

基于宽带光纤圆起偏器的保偏光纤拍长测量

肖悦娱 王昭昭 石志东 彭 蕾 颜锦奎

(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

摘要 提出了一种基于偏光干涉效应测量保偏光纤拍长的新方法。利用宽谱光源和两个宽带光纤圆起偏器, 与被测保偏光纤组成了全光纤的测试系统。理论分析表明, 相比于光纤线偏振器构成的偏光干涉测量系统, 圆偏振器可以克服保偏光纤主轴之间的角度对输出干涉光对比度的影响。采用该方法对某熊猫型保偏光纤的拍长进行了验证性实验研究, 实验结果和理论分析相吻合, 保偏光纤拍长测量精度和重复性为 0.1 mm, 干涉信号对比度可达 0.9 以上。由于光纤器件间无需精确对轴, 因此该方法光路结构简单, 操作要求较低。

关键词 光纤光学; 拍长测试; 光纤圆起偏器; 偏光干涉

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1206002

Beat-Length Measurement of Polarization Maintaining Fibers Based on Broadband Fiber Circular Polarizers

Xiao Yueyu Wang Zhaozhao Shi Zhidong Peng Lei Yan Jinkui

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

Abstract A new method to measure the beat-length of polarization maintaining fibers is presented. The key components of the all-fiber measuring system are a broadband light source and two broadband fiber circular polarizers. Theoretical analysis shows that, compared with the polarization interference system made up by fiber linear polarizers, circular polarizers can eliminate the influence of the angles between the axis of polarization maintaining fibers on the visibility of the interference fringe. The beat-length of a panda polarization maintaining fiber is investigated for verification. Experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. The accuracy and repetition of beat-length measurement are 0.1 mm, and the visibility of the interference fringe is better than 0.9. Since there is no need for accurate angle adjustment between polarization maintaining fiber devices, the measurement system has the advantages of simple structure and low operation requirement.

Key words fiber optics; beat-length measurement; fiber circular polarizer; polarization interference

OCIS codes 060.2310; 060.2420; 120.3180

1 引 言

保偏(PM)光纤能保持光在光纤中传输的偏振态,其抗偏振衰落性能在光纤通信和光纤传感系统中有很高的应用价值^[1-3],因此近年来保偏光纤的理论设计、制造工艺和参数测量等方面的研究受到了广泛重视^[4-5]。保偏光纤的拍长反映了光纤的偏振保持能力,是保偏光纤的一个重要参数。目前保偏光纤拍长的测量方法主要有动态压力法^[6]、磁光

调制法^[7]、截断法^[8]和瑞利散射法^[9]等。近年来随着光纤器件的发展,逐步发展了全光纤的拍长测量方法,如宽谱光源干涉法^[10]、光纤光栅法^[11]等。全光纤测量不需要块状光学器件的对准,也避免了光从自由空间耦合到光纤时偏振态变化带来的误差,因此更为方便准确。其中宽谱光源干涉法利用宽谱光源、光纤偏振器和光谱分析仪等常用的光学设备就能完成保偏光纤拍长的测量,是一种简单有效的

收稿日期: 2013-06-21; 收到修改稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61107075)、上海市重点学科建设项目(S30108)

作者简介: 肖悦娱(1977—),女,博士,助理研究员,主要从事特种光纤和光纤传感器方面的研究。

E-mail: yyx@staff.shu.edu.cn

测量方法。但是在该方法中,如果使用的光纤偏振器为宽带的线偏振器,偏光干涉输出信号的对比度与偏振器尾纤和被测光纤偏振主轴之间的夹角有关,而保偏光纤主轴之间角度的调整还是比较困难的。本文提出一种基于宽带光纤圆偏振器(BFCP)的拍长测量方法,可克服保偏光纤主轴之间角度对测量的影响,光纤器件不必精确对轴就能保证较大的对比度,操作更加便捷。

2 测量原理

保偏光纤的原理是在光纤的横截面上引入各向异性,从而增加沿光纤两正交主轴方向传播的偏振模 HE_{11}^+ 和 HE_{11}^- 的传播常数差,减小它们之间的偏振耦合系数。由于传播常数不同,两偏振模式间的相位差 $\Delta\varphi$ 随传播距离 L 变化可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_f - n_s)L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 n_f, n_s 分别为保偏光纤快轴和慢轴的折射率, λ

