

## 宽带光纤 $\lambda/4$ 波片的温度特性

肖悦娱, 蒋晓勇, 陈 华

(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)

**摘 要:** 宽带光纤  $\lambda/4$  波片是一种特殊的变速旋转型双折射光纤。当其旋转速度由小到大逐渐增加时, 可将输入的线偏振光转换为圆偏振光, 同时具有理想的偏振变换带宽。结合全光纤电流互感器的光路模型, 分析了宽带光纤  $\lambda/4$  波片的特性对互感器标度因数稳定性的影响。通过在邦加球上的轨迹, 对宽带光纤波片快转端的本征态及两正交本征态间的耦合系数进行了实验研究, 测量了其随温度的变化。实验结果表明, 当波片转速变化曲线满足一定条件时, 宽带光纤  $\lambda/4$  波片的温度效应对电流互感器标度因数稳定性的影响小于 0.2%, 远小于窄带光纤  $\lambda/4$  波片的影响。利用宽带光纤  $\lambda/4$  波片可有效提高光纤电流互感器系统的温度稳定性。

**关键词:** 宽带光纤  $\lambda/4$  波片; 全光纤电流互感器; 温度特性; 标度因数

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1222003

## Temperature characteristics of broad-band fiber-optic $\lambda/4$ waveplate

Xiao Yueyu, Jiang Xiaoyong, Chen Hua

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

**Abstract:** The broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate is a special birefringent fiber with a slowly varying spin rate. When the spin rate gradually increases, it could transform the linearly polarized light into the circularly polarized light, covering a broad frequency range. Based on the loop model, the influence of the broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate on the scale factor stability of the all-fiber optic current sensor was analyzed. The eigen-modes of the fast-spun end and the coupling coefficient between the two orthogonal eigen-modes, along with the temperature characteristics, were measured using the trajectories on the Poincare sphere. Experimental results show that when the spin rate meets certain conditions, the influence of the broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate on the scale factor stability induced by the temperature variation is less than 0.2%, much weaker than that of the narrow-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate. The temperature stability of the all-fiber optic current sensor could be improved by using broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate.

**Key words:** broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate; all-fiber optic current sensor; temperature characteristics; scale factor

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61107075)

作者简介: 肖悦娱(1977-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事特种光纤和光纤传感方面的研究。Email: [yyx@staff.shu.edu.cn](mailto:yyx@staff.shu.edu.cn)

## 0 引言

随着电力系统电压等级的提高和传输容量的增大,传统的电磁式电流互感器已不能满足需求。光纤传感器具有适应性强、抗电磁干扰、体积小、质量轻等特点,被广泛应用于许多工业领域<sup>[1-4]</sup>。相比于传统的电磁式电流互感器,光纤电流互感器(Fiber Optic Current Sensor, FOCS)的测量范围大;测量灵敏度高;安装灵活安全,因此越来越受业界的重视,有希望成为适应智能电网的下一代电流互感器<sup>[5-8]</sup>。光纤电流互感器的温度稳定性至关重要,作为 FOCS 中线偏振光和圆偏振光转换的器件,光纤  $\lambda/4$  波片的性能对传感器稳定性的影响很大,有必要进行深入的研究<sup>[9-10]</sup>。

目前 FOCS 中常用的光纤  $\lambda/4$  波片是用一小段高双折射光纤制作的。将起偏器与高双折射光纤的偏振主轴成  $45^\circ$  焊接,利用光纤的双折射引入  $\pi/2$  的相位差,从而将入射的线偏振光转换为圆偏振光,或者相反。但是,高双折射光纤的拍长是随温度和入射波长变化的(称之为窄带光纤  $\lambda/4$  波片),这会引入 FOCS 系统标度因数的不稳定。20 世纪 90 年代,黄宏嘉先生提出了一种新型的光纤波片,可实现线偏振态和圆偏振态间的转换,同时具有理想的偏振变换带宽,称之为宽带光纤  $\lambda/4$  波片<sup>[11]</sup>。

