透过率的最大值为 $T_{\text{max}} = \sin^2 \theta$ 。在高双折射光纤环境系统中,通过观察环境系统的透过率变化,即可推导出相位差 $\Delta\varphi$ 的变化;拉伸其中一段光纤,改变了两段光纤的长度差,同时也改变了相位差。

3 理论分析与讨论

实验过程中,由于系统存在传播损耗,环境系统的透过率不能达到 100%。对透过率 T 进行归一化

处理,归一化透过率 T' 为

$$T' = \frac{T}{T_{\text{max}}} = \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = \sin^2 \frac{\pi\lambda_0 \Delta l}{\lambda L_B}. \quad (14)$$

由(14)式可知,当 $|\Delta\varphi|$ 为 $\pi/2$ 的奇数倍时,光纤环境系统在 $\lambda = \lambda_0$ 处的实际透过率仅为最大值的 1/2,因而归一化透过率为 0.5。

当 λ 趋近于 λ_0 时, $1/\lambda \approx \lambda/\lambda_0^2$, (14)式可简化为

$$T' = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi\lambda_0 \Delta l}{\lambda L_B} \right) \approx \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi\lambda \Delta l}{\lambda_0 L_B} \right) = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta\lambda), \quad (15)$$

式中: $\beta = 2\pi\Delta l/(\lambda_0 L_B)$ 。由(15)式可看出, T' 近似为余弦曲线,周期 $P = 2\pi/\beta = \lambda_0 L_B/\Delta l$ 。制作波片时,调节施加于其中一段高双折射光纤上的轴向应力,导致 Δl 、 L_B 变化,从而使余弦函数的相位和周期

均发生变化。这时,透过率曲线发生漂移,且形状(周期)也发生变化。以 $\lambda = \lambda_0$ 为观察点,当 $\Delta l/L_B = 1/4 + m/2$ (m 为整数), (15)式的值为 $1/2$ 。当 m 为不同整数时,周期 P 不同,从而透过率曲线在 $\lambda = \lambda_0$ 处的斜率不同。因此,通过调节形变,使得在 $\lambda = \lambda_0$ 处透过率为 $1/2$,且透过率曲线的斜率值与理论计算值在一定误差范围内一致,则可确定此时两段高双折射光纤等效于 $1/4$ 波片。

实验中采用熊猫型高双折射光纤,轴向应力、环境温度都会导致它的双折射特性产生变化。调节高双折射光纤时,光纤上的轴向应力一方面使得光纤长度发生变化,另一方面产生应力模式双折射 B_{st} ^[11]。轴向形变记为 ϵ_z ,由长度变化产生的相位变化记为 $\Delta\varphi_{\epsilon_z}$,应力模式双折射产生的相位变化记为 $\Delta\varphi_{st}$ 。由文献[11]可知,此时的相位差 $\Delta\varphi$ 的变化 $\Delta\varphi'$ 可表示为

$$\Delta\varphi' = \Delta\varphi_{\epsilon_z} + \Delta\varphi_{st} \quad (16)$$

由(16)式可知,高双折射光纤相位差的变化与轴向形变以及同时出现的轴向应力两种因素有关。由文献[11]可知,对于熊猫型高双折射光纤,应力相位差 $\Delta\varphi_{st}$ 约为形变相位差的25倍,这极大地提高了光纤的轴向形变引起相位差变化的灵敏度;在一定的轴向应变范围内,相位差 $\Delta\varphi$ 的变化与长度差 Δl 的变化近似为线性关系。

对(15)式求导,可以得到归一化透过率 T' 在不同相位差条件下的曲线在 $\lambda = \lambda_0$ 处的斜率。 $T'(\lambda = \lambda_0)$ 的斜率随熔接的两段高双折射光纤长度差 Δl 的变化为

$$k(\lambda = \lambda_0) = \left. \frac{dT'(\lambda)}{d\lambda} \right|_{(\lambda = \lambda_0)} = -\frac{\pi\Delta l \sin(2\pi\Delta l/L_B)}{\lambda_0 L_B} \quad (17)$$

图2为高双折射光纤环境的归一化透过率 T' 在相位差 $\Delta\varphi$ 为 $-3\pi/2, -\pi, -\pi/2, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 时的数值曲线图。图2(a)、(b)是相位差为 $\pm\pi$ 的情形,此时透过率为1,且透过率曲线的斜率为0。图2(c)~(f)中, λ_0 处的归一化透过率都为0.5,它们

