

# 基于法拉第旋光器的光纤干涉仪传感探头的设计与改进

井帅奇, 荣健\*, 田佳艳

电子科技大学物理学院, 四川 成都 611731

**摘要** 为解决光纤干涉仪输出条纹可见度受单模光纤双折射效应引起的偏振衰落影响, 提出一种消除偏振衰落的简单方法, 该方法可同时实现光纤干涉仪传感器的空间点探测。设计一种内置旋转角度为  $45^\circ$  的法拉第旋光器的传感探头, 将其与旋转角度为  $45^\circ$  的法拉第旋转镜分别加在 Michelson 光纤干涉仪的两端。对干涉仪系统进行了理论计算分析, 在外界环境变化和偏振控制器改变条件下进行干涉仪可见度测量实验。结果表明: 该方法在对外界进行点探测的同时能够有效克服光纤干涉仪的偏振衰落, 得到了变化小于  $0.9\%$  的干涉稳定度。

**关键词** 光纤光学; 干涉仪; 偏振; 琼斯矩阵; 法拉第旋光器; 可见度

**中图分类号** TP212.1; TN913.7

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.050601

## Design and Improvement of Optical Fiber Interferometer Sensor Based on Faraday Rotator

Jing Shuaiqi, Rong Jian\*, Tian Jiayan

School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** The visibility of output stripes from a fiber interferometer is affected by the polarization fading caused by the birefringence effect of a single-mode fiber. To solve this problem, we propose a simple depolarization fading method. This method can also realize the space point detection of an optical fiber interferometer sensor. A sensor probe with a built-in Faraday rotator which is with a rotation angle of  $45^\circ$  is designed, and a Faraday rotating mirror with a rotation angle of  $45^\circ$  is used. They are added in the two ends of a Michelson fiber interferometer. In this paper, the interferometer system is theoretically calculated and analyzed, and the visibility measurement experiment of the interferometer is carried out when the external environment and the polarization controller are changed. The results show that this method can effectively overcome the polarization fading of the fiber interferometer when we conduct the point detection in the outside world, and it can obtain the interference stability with variation less than  $0.9\%$ .

**Key words** fiber optics; interferometer; polarization; Jones matrix; Faraday rotator; visibility

**OCIS codes** 060.2370; 060.5060; 280.4788

## 1 引言

光纤 Michelson 干涉仪是一种简单、体积小、质量轻的结构装置, 其灵敏度高, 且具有高分辨的信号解调能力, 广泛应用于光纤传感和光纤通信领域<sup>[1-6]</sup>。普通单模光纤受双折射效应的影响, 会使干涉仪两臂的偏振态发生随机变化, 导致输出干涉信

号的可见度发生变化, 影响解调结果, 严重时可能导致无法解调。保偏光纤虽然具有保持光偏振态的能力, 但其价格昂贵且部分保偏器件性能不够完善的缺陷, 限制了其应用。目前国内外研究学者对偏振衰落的控制进行了很多研究<sup>[7-16]</sup>, 也提出多种方法: 文献[12]采用基于现场可编程门阵列(FPGA)的偏振控制器反馈控制技术, 实现了对偏振态的实时监

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-05; 录用日期: 2019-08-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(ZYGX2015J146)

\* E-mail: rongj@uestc.edu.cn

测与反馈控制;文献[13]介绍了通过在 Michelson 光纤干涉仪两端加法拉第旋转镜(FRM)实现消除偏振衰落的方法;文献[14]研究了利用偏振分集技术消除干涉型光纤传感器中偏振衰落问题的原理与实现方法。

目前对光纤偏振的研究大多数处于理论实验阶段,因所研究结构复杂、成本高、效果不理想,未能应用到实际中。基于法拉第旋转镜消偏振的方法,容易实施且取得了良好的效果,但是该方法需要保证光沿干涉臂传输且经过法拉第旋转镜后原路返回,这限制了它的传感应用。本文在分析法拉第旋转镜消偏振理论的基础上,提出并设计了一种新的可以消除偏振的传感探头。通过在准直器和消色差透镜之间加入旋转角度为  $45^\circ$  的法拉第旋光器组成消偏振传感探头,结合法拉第旋转镜搭建了 Michelson 光纤干涉仪。光纤干涉仪的其中一路光经传感探头聚焦到物体表面,传感探头再接收反射光,实现对物体表面的点探测。在自然环境条件下和偏振控制器旋转条件下,可通过可见度测量验证光纤干涉仪良好的消除偏振衰落的效果。本文研究实现了一种在对偏振衰落进行简单、有效控制条件下对物体表面进行点探测的方法,该方法在物体高频率振动探测、高分辨率成像方面具有实际应用价值。