宽带光纤  $\lambda/4$  波片是一种特殊的变速旋转双折射光纤。实验结果表明,当  $\lambda/4$  波片的转速曲线满足一定条件时,从不转端输入的线偏振光可以转换为快转端输出的圆偏振光,消光比可达到 0.5 dB (线入圆出);相反的从快转端输入的圆偏振光可以转换为不转端输出的线偏振光,消光比可达到 25.9 dB (圆入线出)。偏振变换可同时覆盖 1 310 nm 和 1 550 nm 两个波段<sup>[12-13]</sup>。但是 FOCS 的工作环境比较严苛,温度变化范围很大(-40~70 °C),因此宽带光纤  $\lambda/4$  波片的温度特性是否能满足 FOCS 的应用环境还需要进一步的研究,据作者所知,目前这方面的相关研究很少。文中结合 FOCS 的光路模型,分析了宽带光纤  $\lambda/4$  波片的特性对 FOCS 性能的影响。对波片的两个重要参数,即快转端的偏振本征态及两本征态在波片中的耦合系数进行了实验研究,测量了其随温度的变化。实验结果表面,当转速变化曲

线满足一定的条件时,宽带光纤  $\lambda/4$  波片对 FOCS 的标度因素影响小于 0.2%,其温度性能明显优于窄带光纤  $\lambda/4$  波片。

## 1 宽带光纤 $\lambda/4$ 波片的理论分析

宽带光纤  $\lambda/4$  波片是一段转速缓慢变化的旋转双折射光纤(长度为  $L$ ),可通过旋转保偏光纤预制棒,或加热旋转双折射光纤获得。在宽带光纤  $\lambda/4$  波片中,双折射光纤的偏振轴绕着光纤中心以缓慢增加的转速旋转,如图 1 所示。在不转端,转速为 0,而在快转端,转速可达到一个拍长内旋转数圈。

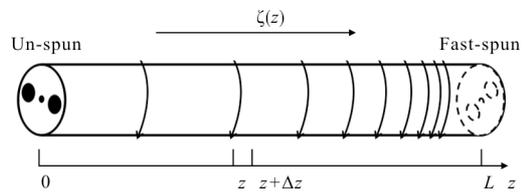


图 1 宽带光纤  $\lambda/4$  波片示意图

Fig.1 Schematic of the broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate

在随光纤双折射主轴旋转的本地坐标系中,沿坐标轴方向的两偏振分量  $A_x$  和  $A_y$  满足耦合模方程:

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\Delta\beta/2 & \zeta(z) \\ -\zeta(z) & -j\Delta\beta/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\zeta(z)$ 为  $z$  点的转速; $\Delta\beta$  为不转端双折射光纤两线本征态的传播常数差。由于转速  $\zeta$  是变化的,公式(1)没有整个器件意义上的本征态,只有在  $z$  点上的“本地”本征态:

$$\begin{cases} E_1(z) = [\cos(\alpha(z)) \quad j\sin(\alpha(z))]^T \\ E_2(z) = [j\sin(\alpha(z)) \quad \cos(\alpha(z))]^T \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\alpha(z) = \text{atan}((g(z) + \Delta\beta/2) / \zeta(z)) \quad (3)$$

$$g(z) = [\zeta(z)^2 + \Delta\beta^2 / 4]^{1/2} \quad (4)$$

由公式(2)可知,在不转端  $E_1$  和  $E_2$  为两沿着高双折射光纤主轴的线偏振光,在快转端当  $\zeta(L) \gg \Delta\beta$  时, $E_1$  和  $E_2$  为两正交的圆偏振光。在旋转双折射光纤中, $E_1$  和  $E_2$  的复振幅  $W_1$  和  $W_2$  之间的关系满足方程:

$$\frac{dW(z)}{dz} = N(z)W(z) \quad (5)$$

其中耦合矩阵  $N$  可写为:

$$N(z) = \begin{bmatrix} jg(z) & -jQ(z) \\ -jQ(z) & -jg(z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Q(z) = \frac{\Delta\beta}{(\Delta\beta)^2 + 4\zeta^2(z)} \cdot \frac{d\zeta(z)}{dz} \quad (7)$$