的斜率值分别为0.001502, -0.0005067 , -0.0005067 , 0.001502 。由此可见,虽然相位差为 $\pm 3\pi/2$ 与 $\pm\pi/2$ 时透过率相等,但透过率斜率的数值不同,不仅符号相反,且绝对数值相差2倍。当 $\Delta l/L_B = 1/4 + m/2$ (m 为整数)时,在观察波长 $\lambda_0 = 1550$ nm处,透过率都为0.5,但由(17)式可知,其中 $m=0$ 时斜率绝对值最小,约为0.00051。

综上所述,可以边调节边监测系统的透过率曲线,成功制备 $1/4$ 波片需满足以下条件:1)在波长 $\lambda_0 = 1550$ nm处的透过率衰减为最大值的一半;2)此时对应的归一化透过率曲线的斜率数值小于0.00051,就制作成功了 $1/4$ 波片。

4 实验结果

实验装置如图3所示,高双折射光纤采用熊猫保偏光纤(中国电子科技集团公司第四十六所),工作在1550 nm波段,拍长为2.6 mm。光源为超辐射发光二极管(SLED)宽带光源,输出功率为1.5 mW,峰值波长在1540 nm,半峰全宽为60 nm。采用光谱仪(ANDO, AQ6317B)测量透射率。进行拉伸的高双折射光纤固定在光学导轨两端的XY轴手动平移台上,平移台的精度为0.01 mm,其相对位置变化与光纤的相对拉伸长度变化保持一致。高双折射光纤的一端用平移台固定,另一端用平移台沿同一方向进行手动调节拉伸。

在拉伸光纤过程中,平移台的相对位置变化和实验结果的数据列于表1。表中共记录了6种情况,其中“Position”一栏表示平台的相对位置,“Transmittance”表示此时波长在1550 nm处透过率的值,“Slope”一栏对应此时将透过率曲线进行线性拟合得到的直线的斜率。“Normalization”和“R”则分别对应透过率归一化后对应的斜率及线性拟合的R数值。因为两段高双折射光纤的熔接角不是严格的 90° ,所以透过率曲线中含有高频成分,且受噪音的影响,透过率曲线作线性拟合时,R较小,即透过率曲线拟合为直线并不合适。但从大的范围

表1 不同位置处环境系统的透过率值及对应的斜率 k 的值

Table 1 Transmittance and slope k at different positions

Case	Transmittance	Slope k	Normalization	R	Position P /mm
1	0.2526	0.0007128	0.001436	0.9906	0
2	0.4969	0.0000584	0.000118	0.3934	0.035
3	0.2525	-0.0000812	-0.000164	0.5448	0.075
4	0.2520	-0.0002156	-0.000434	0.8459	0.145
5	0.4962	0.0000595	-0.000120	0.4065	0.190
6	0.2466	0.0008320	0.001674	0.9940	0.215