## 2 方法与理论分析

### 2.1 法拉第旋转镜法消偏振衰落理论

基于法拉第旋转镜的 Michelson 光纤干涉仪结构如图 1 所示,在普通的 Michelson 光纤干涉仪两臂末端各加一个 FRM,当旋转镜角度为  $45^\circ$  时,入射光的偏振态变化刚好与反射光偏振态变化相抵消,使干涉仪输出的条纹可见度为 1。

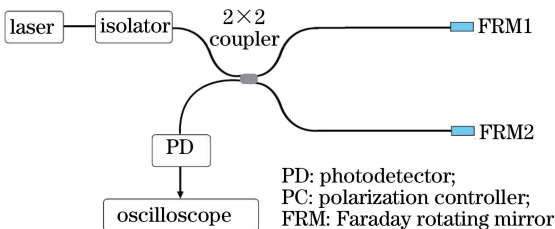


图 1 基于法拉第旋转镜的 Michelson 光纤干涉仪示意图

Fig. 1 Diagram of Michelson fiber interferometer based on Faraday rotating mirror

设法拉第旋转镜的角度为  $\theta$ ,光通过法拉第旋转镜被反射回来并再次经过法拉第旋转镜,不考虑传输损耗,这个过程可用琼斯矩阵表示为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

当  $\theta$  为  $45^\circ$  时,有

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

作为干涉仪其中一个臂的单模光纤的双折射效应可看作一个椭圆延迟器,其琼斯矩阵可表示为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{R} = \frac{\alpha}{D} \begin{bmatrix} a & -b^* \\ b & a^* \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:  $*$  为取共轭;  $\alpha$  为光纤中的传输相关系数;  $a$ 、 $b$  与光纤的双折射特性相关,满足

$$D^2 = a \cdot a^* + b \cdot b^*. \quad (4)$$

当光经过 FRM 反射,用于反向传输光的光纤可以作为一个反向椭圆延迟器,其反向传输矩阵为

$$\mathbf{R}' = \frac{\alpha}{D} \begin{bmatrix} a & b^* \\ b^* & a^* \end{bmatrix}. \quad (5)$$

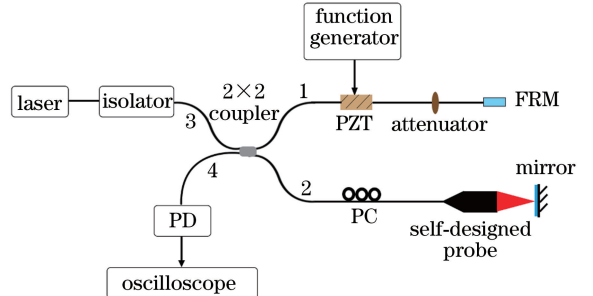
由此分析,光从一根光纤传输,先经法拉第旋转镜反射,再通过原光纤传输,整个过程的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{J} = \mathbf{R}\mathbf{T}\mathbf{R}' = \alpha^2 \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(6)式可知,整个过程的琼斯矩阵不包含与光纤本身双折射效应有关的元素。因此,可以得到:当光从一根光纤传输经过  $45^\circ$  的法拉第旋转镜反射再经过原光纤传输后,其偏振态没有因受双折射效应的影响而发生变化。

### 2.2 消偏振传感探头设计及实验系统

实验采用如图 2 所示的光纤干涉系统,光源采用中心波长为 1550 nm、线宽为 50 kHz 的窄线宽激光器。光隔离器的作用是防止反射光对光源产生影响。系统通过一个  $2 \times 2$  光纤耦合器组成一个



PD: photodetector;  
PC: polarization controller;  
PZT: piezoelectric transducer;  
FRM: Faraday rotating mirror

图 2 消偏振衰落实验系统

Fig. 2 Experimental system for depolarization fading

Michelson 光纤干涉仪,干涉仪一端接旋转角度为  $45^\circ$  的法拉第旋转镜,另一端接一个经过设计的传感探头,并与传感探头垂直放置。其中一个干涉臂中加入偏振控制器的作用是测试改变该干涉臂偏振态条件时系统的消偏振效果,压电陶瓷驱动器起相位调制器的作用,光纤衰减器的作用是调节两路干涉光的能量,使其相等。两路干涉光在  $2 \times 2$  耦合器干涉后经过光电探测器转变为干涉信号,通过示波器采集信号并对其进行分析。