由于耦合矩阵  $N$  不是常系数矩阵,所以  $W(z)$  没有解析解,可以用传输矩阵法来分析宽带光纤  $\lambda/4$  波片中“本地”本征态的偏振演化。当波片的转速是缓慢变化的,即  $Q(z) \ll g(z)$  时,波片中“本地”本征态的传输矩阵可简化为<sup>[14]</sup>:

$$J_{QWR} \approx \begin{bmatrix} \sqrt{1-k^2} e^{-j\vartheta} & -jk \\ -jk & \sqrt{1-k^2} e^{j\vartheta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $k = \sqrt{C} \sin(I)$ ,  $I = \int_0^L \gamma(z) dz$ ,  $\gamma(z) = \sqrt{g^2(z) + Q^2(z)}$ ,  $C = Q^2(z)/\gamma^2(L)$ ,  $\vartheta = \text{atan} \sqrt{1-C} \tan(I)$ 。公式(8)中,  $W_1$  和  $W_2$  之间的耦合由参数  $k$  决定,称之为耦合系数。耦合系数与输出端的相对转速变化有关,同时与波片中积累的双折射相位差有关。

## 2 宽带光纤 $\lambda/4$ 波片参数对 FOCS 的影响

根据上文的分析,宽带光纤  $\lambda/4$  波片的线入圆出(LICO)和圆入线出(CILO)时的琼斯矩阵可写为:

$$J_{QWR}^{LICO} = \begin{bmatrix} E_{1f} & E_{2f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_1^2} e^{-j\vartheta_1} & -jk_1 \\ -jk_1 & \sqrt{1-k_1^2} e^{j\vartheta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1u} \\ E_{2u} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J_{QWR}^{CILO} = \begin{bmatrix} E_{1u} & E_{2u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_2^2} e^{-j\vartheta_2} & -jk_2 \\ -jk_2 & \sqrt{1-k_2^2} e^{j\vartheta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1f} \\ E_{2f} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $E_{1u}$  和  $E_{2u}$  为波片不转端的两本征态;  $E_{1f}$  和  $E_{2f}$  为波片快转端的两本征态。全光纤电流互感器如图2所示。光源的光经过起偏器后,被保偏光纤耦合器分为两路,沿顺时针方向和逆时针方向通过传感光纤,并在起偏器处干涉。 $\lambda/4$  波片实现线偏振光和圆偏振

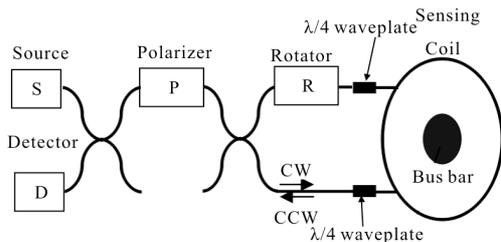


图 2 全光纤电流互感器示意图

Fig.2 Schematic of the all-fiber optic current sensor

光间的转换,移相器为法拉第旋光器件,利用磁光效应在顺时针和逆时针的光之间提供一个  $\pi/2$  的非互易相移。假设其他器件都是完备的,只考虑光纤  $\lambda/4$  波片的影响:

$$E_{CW} = e^{j\pi/4} J_P J_{QWR}^{CILO} J_{Coil}^{CW} J_{QWR}^{LICO} E_{in} \quad (11)$$

$$E_{CCW} = e^{j\pi/4} J_P J_{QWR}^{CILO} J_{Coil}^{CCW} J_{QWR}^{LICO} E_{in} \quad (12)$$

式中:  $E_{in}$  为入射的线偏振光;  $J_P$  为起偏器的琼斯矩阵。顺时针光纤环和逆时针光纤环的琼斯矩阵分别为:

$$J_{Coil}^{CW} = \begin{bmatrix} \cos(VNI) & -\sin(VNI) \\ \sin(VNI) & \cos(VNI) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_{Coil}^{CCW} = \begin{bmatrix} \cos(VNI) & \sin(VNI) \\ -\sin(VNI) & \cos(VNI) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $I$  为输入电流;  $V$  为光纤的韦尔代常数;  $N$  为光纤环的匝数。由于在快转端,  $\zeta \gg d\zeta/dz$ , 因此  $k_1 \approx 0$ , 经过推导,FOCS 的标度因数 (输出信号随输入电流的变化率)为:

