

文章编号: 0258-7025(2010)06-1467-06

# 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现

陈信伟 张红霞 贾大功 刘铁根 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 基于保偏光纤(PMF)偏振耦合原理设计了分布式保偏光纤应力传感系统。对一长为 1050 m 的保偏光纤进行了实验,确定了系统的测量灵敏度和空间分辨率。测试了耦合强度与应力大小的关系及温度对系统的影响。实验结果表明,该传感系统能检测大于 1000 m 的保偏光纤,测量灵敏度和空间分辨率随光纤长度的增加而逐渐衰减,温度低于 100 °C 时,其波动对测量影响很小。从理论上分析了保偏光纤双折射色散对系统的影响。通过旋转半波片调节检偏器检偏角提高了系统测量灵敏度,通过优化检偏角,系统测量灵敏度为 85 dB,最大空间分辨率为 98 mm。

**关键词** 光纤光学;分布式光纤传感器;保偏光纤;偏振模耦合;白光干涉

中图分类号 TN247;TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1467

## Implementation of Distributed Polarization Maintaining Fiber Polarization Coupling Pressure Sensing System

Chen Xinwei Zhang Hongxia Jia Dagong Liu Tiegeng Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technical Science, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** A distributed polarization maintaining fiber (PMF) pressure sensing system is presented based on polarization mode coupling in PMF. A 1050 m long fiber is tested and the measurement sensitivity and spatial resolution are determined. The relationship between coupling intensity and the size of the force as well as the influence of temperature on the system are tested. The experimental results show that the maximum detectable fiber length is longer than 1000 m. The measurement sensitivity and spatial resolution will decrease with the increase of fiber length. The temperature impact on this sensing system is very small when it is lower than 100 °C. The influence of birefringence dispersion of the PMF on the system is also analyzed. The measurement sensitivity can be improved by a rotatable half wave plate to adjust the rotation polarization angle of the analyzer. The measurement sensitivity of the sensing system is 85 dB and the maximum spatial resolution is 98 mm by adjusting the rotation polarization angle of the analyzer.

**Key words** fiber optics; distribute optical fiber sensors; polarization maintaining fiber; polarization mode coupling; white light interferometry

## 1 引 言

保偏光纤(PMF)受到外力、磁场、弯曲、扭转等因素的扰动时会发生偏振耦合现象,通过对保偏光纤偏振耦合的测量可实现扰动物理量的传感。白光干涉偏振耦合分布式保偏光纤传感器由于其高空间

分辨率和宽动态范围而被广泛应用于应力、应变、温度、气体和位置传感<sup>[1~3]</sup>。它最大的特点是能在单根光纤上实现分布式传感,光纤上的任何部位都可以作为传感元。由于保偏光纤具有偏振保持能力,使得在测量过程中不需要考虑偏振控制问题。

收稿日期: 2010-03-14; 收到修改稿日期: 2010-04-05

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327806)、国家自然科学基金(60377031)、教育部新教师博士点基金(200800561022)和天津市自然科学基金(095CYBJC01300)资助课题。

作者简介: 陈信伟(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤传感和测试等方面的研究。E-mail: cxw553@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、嵌入式图像检测技术和防伪检测技术等方面的研究。E-mail: tgliu@tju.edu.cn

利用保偏光纤偏振耦合原理实现应力传感有偏振时域反射法 (POTDR)<sup>[4]</sup>、迈克耳孙白光干涉法<sup>[5]</sup>、调频载波 (FMCW) 法<sup>[6]</sup>、锁模光纤环激光器法<sup>[7]</sup>、基于 Kerr 效应检测法<sup>[8]</sup>、波长检测干涉法<sup>[9]</sup>及合成光学相干函数法<sup>[10]</sup>。其中白光迈克耳孙干涉法以其结构简单、测量精度高而被广泛应用。目前,所有这些方法只有偏振时域反射法有文献给出了长度超过 1000 m 的光纤测量数据,但其存在空间分辨率不高、结构复杂等问题。

本文对一长为 1050 m 保偏光纤进行了分布式应力检测,从实验上确定了耦合强度测量值与空间分辨率随光纤长度的变化关系,验证了力致耦合强度与应力大小的关系。通过引入一可旋转半波片实现了测量精度的提高。最后,分析了光纤双折射色散对测量精度的影响。