为入射光波长。定义当此相位差改变 2π 时,光纤长度的变化 L_B 为保偏光纤的拍长,即

$$L_B = \frac{\lambda}{n_f - n_s}. \quad (2)$$

根据(1)式,当入射光的波长在中心波长 λ_c 附近发生 $\delta\lambda$ 的变化时,相位差也会发生 $\delta\Delta\varphi$ 变化:

$$\delta\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_f - n_s)L}{\lambda_c^2} \cdot \delta\lambda = \frac{2\pi L}{L_B \cdot \lambda_c} \cdot \delta\lambda. \quad (3)$$

因此,对于一定长度 L 的光纤,两个偏振模相位差在中心波长 λ_c 附近随波长的变化关系由保偏光纤的拍长 L_B 决定。如果能够测出相位差随波长的变化关系,就能得到保偏光纤在 λ_c 处的拍长。

偏光干涉法就是把两个偏振模之间的相位差转化为光强输出,从而测量相位差变化与波长关系的一种方法,实验装置如图 1 所示。装置由宽谱光源、两宽带光纤偏振器和光谱仪组成,光路完全由光纤器件构成。

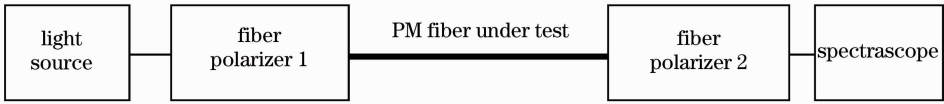


图 1 保偏光纤拍长测量装置图

Fig. 1 Setup of the beat-length measuring system

对整个光路建立琼斯矩阵模型。由于采用的是宽谱光源,输出的光为非偏振光,需要用相干矩阵来描述。设偏振器 1(P1)的琼斯矩阵为 M_{P1} ,偏振器 2 (P2)的琼斯矩阵为 M_{P2} ,待测光纤的琼斯矩阵为 M_{PM} ,则偏振系统的传输矩阵

$$G = M_{P2} \cdot M_{PM} \cdot M_{P1}. \quad (4)$$

宽谱光源输出的光接近自然光,所以输入光的相干矩阵

$$J_{in} = \frac{I_{in}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 I_{in} 为入射光功率。输出光的相干矩阵

$$J_{out} = G J_{in} G^H, \quad (6)$$

式中上标 H 表示矩阵的共轭转置。则输出光的功率 I_{out} 为

$$I_{out} = \text{Tr}(J_{out}) = \frac{I_{in}}{2} (|G_{11}|^2 + |G_{12}|^2 + |G_{21}|^2 + |G_{22}|^2), \quad (7)$$

式中 $\text{Tr}(\cdot)$ 表示取矩阵的迹。

对于理想的椭圆偏振器(消光比为无穷大),当其偏振主轴方向与保偏光纤的主轴方向成 θ 角时,其琼斯矩阵可表示为

$$M_P = M_{R^-} \cdot M_{P0} \cdot M_{R^+}, \quad (8)$$

式中 $M_{P0} = \begin{bmatrix} \sin^2 \xi & j \sin \xi \cos \xi \\ -j \sin \xi \cos \xi & \cos^2 \xi \end{bmatrix}$ 为偏振器在本地坐标系下的传输矩阵,偏振器的本征态椭圆率为 $\frac{b}{a} = \tan \xi$ 。 M_{R^+} 和 M_{R^-} 为偏振器本地坐标系和保偏光纤坐标系之间的坐标变换矩阵,即 $M_{R^+} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$, M_{R^-} 为 M_{R^+} 的转置矩阵: $M_{R^-} = M_{R^+}^T$ 。

设偏振器 P1 的主轴方向与保偏光纤的主轴方向成 θ_1 ,本征态椭圆率参数为 ξ_1 ,偏振器 P2 的主轴方向为 θ_2 ,椭圆率参数为 ξ_2 ,则输出光功率

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} (\alpha_{dc} + \alpha_{ac}), \quad (9)$$

式中 $\alpha_{dc} = f(\theta_1, \theta_2, \xi_1, \xi_2)$ 为功率直流因子; $\alpha_{ac} = g(\theta_1, \theta_2, \xi_1, \xi_2) \cos(\Delta\varphi)$ 为功率交流因子。