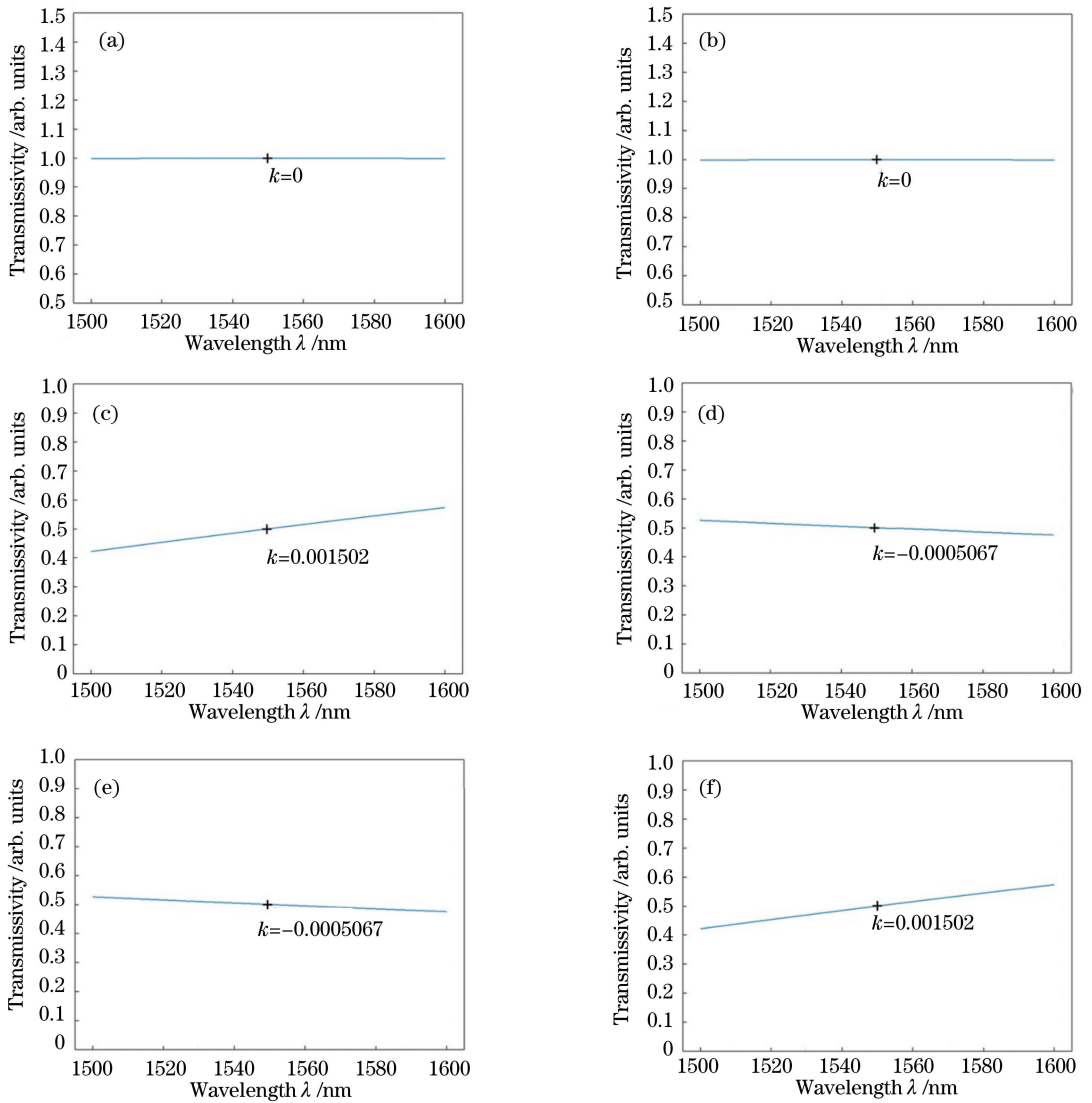


图 2 高双折射环境系统的归一化透过率数值曲线。

(a) $\Delta\varphi = -\pi$; (b) $\Delta\varphi = \pi$; (c) $\Delta\varphi = -3\pi/2$; (d) $\Delta\varphi = -\pi/2$; (e) $\Delta\varphi = \pi/2$; (f) $\Delta\varphi = 3\pi/2$
 Fig. 2 Numerical curves of normalized transmissivity of Hi-Bi FLM. (a) $\Delta\varphi = -\pi$; (b) $\Delta\varphi = \pi$;
 (c) $\Delta\varphi = -3\pi/2$; (d) $\Delta\varphi = -\pi/2$; (e) $\Delta\varphi = \pi/2$; (f) $\Delta\varphi = 3\pi/2$

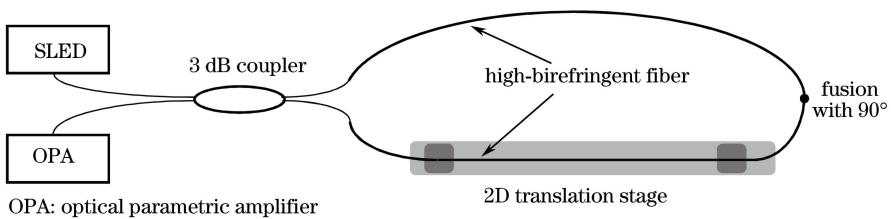


图 3 实验测量装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental measurement system

看,透过率曲线的变化趋势与直线较一致,以此估算其斜率,在精度要求不高的场合,具有参考意义。

实际实验中,拉伸高双折射光纤,环境系统的透过率曲线发生漂移,形状发生变化。轴向伸长约 0.142 mm,波长 $\lambda = 1550$ nm 处的透过率变化一个

周期。在轴向应力作用下,光波通过高双折射光纤产生 2π 的附加相位时, $\Delta l' \approx L_B/20$ ^[11-12]。实验选用的熊猫型光纤拍为 2.6 mm,轴向应力存在时,相位偏移 2π 对应的轴向应变为 0.13 mm,与实验值基本吻合。