## 2 检测原理

白光干涉偏振耦合分布式保偏光纤传感系统基于保偏光纤偏振耦合原理。它利用外界扰动引起保偏光纤发生偏振耦合,通过迈克耳孙干涉仪解调得到扰动点的位置和大小,其结构如图 1 所示。

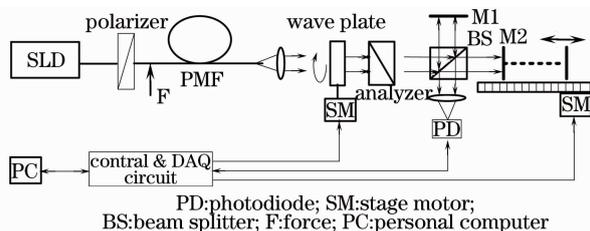


图 1 传感系统结构图

Fig. 1 System schematic of sensing system

超辐射发光二极管 (SLD) 发出的光经光纤起偏器后进入保偏光纤,光纤起偏器通过保偏适配器与保偏光纤对接,引起一个激发模在光纤中传输。当保偏光纤某个位置受到外力作用时,会使该点发生偏振耦合而激发出一个与输入光波偏振方向正交的耦合模。携带扰动信息的光波入射到可旋转的半波片上,通过检偏器后进入迈克耳孙干涉仪。由于光纤偏振模色散的存在使得两模式在光纤出射端存在时延差  $\Delta\tau$ ,通过移动迈克耳孙干涉仪中的扫描镜补偿这个时延差而得到干涉信号,它可表示为<sup>[11]</sup>

$$I_{\text{out}} = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ - \left( \frac{d}{L_c} \right)^2 \right] \cos(k_0 d) + \sqrt{h - h^2} \exp \left( - \frac{L_c^2 d^2}{2} \right) \cos(\Delta\beta l - k_0 d) \right\}, (1)$$

式中  $I_0$  为干涉直流分量,  $\Delta\beta$  为保偏光纤两特征轴传

播常数差,  $L_c$  为光源相干长度,  $d$  为迈克耳孙干涉仪两臂光程差,  $k_0$  为光在真空中的传播常数,  $h$  为耦合点耦合强度,  $l$  为耦合点距光纤出射端的长度。图 2 表示光纤中有一个耦合点的干涉图。

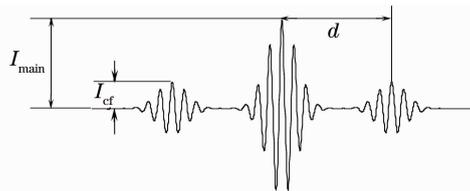


图 2 一个耦合点时的输出干涉图

Fig. 2 Read out of the interferogram of one coupling point

由(1)式可得耦合点位置为

$$l = \frac{k_0 d}{\Delta\beta} = \frac{d L_b}{\lambda}, (2)$$

式中  $L_b$  为保偏光纤拍长。耦合强度与干涉信号包络的幅值关系为<sup>[11]</sup>

$$h = 10 \ln(I_{\text{cf}}/I_{\text{main}})^2, (3)$$

式中  $I_{\text{cf}}$  为激发模与耦合模干涉包络的幅值,  $I_{\text{main}}$  为激发模干涉包络的幅值。分布式传感系统不仅体现在能定位各扰动点的位置,还能测量其大小。本系统根据干涉仪两臂光程差  $d$  实现受力点的位置定位,通过测量耦合点耦合强度来确定力的大小。受力点耦合强度与光纤受力大小和方向的关系为<sup>[12]</sup>

$$h = F^2 \sin^2(2\alpha) \times \left\{ \frac{\sin \left[ \pi \sqrt{1 + F^2 + 2F \cos(2\alpha)} (1/L_b) \right]}{\sqrt{1 + F^2 + 2F \cos(2\alpha)}} \right\}^2, (4)$$

式中  $F$  为应力大小,  $\alpha$  为应力方向。传感系统的空间分辨率  $L_R$  为<sup>[13]</sup>

$$L_R = \frac{\lambda L_b}{\Delta\lambda}, (5)$$

式中  $\Delta\lambda$  为光源谱宽,  $\lambda$  为光源中心波长。

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 系统测量灵敏度及空间分辨率测试

实验中被测光纤是一长为 1050 m 的熊猫保偏光纤,拍长为 2.6 mm,平移台导轨的分辨率为 100 nm。光源为高斯型光谱分布的 SLD 光源,中心波长为 1328 nm,谱宽为 35.8 nm。在光纤不同位置随机施加 15 个应力,光纤检测结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,系统的测量灵敏度为 65 dB,分布在保偏光纤中的各个受力点均可以在一次扫描中被检测出来,图中 A 为干涉仪两臂光程差为零的位置, B 为保偏光纤与光纤起偏器连接点, C 为跳变噪声信号。由于耦合点干涉包络宽度与光源谱宽有