经过设计的传感探头结构如图 3(a)所示,由光纤准直器、法拉第旋光器和消色差透镜三部分组成。光纤准直器可以接入光纤,把光纤中的光扩束为直

径为 7 mm 的光束。法拉第旋光器由强力永磁体围绕铁磁晶体构成,设计制作的法拉第旋光器实物如图 3(b)所示,其中心波长为 1550 nm,透过率  $\geq 90\%$ ,旋光角度为  $45^\circ$ ,中间铁磁晶体尺寸为  $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,可以使扩束后直径为 7 mm 的光束通过。消色差透镜的作用是把光束聚焦为光斑照射在物体表面,并接收反射光。探头所有部分经过严格尺寸设计,最后紧密连接在一起。由于光在空间中传播时偏振态不改变,所以光经过传感探头聚焦到物体表面并反射回来再次经过传感探头,偏振态只在经过法拉第旋光器时旋转  $45^\circ$ ,整个光传输过程与只经过法拉第旋转镜的传输过程类似。

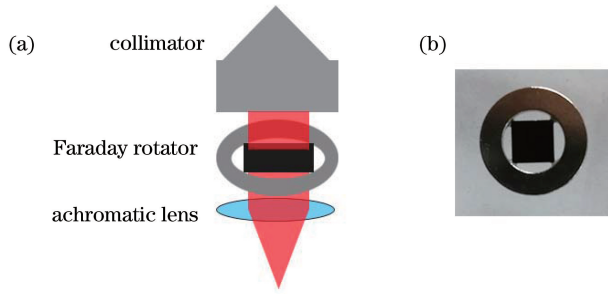


图 3 消偏振衰落传感探头。(a)传感探头结构;(b)法拉第旋光器

Fig. 3 Depolarization fading sensor probe. (a) Sensor probe structure; (b) Faraday rotator

图 2 实验系统中 Michelson 光纤干涉仪臂 1 中光从 1 端口输出经过光纤衰减器和法拉第旋转镜后返回到 1 端口整个过程的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_1 = \beta_1 \mathbf{J} = \beta_1 \alpha_1^2 \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: $\beta_1$  为光纤衰减器衰减系数; $\alpha_1$  为臂 1 光纤中的传输系数。同理,Michelson 光纤干涉仪臂 2 中光从 2 端口输出经过传感探头后返回到 2 端口整个过程的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_2 = \beta_2 \mathbf{J} = \beta_2 \alpha_2^2 \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $\beta_2$  为光经过传感探头的衰减相关系数; $\alpha_2$  为臂 2 光纤中的传输系数。

根据耦合波理论<sup>[13]</sup>,假设耦合器与偏振无关,分光比为 1:1 时, $2 \times 2$  光纤耦合器的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{13} = \mathbf{J}_{31} = \mathbf{J}_{24} = \mathbf{J}_{42} = \frac{\sqrt{2}}{2} t_J \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_{14} = \mathbf{J}_{41} = \mathbf{J}_{23} = \mathbf{J}_{32} = \frac{\sqrt{2}}{2} t_J \begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & j \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: $t_J$  为幅度传输损耗系数; $\mathbf{J}_{mn}$  ( $m, n=1, 2, 3, 4$ ) 为光纤耦合器从  $m$  端输入到  $n$  端输出的琼斯矩阵。干涉仪输入端电场强度为

$$E_{in} = E_0 e^{j\varphi}, \quad (11)$$

式中: $E_0$  为输入端电场强度的振幅; $\varphi$  为初始相位。

由(7)式和(9)~(11)式可得,Michelson 光纤干涉仪臂 1 中光从 1 端口输出到 4 端口的电场强度为

$$E_1 = \mathbf{J}_{14} \cdot \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{J}_{31} \cdot E_{in} e^{j\varphi_1} = \frac{\beta_1 t_J^2 \alpha_1^2}{2} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ -j & 0 \end{bmatrix} E_0 e^{j(\varphi+\varphi_1)}, \quad (12)$$

式中: $\varphi_1$  为臂 1 的相位延迟。同理,由(8)~(11)式可得,Michelson 光纤干涉仪臂 2 中光从 2 端口输出到 4 端口的电场强度为

$$E_2 = \mathbf{J}_{24} \cdot \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{J}_{32} \cdot E_{in} e^{j\varphi_2} = \frac{\beta_2 t_J^2 \alpha_2^2}{2} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ -j & 0 \end{bmatrix} E_0 e^{j(\varphi+\varphi_2)}, \quad (13)$$