结合图 2 与表 1 中的数据值分析可知,表 1 中“1~6”分别对应的相位差 $\Delta\varphi$ 为 $-3\pi/2$, $-\pi$, $-\pi/2$, $\pi/2$, π 和 $3\pi/2$ 时的情形。

实验时观察到的透过率曲线如图 4 所示,图 4(b)和(e)为环境系统所能达到的极大透过率,均值为 0.497。熔接损耗,特别是模场不匹配造成的熔

接损耗、耦合器的分光比与理想的 50:50 的偏离、光纤的传输损耗等因素是造成最大透过率较小的原因。

由实验结果的数据表 1 可知,相对位置为 0.075 mm 和 0.145 mm 时,在波长 $\lambda_0 = 1550$ nm 处,透过率值约为最大透过率的一半,且此时的斜率数值小于 0.00051。此时,成功制作了 1/4 波片。

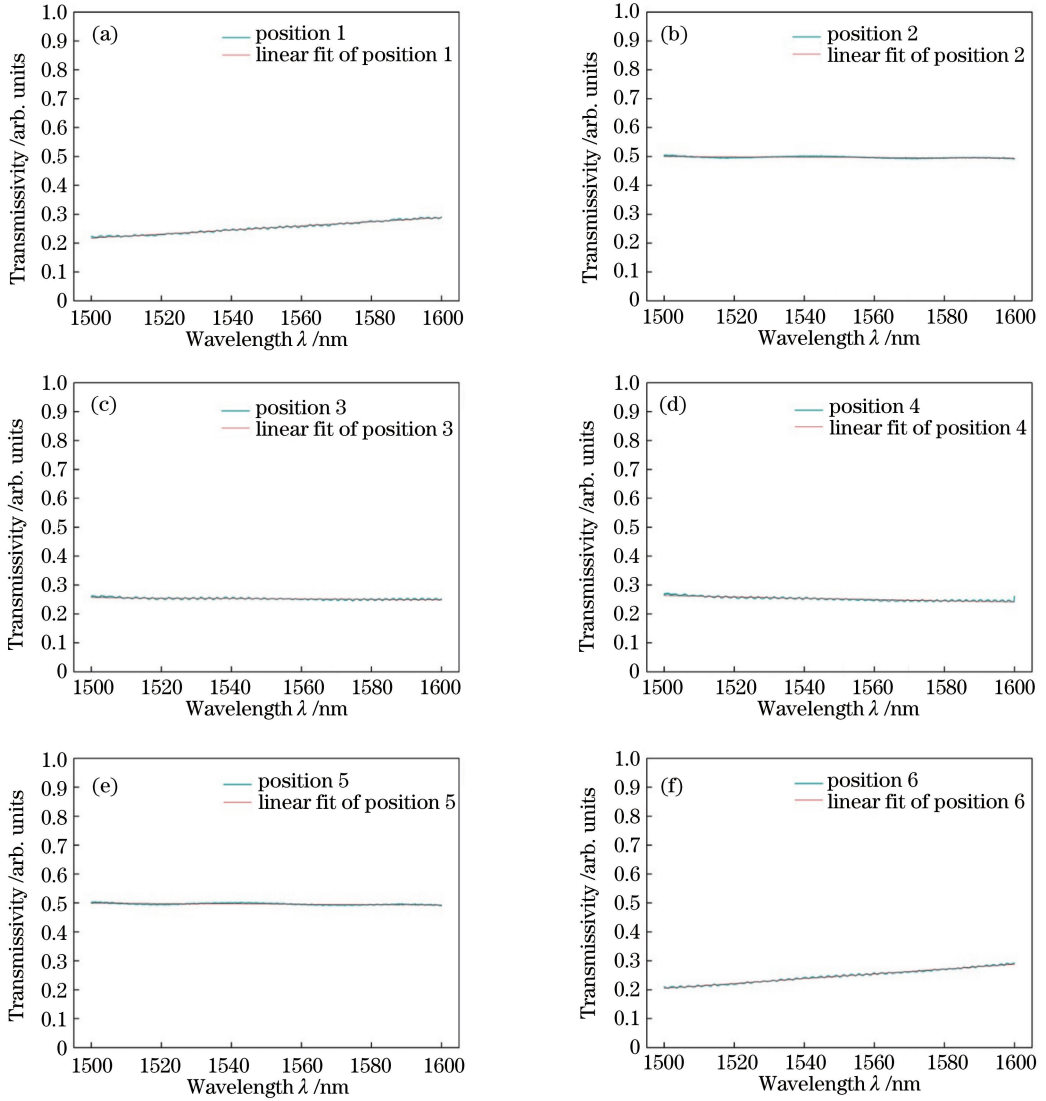


图 4 二维平移台在不同位置处的透过率光谱。

(a) 0 mm; (b) 0.035 mm; (c) 0.075 mm; (d) 0.145 mm; (e) 0.190 mm; (f) 0.215 mm

Fig. 4 Transmissivity curves of the fiber loop with different positions on 2D translation stage.