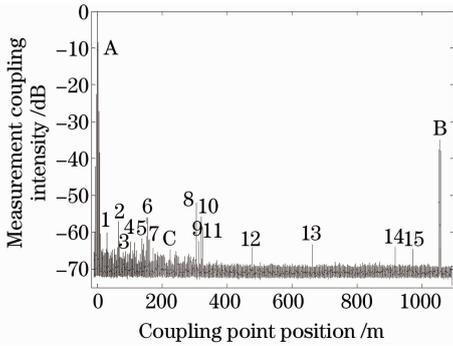


图 3 保偏光纤耦合点检测结果

Fig. 3 Measured mode coupling distribution for a 1050 m PMF

关,因此可以从信号的包络宽度来区分耦合点和干扰信号。本系统测量到的光纤出射端跳线位置为 1048.8 m,应力大小可通过各点耦合强度来计算,从而实现了系统的分布式检测。由于起偏器与保偏光纤连接处相当于一个固有耦合点,保持此连接不变,通过熔接不同长度的光纤来确定耦合强度测量值及空间分辨率与耦合点距光纤出射端长度的关系,实验结果如图 4 所示。可以看到,它们都随着光纤长度的增加而降低,系统最大空间分辨率为 98 mm,而根据(5)式得到的理论值为 96.4 mm,测量绝对误差为 1.6 mm,当耦合点距光纤出射端长度为 1050 m 时,空间分辨率降至 865 mm。

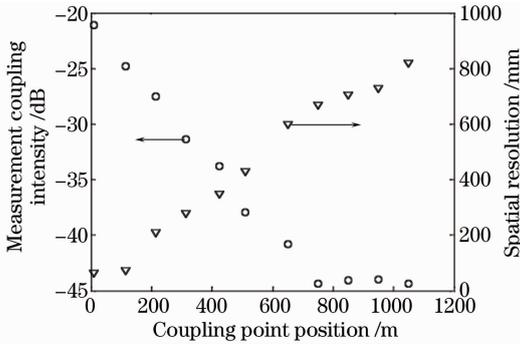


图 4 耦合强度及空间分辨率测量值与光纤长度的关系

Fig. 4 Measurement coupling intensity and spatial resolution versus fiber length

由于光纤中两模式的光强相差很大,导致干涉条纹对比度很低。通过改变两模式的光强比可增加干涉条纹的对比度,从而提高测量灵敏度。实验中有三种解决办法:1)是改变两模式与检偏器偏振主轴的夹角,即检偏器检偏角;2)是改变迈克耳孙干涉仪两臂反射镜的反射率比值;3)是改变分束器的分光比。其中在检偏器前加一可旋转的半波片能实现检偏角的任意角度变化,具有动态范围调节宽、易于实现等特点。相对于检偏角为 45°时,干涉条纹对

比度增益与耦合强度及检偏角  $\theta$  的关系<sup>[11]</sup>为

$$R^2 = 4h \cdot 10 \tan^2 \theta. \tag{6}$$

实验时,通过转台旋转半波片,检偏角度变化范围为 5°~85°,干涉条纹对比度增益与角度的关系曲线如图 5 所示。从图中可以看到实验值和理论模拟值非常符合,当检偏角为 5°时,条纹对比度提高了 10 dB,即耦合强度测量灵敏度提高了 100 倍。经过检偏角度的优化后,系统测量灵敏度可达 85 dB。

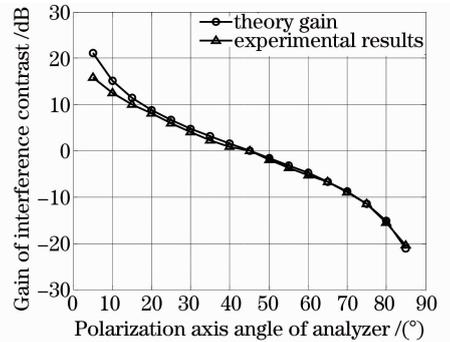


图 5 各检偏角度的对比度增益

Fig. 5 Influence of the rotation angle of the analyzer on interference contrast

### 3.2 应力传感测试

实验时采用作用长度为 9.4 mm 的施力装置,测量结果如图 6 所示。图中实线为根据(4)式得到的理论曲线,小圆圈为实验值。从实验结果可见,实验数据的变化趋势与理论是相同的,而且与理论数据基本重合。理论值与实验值之间的偏差主要是由于施力角度的不准确造成的。由(4)式并根据耦合强度检测精度可知,45°方向上应力大小的检测精度为 0.0027 kg/mm。