式中: $\varphi_2$  为臂 2 的相位延迟。由(12)~(13)式分析可得, $E_1$  和  $E_2$  两个电场的偏振方向完全一致,因此两个电场叠加形成的干涉不会产生偏振衰落。两个信号干涉产生的光强为

$$I = (E_1 + E_2) (E_1 + E_2)^* =$$

$$I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (14)$$

式中: $I_1 = \left(\frac{\beta_1 t_J^2 \alpha_1^2}{2} E_0\right)^2$ ,  $I_2 = \left(\frac{\beta_2 t_J^2 \alpha_2^2}{2} E_0\right)^2$  分别是

电场  $E_1$  和  $E_2$  的光强。

### 3 实验结果及分析

示波器采集的信号由干涉光强经光电探测器转变为电压信号  $U$ , 由(14)式可得

$$U = KI = K(I_1 + I_2) [1 + V_I \cos(\varphi_1 - \varphi_2)], \quad (15)$$

式中:  $K$  为光电探测器的电压转化系数;  $V_I =$

$\frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$  为两臂光强差引起的可见度。为了准确测

试实验系统中偏振因素引起的偏振衰落情况, 需要消除两臂干涉光强度带来的影响, 分析可得: 当  $V_I = 1$ , 即  $I_1 = I_2$  时, 由光强差引起的可见度为 1, 此时干涉信号中只存在偏振因素引起的信号衰落。实验中为了做到这一点, 分 3 个步骤进行: 1) 去掉臂 1 中的法拉第旋转镜, 记录此时示波器测到的电压值; 2) 用黑色粗糙海绵覆盖在臂 2 端的反射镜上, 使示波器测量值为零; 3) 接入臂 1 中的法拉第旋转镜, 调节臂 1 中的光纤衰减器, 使示波器测量电压值与步骤 1) 中记录值相等。用 100 Hz 的正弦信号驱动压电陶瓷驱动器 (PZT), 改变干涉两臂之间的相位差, 使干涉信号在最大值和最小值之间周期性改变。干涉仪的可见度变化量为

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (16)$$

式中:  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$  分别为干涉信号的最大值和最小值。

传感探头中的法拉第旋光器被设计成可拆卸的形式, 实验测量了在偏振控制器状态不改变条件下有法拉第旋光器和无法拉第旋光器的干涉仪可见度变化, 结果如图 4 所示。可以看出: 未加入法拉第旋光器时, 可见度在 0.3~0.5 之间变化, 干涉仪两臂中光的偏振态不一致引起了干涉信号衰落并且因受到环境影响发生缓慢变化; 当加入法拉第旋光器时, 可见度接近 1, 经过数据计算得到其变化小于 0.5%, 同时计算得到可见度数据的标准差为 0.00187。进一步地, 为了说明实验系统的消偏振效果, 实验测量了在偏振控制器改变光纤中光的偏振态条件下有法拉第旋光器和无法拉第旋光器的可见度变化, 结果如图 5 所示。可以看出: 未加法拉第旋光器时, 可见度在 0.2~0.8 之间大幅度快速变化, 这说明偏振控制器确实不断改变着臂 2 中光的偏振态; 当加入法拉第旋光器时, 可见度接近 1, 经过数据计算得到其变化小于 0.9%, 同时计算得到可见度数据的标准差为 0.00224。

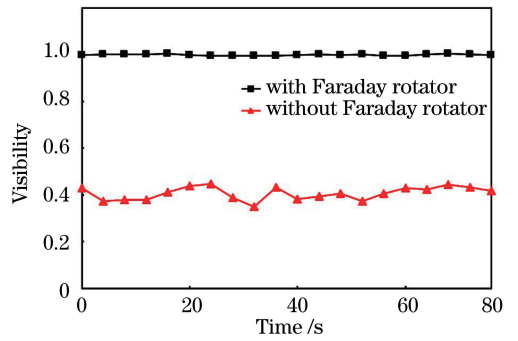


图 4 偏振控制器状态不改变时干涉仪可见度  
Fig. 4 Visibility of interferometer when the state of polarization controller does not change

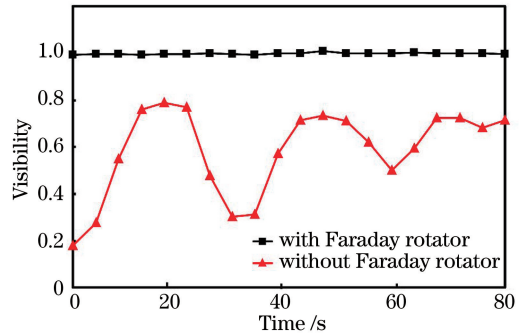


图 5 偏振控制器状态改变时干涉仪可见度  
Fig. 5 Visibility of interferometer when the state of polarization controller changes