从(9)式可以看出,输出光功率是两偏振模相位差 $\Delta\varphi$ 的余弦函数,随入射光波长而变化。当光功率变化一个周期时,根据(3)式,相对应的波长变化周期由被测光纤的拍长 L_B 、中心波长 λ_c 和光纤的长度 L 决定,即

$$\Delta\lambda = \frac{L_B \cdot \lambda_c}{L}. \quad (10)$$

因此,如果测出光功率随波长变化的周期 $\Delta\lambda$ 和光纤的长度 L ,就能得到被测光纤在 λ_c 处的拍长 L_B 。但是,用干涉法测量光纤的拍长,测量的精度与光功率变化的幅度有关,在光干涉仪中,一般用对比度 C 来反映功率变化的幅度, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为输出光功率的最大值和最小值,即

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (11)$$

图2为干涉信号对比度 C 与偏振器本征态椭圆率参数 ξ 同本征态主轴与保偏光纤主轴夹角 θ_1 和 θ_2 之间的关系。从图中可以看出,当偏振器本征态为线偏振($\xi = 0$)时, C 在 0 和 1 之间变化(当 θ_1 和 θ_2 为

$\pm \pi/4$ 时, C 取最大值 1,当 θ_1 和 θ_2 为 0 或 $\pi/2$ 时, C 取最小值 0,即看不出功率的变化),如图 2(a) 所示;当偏振器本征态为椭圆偏振($\xi = \pi/8$)时, C 的最大值为 1,最小值为 $1/3$,如图 2(b) 所示;当偏振器本征态为圆偏振($\xi = \pi/4$)时,信号对比度 C 恒为 1,如图 2(c) 所示,此时输出光功率为

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{in}}}{2} \left[\frac{1 + \cos(\Delta\varphi)}{2} \right]. \quad (12)$$

从以上分析可以看出,偏振器的本征态越接近圆,就能越好地消除偏振器与保偏光纤主轴之间的夹角对干涉信号对比度的影响。尽管用线偏振光作为基矢广为人知,但由于线偏振光是有主轴方向的,所以用圆偏振光作为基矢^[12]在光纤系统中有其独到的优点。

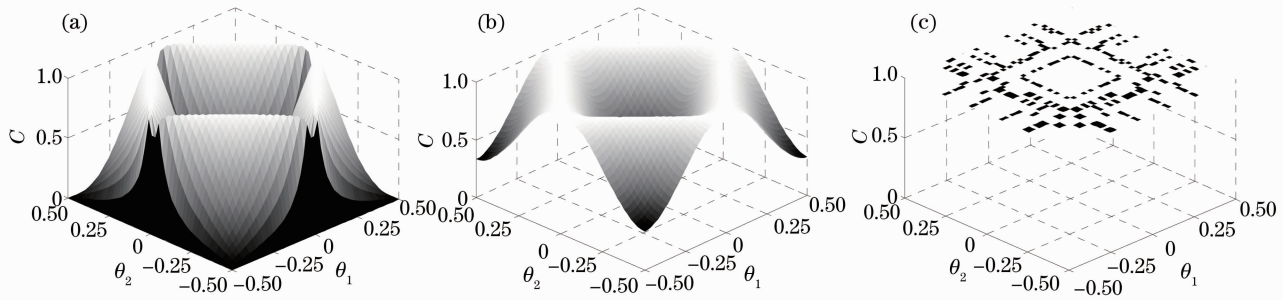


图2 信号对比度与主轴夹角 θ_1 、 θ_2 的关系。(a) $\xi=0$; (b) $\xi=\pi/8$; (c) $\xi=\pi/4$

Fig. 2 Visibility of the interference fringe with respect to θ_1 and θ_2 . (a) $\xi=0$; (b) $\xi=\pi/8$; (c) $\xi=\pi/4$

3 测量方法性能分析

根据(10)式,保偏光纤的拍长

$$L_B = \frac{L}{\lambda_c} \Delta\lambda. \quad (13)$$

因此,引起拍长测量误差的因素为待测光纤的长度测量误差和光谱仪的波长读数测量误差,根据误差估计理论,拍长的总测量误差可由下式估计:

$$\delta_{L_B} = \frac{L}{\lambda_c} \delta_{\Delta\lambda} + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_c} \delta_L, \quad (14)$$

式中 $\delta_{\Delta\lambda}$ 为波长周期的误差, δ_L 为光纤长度的误差。在一般的实验室系统中,光纤长度的测量误差在 1 cm 以下,光谱仪的读数误差在 0.2 nm 以下。假设待测光纤的长度为 1 m,拍长为 3 mm 左右,中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 左右,则拍长的测量误差在 0.1 mm 左右。

(12)式给出了当偏振器为理想圆偏振器时干涉系统的输出功率,但是实际使用的偏振器不可能是消光比为无穷大的圆偏振器,而是为有限消光比的椭圆偏振器。图3分析了对比度的最小值与椭圆偏振器的椭圆率和消光比的关系,从图中可以看出,当