$$S = \left. \frac{dR}{dI} \right|_{I=0} = 2KVN|Y| \cos(\varphi_Y) \quad (15)$$

式中:  $R$  为 FOCS 的输出信号,为了消除光功率变化的影响,  $R$  为系统输出交流信号和直流信号的比值<sup>[15]</sup>,  $K$  是一个和电路有关的常数。  $Y$  和  $\varphi_Y$  如下式所示:

$$|Y|^2 = \sin^2(2\alpha) + \frac{k_2}{\sqrt{1-k_2^2}} \sin(4\alpha) \cos(\vartheta_2) \quad (16)$$

$$\varphi_Y = -\text{atan} \left[ \frac{k_2 \cos(2\alpha) \sin(\vartheta_2)}{\sqrt{1-k_2^2} \sin(2\alpha) + k_2 \cos(2\alpha) \cos(\vartheta_2)} \right] \quad (17)$$

从式中可以看出,宽带  $\lambda/4$  波片对 FOCS 标度因数的影响主要由不转端耦合系数  $k_2$  和快转端本征态的椭圆度角两个参数决定。当  $k_2 = 0$  时,标度因数  $S = 2KVN \sin(2\alpha)$ , 即  $S$  由宽带光纤  $\lambda/4$  波片快转端的本征态决定。当  $k_2 \neq 0$ ,  $\alpha = \pi/4$  时,标度因数  $S = 2KVN$ 。当  $k_2 \neq 0$  时,且  $\alpha \neq \pi/4$  时,标度因数受到非主要本征态的影响。 $\vartheta_2$  是旋转双折射光纤两本征态的相位差,其值的大小是很难控制的,但是他对标度因数的影响受到  $\frac{k_2}{\sqrt{1-k_2^2}}$  的约束。图 3 为当  $\alpha$  取不同值时,标度因数误差随  $k_2$  和  $\vartheta_2$  的变化情况。从图中可以看出,  $k_2$  越小,误差的变化范围越小。波片快转端本征

态越接近圆偏振,误差的变化范围越小。因此宽带  $\lambda/4$  波片的制作要求应该是:快转端本征态尽可能接近圆;波片转速的变化要满足缓变条件,使得耦合系数  $k_2$  尽可能小。

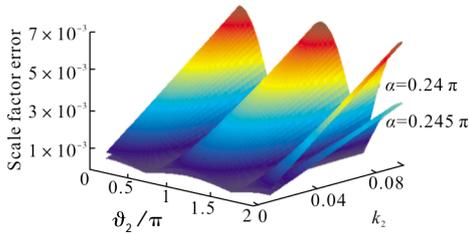


图 3 宽带光纤  $\lambda/4$  波片的参数对 FOCT 标度因数稳定性的影响  
Fig.3 Influence of the broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate on the scale factor stabilities of the FOCT

### 3 实验和讨论

根据上文的分析,宽带光纤  $\lambda/4$  波片对 FOCT 系统的影响主要取决于两个参数  $\alpha$  和  $k_2$ 。 $\alpha$  代表快转端本征态, $k_2$  代表圆进线出时,两“本地”本征态间的耦合系数。测量装置如图 4 所示,1 550 nm 的激光器输出的光经过偏振控制器(Polarization Control, PC)后,注入宽带光纤波片,输出偏振态由偏振仪检测。宽带光纤波片的不转端双折射为  $\Delta\beta=1\ 000$  rad/m 快转端最大转速为  $\zeta_{\max}=8\ 000$  rad/m,转速变化曲线为直线型,波片长度为  $L=0.2$  m,基本符合缓变要求。

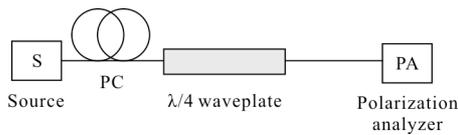


图 4 测量系统示意图  
Fig.4 Schematic of the measurement set-up

首先测量快转端的本征态。由于在快转端  $\zeta_{\max} \gg \Delta\beta$ , 所以温度的变化对快转端本征态的影响不大。快转端的本征态可通过邦加球上的轨迹来确定。在宽带光纤  $\lambda/4$  波片的不转端输入圆偏振态,此时波片中的两本征态的强度是相同的,改变波片不转端中双折射引起的相位差  $\vartheta_2$  (如改变温度、长度等),输出光在邦加球上的轨迹是一个过球心的圆,圆的旋转对称轴与邦加球的交点即为波片快转端的本征态。测量结果如图 5 所示。从图中可以得出宽带光纤