(a) 0 mm; (b) 0.035 mm; (c) 0.075 mm; (d) 0.145 mm; (e) 0.190 mm; (f) 0.215 mm

5 结 论

提出了一种制作 1/4 波片的新方法,将两段长度近似相等的高双折射光纤以 90° 夹角熔接,拉伸操作其中一段光纤使得相位差等于 $\pi/2$,从而得到 1/4 波片。把正交熔接的高双折射光纤接入 3 dB 耦合器构

成高双折射光纤环境,利用环境的透过率特性来确定一段光纤拉伸时产生的相位差。对高双折射光纤环境系统的透过率曲线特性分析验证了这种新型光纤 1/4 波片制作方法的可行性。

本文的实验结构仅验证了该制作方法原理的可行性,还不适合实际应用。该方法的实际应用,需要

采用稳定性更好、更方便的调节装置,并考虑波片的温度补偿问题。

参 考 文 献

- [1] Smith A M. Optical fibres for current measurement applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 1980, 12(1): 25-29.
- [2] Rogers A J. Optical methods for measurement of voltage and current on power systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 1977, 9(6): 273-283.
- [3] Rose A H, Ren Z B, Day G W. Twisting and annealing optical fiber for current sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14 (11): 2492-2498.
- [4] Zhang R, Lu H Q, Liu Y, *et al.* A fiber quarter wave plate encapsulated in the connector. CN201320106607.9[P]. 2013-08-14.
张睿, 陆华清, 刘莹, 等. 一种连接头型光纤四分之一波片: CN201320106607.9[P]. 2013-08-14.
- [5] Han K J, Li J, Yan G F, *et al.* Study on $\lambda/4$ wave plate in fiber optical current transformer [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52 (6): 102-106.
韩克俊, 李军, 闫冠峰, 等. 全光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片技术与探讨[J]. *电测与仪表*, 2015, 52 (6): 102-106.
- [6] Li J Z, Li Z R, Zhang D H, *et al.* Fabrication of $\lambda/4$ wave plate for fiber optic current transducer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2167-2172.
李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 全光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片制作工艺[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42 (8): 2167-2172.
- [7] Jiao B L, Zheng S X, Wang Z H. A method for producing circular polarization light with polarization-maintain fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(5): 49-51.
焦斌亮, 郑绳植, 王朝晖. 一种利用保偏光纤产生圆偏振光的方法[J]. *光电工程*, 2004, 31(5): 49-51.
- [8] Feng S J, Mao Q H, Shang L, *et al.* Reflectivity characteristics of the fiber loop mirror with a polarization controller [J]. *Optics Communications*, 2007, 277(2): 322-328.
- [9] Zhou G, Zhao Q D, Liu Y G, *et al.* Filtering characteristics of fiber loop mirror filter composed of multi-stage high birefringent fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3): 341-345.
周广, 赵启大, 刘艳格, 等. 多段双折射光纤构成环镜滤波器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(3): 341-345.
- [10] Yu A, Siddiqui A S. Systematic method for the analysis of optical fibre circuits [J]. *IEEE Proceedings-Optoelectronics*, 1995, 142 (4): 165-175.
- [11] Chiang K S, Wong D, Chu P L. Strain-induced birefringence in a highly birefringent optical fibre[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(17): 1344-1346.
- [12] Varnham M P, Barlow A J, Payne D N, *et al.* Polarimetric strain gauges using high birefringence fibre[J]. *Electronics Letters*, 1983, 19 (17): 699-700.
- [13] Li Z G, Shi W J, Huang S L. Analysis of connection loss and extinction ratio of polarization maintaining fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(2): 189-194.
李志高, 石文江, 黄尚廉. 保偏光纤的连接损耗和消光比分析[J]. *光学学报*, 1996, 16(2): 189-194.
- [14] Hu S Y, He S Y, Yu K X, *et al.* Strain sensor based on high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(7):1654-1657.
胡曙阳, 何士雅, 俞宽新, 等. 高双折射光纤环镜应变传感研究[J]. *光子学报*, 2009, 38 (7): 1654-1657.