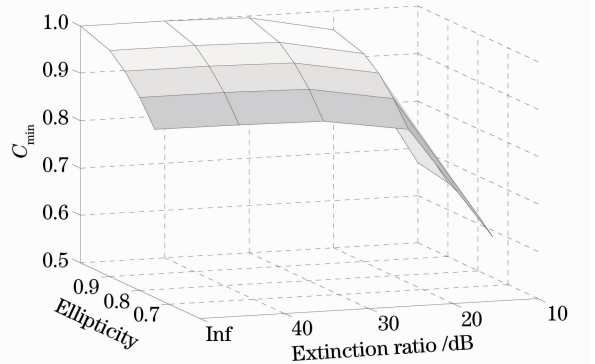


图3 信号对比度最小值与偏振器椭圆率、消光比的关系
Fig. 3 Minimum visibility of the interference fringe with respect to the ellipticity and extinction ratio of the polarizers

椭圆偏振器的椭圆率大于 0.85,消光比大于 20 dB 时,对比度的最小值能控制在 0.9 以上。

4 实验结果及分析

传统的圆偏振器是由块状的线偏振器和 $1/4$ 波

片组成的,用于光纤测量系统时,插入损耗大,调整困难。2004年,Kopp等^[13]通过实验证明高速旋转的线双折射光纤,当螺距小于一定值时,可实现宽带圆偏振器的功能。这里采用了类似结构的光纤圆偏振器进行实验。采用琼斯矩阵法对光纤圆偏振器的性能进行测试,实验装置如图4所示。激光光源为可

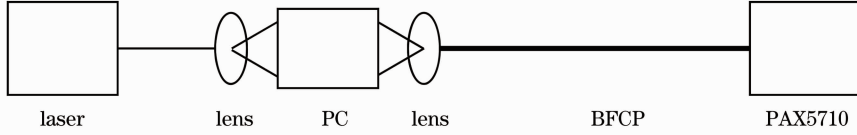


图4 琼斯法实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup of the Jones method

根据琼斯矩阵法,调节偏振控制器各波片之间的角度,使输入光的偏振态分别为水平线偏振光(H),垂直线偏振光(V)和左旋圆偏振光(L),测量其相应输出光的琼斯矢量分别为

$$\mathbf{E}_H = \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_L = \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \end{bmatrix}, \quad (15)$$

则可得宽带光纤圆偏振器的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{\text{BFCP}} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = J_4 \begin{bmatrix} K_1 K_4 & K_2 \\ K_4 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 $K_1 = H_x/H_y, K_2 = V_x/V_y, K_3 = L_x/L_y, K_4 = j(K_3 - K_2)/(K_1 - K_3)$ 。

首先测量圆偏振器的本征偏振态。根据线性代

调的分布反馈(DFB)激光器,中心波长为1550 nm,波长调节范围为1530.6~1562.1 nm。其输出光经准直透镜耦合到由块状光学器件构成的偏振控制器(PC)上,再经准直透镜耦合进BFCP。BFCP输出的光通过准直透镜后耦合到Thorlabs公司的偏振态测试仪PAX5710中进行分析。

数理论, \mathbf{J}_{BFCP} 可分解为

$$\mathbf{J}_{\text{BFCP}} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H, \quad (17)$$

式中 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2]$ 为偏振器的本征向量矩阵,即 $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 分别为偏振器两本征态的琼斯矢量。 $\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix}$ 为本征值矩阵, σ_1, σ_2 分别为两本征态在光纤中传播距离 L 的复相位延迟,即 $\sigma_i = \exp[j(\beta_i + j\alpha_i)L]$,其中 β_i 表示传播常数, α_i 表示损耗系数。图5为琼斯矩阵分析得到的光纤两本征态的偏振椭圆,两本征态都已接近圆偏振,椭圆率分别为0.91和0.92。两本征态无法达到理想的正交可能是由于测量误差造成的。