$\lambda/4$  波片快转端的本征态参数为  $\alpha=0.242\pi$ 。

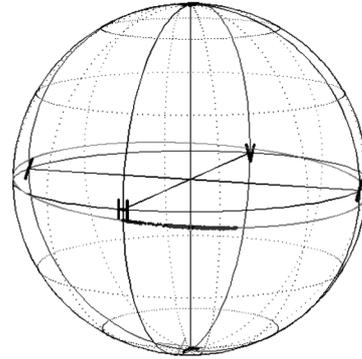


图 5 宽带光纤  $\lambda/4$  波片快转端本征态  
Fig.5 Eigenmode of the broad-band fiber-optic  $\lambda/4$  waveplate

当确定了快转端的本征态后,就能通过不转端输出光的邦加球轨迹获得参数  $k_2$  了。在宽带光纤  $\lambda/4$  波片的快转端注入圆偏振态,此时不转端输出的两圆偏振光的振幅为:

$$\begin{bmatrix} W_R \\ W_L \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_2^2} (Ae^{-j\vartheta_2} + Be^{j\vartheta_2}) + k_2(B-A) \\ \sqrt{1-k_2^2} (Ae^{-j\vartheta_2} - Be^{j\vartheta_2}) + k_2(B+A) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中:  $A=\cos(\alpha)+\sin(\alpha)$ ;  $B=\cos(\alpha)-\sin(\alpha)$ 。容易推导出,右旋圆偏振光和左旋圆偏振光光强的比值  $\text{Ratio} = |W_R|^2 / |W_L|^2$  的最大值和最小值之差与耦合系数  $k_2$  成单调的函数关系。因此,只要改变波片不转端中双折射引起的相位差  $\vartheta_2$ ,测得两圆偏振光光强比值的变化的情况,就能得到不转端输出时的耦合系数  $k_2$ 。图 6 为当宽带光纤  $\lambda/4$  波片的温度  $T$  分别为  $-40^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$ 、 $0^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$  和  $60^\circ\text{C}$  时,测得的耦合系数  $k_2$ 。

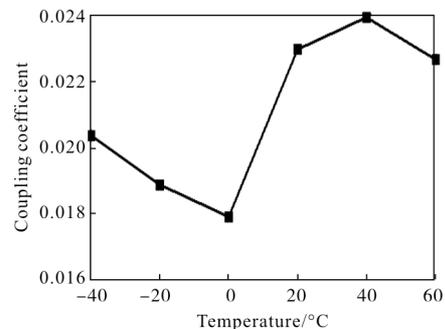


图 6 不转端耦合系数和温度的关系  
Fig.6 Relationship between the coupling coefficient of the un-spun and the temperature

将所测得的光纤  $\lambda/4$  波片的两个参数  $\alpha$  和  $k_2$  分别代入公式(15),可以估算出由波片的温度效应引起的 FOCS 系统的标度因数波动最大值为 0.12%。保偏光纤制作的窄带光纤  $\lambda/4$  波片的相位差随温度变化成线性关系, $\Delta\beta$  的温度线性系数约为  $-10^{-3}/^\circ\text{C}^{[10]}$ ,因此波片引入的相位延迟与温度的关系可写为:

$$\varphi = \pi/2 - 0.27\pi \times (T - T_0)/180 \quad (19)$$

假设窄带光纤波片与起偏器的夹角为  $45^\circ$ ,将窄带波片的琼斯矩阵代入 FOCS 的光路模型,可算出由窄带波片的温度效应引起的 FOCS 系统的标度因数波动最大值为 2.6%。两者的比较如图 7 所示,宽带光纤波片的温度效应影响要远小于窄带光纤波片。