## 4 结 论

在法拉第旋转镜消偏振衰落的原理基础上分析了本文设计的基于法拉第旋光器传感探头的光纤 Michelson 干涉仪的理论可行性。实验结果表明: 采用本文设计的实验系统得到的干涉仪信号可见度接近 1, 并且具有较高的稳定性, 从侧面反映出该系统可以较好地消除环境和人为条件下偏振态变化的干扰。下一步的研究需要采用检偏器单独测量光纤中实际偏振态变化, 以进行进一步的分析。本文方法结构简单, 容易实施, 能够得到稳定的消偏振衰落效果, 实现了对物体表面的空间光点探测, 可以帮助研究者进行高频率、高分辨率的点扫描探测, 在相关研究领域具有一定应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Tang M G, Liao B F, Liu S Q, et al. Development of interferometric optical fiber acoustic sensors[J]. Acta Optica Sinica, 1988, 8(1): 67-74.  
唐明光, 廖波帆, 刘树杞, 等. 干涉型光纤声传感器的研究[J]. 光学学报, 1988, 8(1): 67-74.

- [2] Yang J, Zhao J, Yang C N, et al. All-fiber perimeter security system based on Michelson interferometer and pattern recognition [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1105005.  
杨江, 赵健, 杨春妮, 等. 基于迈克耳孙干涉和模式识别的全光纤周界安防系统[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105005.
- [3] Wang X Y, Li X W, Wang X, et al. Design of interferometric fiber-optic weak DC electric-field sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(5): 765-768.  
王晓扬, 李新碗, 汪歆, 等. 干涉型光纤微弱直流电场传感器的设计[J]. 传感技术学报, 2008, 21(5): 765-768.
- [4] Yu Y M, Zhou X J, Ni M H. Investigation of polarization-insensitive fiber Michelson interferometric magnetic sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(5): 35-38.  
于彦明, 周晓军, 倪明环. 偏振无关光纤迈克耳孙干涉型磁场传感器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(5): 35-38.
- [5] Chen W M, Lei X H, Zhang W, et al. Recent progress of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328010.  
陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328010.
- [6] Li H Z, Wu G M, Ma Z J, et al. Preparation of fiber-optic interferometer based infrasound sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(15): 150603.  
李汉正, 吴高米, 马振钧, 等. 光纤干涉次声传感器研制[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 150603.
- [7] Kersey A D, Marrone M J, Dandridge A. Polarization diversity detection for fiber interferometers using active feedback control of output polarization-mode selection [J]. Optics Letters, 1990, 15(22): 1315-1317.
- [8] Kersey A D, Marrone M J, Davis M A. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. Electronics Letters, 1991, 27(6): 518-520.
- [9] Zhang W H, Guo Z, Niu J H, et al. Study on polarization diversity receiving technology based on heterodyne demodulation [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2017(5): 28-32.  
张文华, 郭振, 牛疆航, 等. 基于外差解调的偏振分集接收技术的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2017(5): 28-32.
- [10] Yariv A. Operator algebra for propagation problems involving phase conjugation and nonreciprocal elements[J]. Applied Optics, 1987, 26(21): 4538-4540.
- [11] Jing Z G, Yin K, Zhang M, et al. Polarization induced fading eliminating technique for interferometric optical fiber sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 2024-2028.  
荆振国, 殷楷, 张敏, 等. 干涉型光纤传感器的消偏振衰落技术研究[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2024-2028.
- [12] Li P C, Liu K, Jiang J F, et al. Research on polarization control of distributed optical fiber sensing system based on FPGA [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0510002.  
李鹏程, 刘琨, 江俊峰, 等. 基于FPGA的分布式光纤传感系统偏振控制研究[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0510002.
- [13] Li Z N, Shen L, Ye X F. Study of polarization-insensitive fiber optic Michelson interferometric sensors [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(1): 44-46.  
李志能, 沈梁, 叶险峰. 偏振无关的Michelson光纤传感器的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(1): 44-46.
- [14] Ni M, Cao C Y, Hu Z L, et al. Polarization diversity technology and its application in fiber optic sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706005.  
倪明, 曹春燕, 胡正良, 等. 偏振分集技术及其在光纤传感器中的应用[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706005.
- [15] Hu Z L, Jiang P, Ma L N, et al. Suppression of polarization induced signal fading and phase noise utilizing orthogonal-polarization switching method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0910001.  
胡正良, 蒋鹏, 马丽娜, 等. 利用正交偏振切换抗偏振衰落和抑制偏振噪声[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0910001.
- [16] Liu D M, Sun J Q, Lu P, et al. Optical fiber of the light[M]. Beijing: Science Press, 1995: 194-219.  
刘德明, 孙军强, 鲁平, 等. 光纤光学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 194-219.