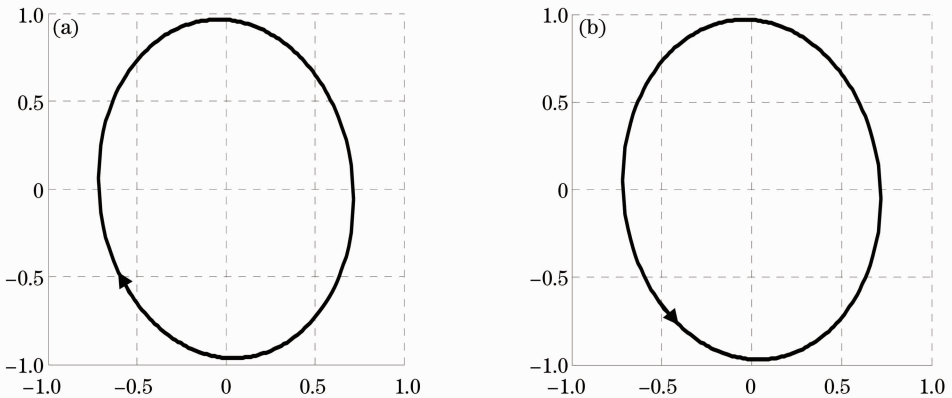


图5 圆偏振器两本征态的偏振椭圆。(a)左旋光;(b)右旋光

Fig. 5 Polarization ellipse of the circular polarizer's two eigenmodes. (a) Left-handed; (b) right-handed

接着测试圆偏振器的消光比随波长的变化情况。根据(17)式,两复相位延迟分别为

$$\sigma_i = \frac{[\mathbf{V}^{-1}\mathbf{E}_{\text{out}}]_i}{[\mathbf{V}^H\mathbf{E}_{\text{in}}]_i}, \quad (18)$$

式中 \mathbf{E}_{in} 和 \mathbf{E}_{out} 分别为入射光和出射光的琼斯矢量。

消光比定义为两本征态的传输损耗比:

$$\eta = -20 \lg \left[\frac{\min(|\sigma_1|, |\sigma_2|)}{\max(|\sigma_1|, |\sigma_2|)} \right]. \quad (19)$$

入射光 \mathbf{E}_{in} 为块状起偏器输出的线偏振光,调节输入光的波长,测量经过光纤圆偏振器后输出光的

琼斯矢量 E_{out} ，就能得到圆偏振器消光比与入射光波长的关系，如图 6 所示。从图中可以看出所使用的圆起偏器在波长 $1.53 \sim 1.56 \mu\text{m}$ 范围内消光比均接近 30 dB，是比较理想的宽带圆偏振器。

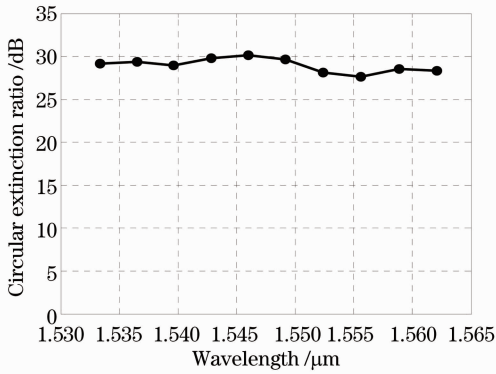


图 6 圆偏振器消光比与波长的关系

Fig. 6 Variation of the circular extinction ratio with wavelength

选取一种熊猫型保偏光纤作为研究对象。实验装置如图 1 所示，光源采用波长为 $1530 \sim 1560 \text{ nm}$ 的宽谱光源，将长度约为 1 m 的待测光纤与两宽带圆偏振器无主轴对接，测得的偏光干涉光谱如图 7 所示。干涉信号的对比如 $C \approx 0.98$ ， 1550 nm 处的波动周期 $\Delta\lambda = 5.80 \text{ nm}$ ，利用(13)式计算得光纤拍长为 $L_B = 4.16 \text{ mm}$ (光纤长度为 1.11 m)。与采用庞加莱球法^[14]的测量结果 ($L_B = 4.18 \text{ mm}$) 基本相符。