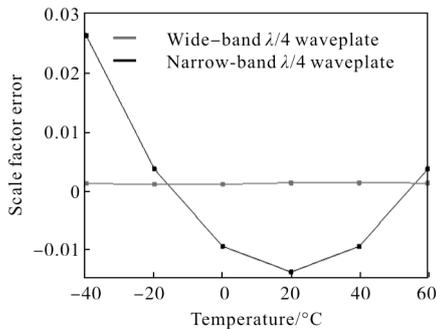


图 7 标度因数误差和温度的关系

Fig.7 Relationship between the scale factor error and the temperature

## 4 结论

宽带光纤  $\lambda/4$  波片可实现线偏振光和圆偏振光间的相互转换,且具有较宽的工作带宽。但是将宽带光纤  $\lambda/4$  波片用于 FOCS 的研究目前很少,特别是宽带光纤  $\lambda/4$  波片的温度特性是否能满足 FOCS 的工程需求需要进一步的研究。文中结合 FOCS 的光路模型,分析了宽带光纤波片中快转端本征态及本征态间的耦合对全光纤电流互感器性能的影响。通过输出偏振态在邦加球上的轨迹实验确定了宽带光纤波片这两个重要参数的温度特性。实验结果表明,当转速变化曲线满足一定的条件时,宽带光纤波片的温度效应对电流互感器的影响远小于窄带光纤波片,在  $-40\sim 60^\circ\text{C}$  范围内,宽带光纤  $\lambda/4$  波片对 FOCS 的标度因素影响小于 0.2%,其温度性能明显优于窄带光纤  $\lambda/4$  波片。因此,将宽带光纤波片用于 FOCS,有利于提高 FOCS 的温度稳定性。

## 参考文献:

- [1] Jing Shimei, Zhang Xuanyu, Liang Jufa, et al. Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics [J]. Chinese Optics, 2017, 10 (4): 449-454. (in Chinese)
- [2] Wang Huaping, Xiang Ping. Optimization design of optical fiber sensors based on train transfer theory [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(6): 1233-1241. (in Chinese)
- [3] Gu Hongcan, Huang Junbin, Cheng Ling, et al. 20-1 250 Hz fiber laser acceleration sensing system [J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 469-476. (in Chinese)
- [4] Li Wencho, He Jiahuan, Li Zhiquan, et al. Research on novel two-channel selective SPR optical fiber sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 0322002. (in Chinese)
- [5] Yang Yuqiang, Yang Qun, Ge Wei, et al. Temperature compensated GMM-FBG current sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2377-2382. (in Chinese)
- [6] Li Yansong, Li Xia, Liu Jun, et al. Mechanism analysis and modeling on the sensing of fiber-optic current transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 (23): 6560-6569. (in Chinese)
- [7] Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xiaoxiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46. (in Chinese)
- [8] Li Chuansheng, Shao Haiming, Zhao Wei, et al. Fiber-optic current sensing technique utilized for ultra-high current value transfer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46 (7): 0722001. (in Chinese)
- [9] Jia Kai, Yao Shouquan. Temperature characteristics of fiber quarter-waveplate [J]. Journal of Shanghai University, 2009, 15(5): 457-460. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi, Zhang Chaoyang, et al. Research on temperature characteristic of quarter-wave plate and its effect on fiber optical current transformers [J]. Laser and Infrared, 2006, 36(7): 596-598. (in Chinese)
- [11] Huang Hunchia. Broad-band fiber-optic wave plates: US, 7340117[P]. 2007-04-17.
- [12] Zhu X, Jain R. Detailed analysis of evolution of the state of polarization in all-fiber polarization transformers [J]. Optics Express, 2006, 14(22): 10261-10277.
- [13] Rose A, Feat N, Etzel S. Wavelength and temperature

- performance of polarization-transforming fiber [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(34): 6897-6904.
- [14] Xiao Yueyu, Yang Huixiang. Theoretical study on the stability of practical polarization transformers [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(12): 5035-5039.
- [15] Zhuang Jing, Xiao Yueyu, Peng Lei, et al. Measurement of Verdet constant in fiber optical current transducer using an optimization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 32(11): 1128003. (in Chinese)