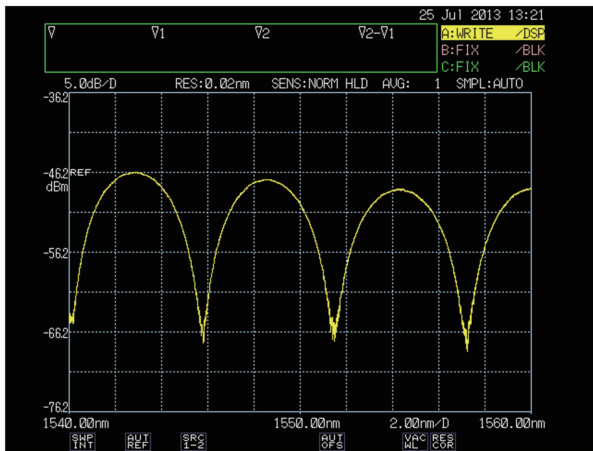


图 7 偏光干涉系统的输出光谱

Fig. 7 Spectrum of the output of the polarization interference system

为了检验方法的重复性，对不同长度的相同保偏光纤进行了测量，结果如表 1 所示。实验结果说明，系统的拍长测量重复性小于 0.1 mm 。

表 1 不同长度光纤的拍长测量结果

Table 1 Measured results with different lengths of the same fiber

Fiber length / m	Beat-length / mm
1.11	4.16
1.69	4.13
1.47	4.11

5 结 论

提出了一种利用宽谱光源和两个宽带光纤圆偏振器构成的保偏光纤拍长的全光纤测量方法。理论分析和实验结果表明，相比于光纤线偏振器构成的偏光干涉测量系统，圆偏振器可以克服保偏光纤主轴之间的角度对输出光对比度的影响。该测量方法简单快捷，操作要求很低，保偏光纤拍长测量精度和重复性为 0.1 mm 。

参 考 文 献

- 1 S L A Carrara, B Y Kim, H J Shaw. Bias drift reduction in polarization-maintaining fiber gyroscope [J]. *Opt Lett*, 1987, 12 (3): 214–216.
- 2 Jianfei Wang, Hong Luo, Zhou Meng, *et al.*. Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone [J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30 (8): 1178–1184.
- 3 Zhang Hongxia, Ren Yaguang, Ye Wenting, *et al.*. Dynamic dispersion compensation for the polarization coupling measurement system of polarization maintaining fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39 (1): 0105001. 张红霞, 任亚光, 叶婷婷, 等. 保偏光纤偏振耦合系统的动态色散补偿[J]. *中国激光*, 2012, 39 (1): 0105001.
- 4 Li Deyue, Zhou Guiyao, Xia Changming, *et al.*. Theoretical investigation of photonic crystal fiber with high nonlinear and birefringent characteristics [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39 (11): 1105003. 李德月, 周桂耀, 夏长明, 等. 高非线性高双折射光子晶体光纤特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2012, 39 (11): 1105003.
- 5 Li Wei, Chen Hui, Chen Ming. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39 (2): 0205002. 黎薇, 陈辉, 陈明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2012, 39 (2): 0205002.
- 6 A Barlow. Optical fiber birefringence measurement using a photoelastic modulator [J]. *J Lightwave Technol*, 1985, 3 (1): 135–145.
- 7 Shi Zhidong, Bao Huanhuan, Liu Shu. Research on magneto-optic modulation method measuring beat-length of birefringence optical fiber [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2008, 19 (3): 369–372. 石志东, 包欢欢, 柳树. 磁光调制法双折射光纤拍长测试技术研究[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19 (3): 369–372.
- 8 W Eickhoff, O Krumpolz. Determination of ellipticity of monomode glass fiber for measurement of scattered light intensity [J]. *Electron Lett*, 1976, 12 (16): 405–407.
- 9 F P Kapron, N F Borrelli, D Keck. Birefringence in dielectric optical waveguide [J]. *IEEE Quantum Electron*, 1972, 8 (2): 222–225.

- 10 Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong, *et al.*. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristics of all-fiber beat-length experimental systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0706003.
姜 暖, 李智忠, 杨华勇, 等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法比对研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0706003.
- 11 Xia Li, Li Xuhui, Feng Jia, *et al.*. Study of writing fiber Bragg grating into birefringent fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 1004–1007.
夏 历, 李翔辉, 冯 佳, 等. 在保偏光纤上制作光纤光栅的应用研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(8): 1004–1007.
- 12 Wang Zhengping, Yu Long. Expression of totally polarized light employing circular and elliptical basic vectors and methods of locus plotting of optical vectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0526001.
王政平, 余 龙. 完全偏振光在圆/椭圆基矢下的表征及其光矢轨迹做图法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0526001.
- 13 V I Kopp, V M Churikov, J Singer. Chiral fiber gratings [J]. *Science*, 2004, 305(5680): 74–75.
- 14 Zhang Desheng, Sun Lei, Dong Xiaoyi. Application of the poicare sphere in analyzing state polarization transmission in optical fiber [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2003, 14(10): 1009–1102.
张德生, 孙 磊, 董孝义. 邦加球在分析光纤偏振态传输中应用[J]. *光电子•激光*, 2003, 14(10): 1009–1102.

栏目编辑: 王晓琰