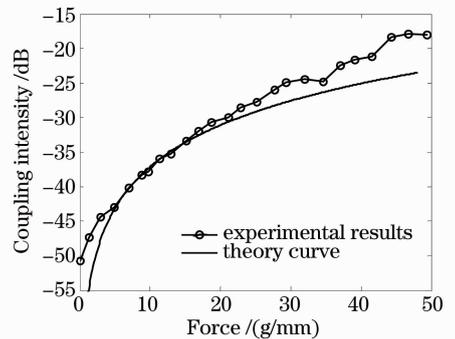


图 6 力的大小与耦合强度的变化关系

Fig. 6 Coupling intensity versus the force applied to the fiber

### 3.3 温度稳定性测试

将一段长为 12.908 m 的保偏光纤分别放置于 18 °C 和 93 °C 的水中,对光纤两固有耦合点进行检测。为了避免施力夹具受温度变化而改变其物理特

性,实验中两被测耦合点是随机受力形成的不可恢复的永久固有耦合点。图7为光纤在两温度下的实验结果,图中1和2为光纤中的两固有耦合点,A为干涉仪两臂光程差为零的位置,B为保偏光纤与光纤起偏器连接点,C为光纤起偏器中的固有耦合点。表1为图7中耦合点1和2在两个不同温度下的耦合强度值及位置的测量值。从检测结果可以看出,温度的改变不会引起新的耦合点,这一点与理论分

析相符<sup>[14]</sup>。从表1可以看到耦合点的耦合强度受温度的影响有2 dB的微小变化,原因在于温度的变化会使耦合点处两偏振态产生耦合,这与文献[5, 14]的分析一致。由于温度在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时对光纤的影响很弱<sup>[15]</sup>,且实验所用光纤很短,可以看到不同温度下检测结果只表现出微小差异。

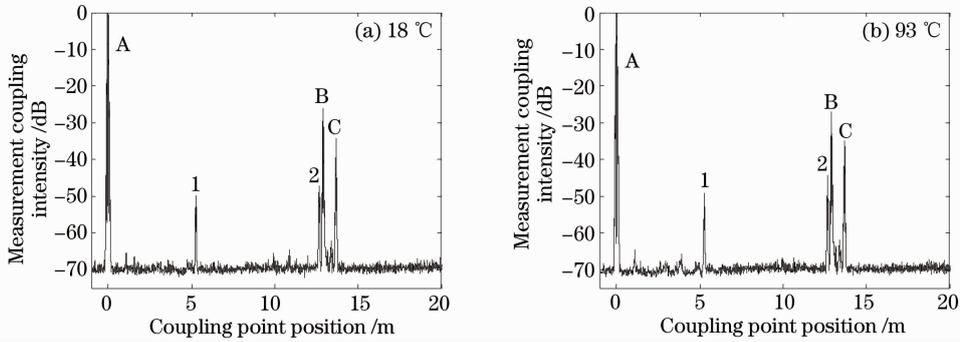


图7 不同温度下耦合点耦合强度的检测

Fig. 7 Measured mode coupling intensity at different temperatures

表1 不同温度下耦合点耦合强度及位置测量值

Table 1 Measured coupling intensity and position of coupling point at different temperatures

Coupling point	18 °C		93 °C	
	Coupling intensity /dB	Position /m	Coupling intensity /dB	Position /m
1	-51.02	5.267	-49.25	5.270
2	-46.23	12.657	-44.30	12.680

### 3.4 影响测量主要因素分析

实验中发现耦合强度测量值及空间分辨率随耦合点距光纤出射端长度的增加而降低,一个重要的原因是保偏光纤存在双折射色散。色散的影响广泛

存在于利用白光迈克耳孙干涉仪的各种测量中<sup>[16]</sup>。保偏光纤两特征轴传播常数差 $\Delta\beta(\omega)$ 与波长有关, $\Delta\beta(\omega)$ 可展开成泰勒级数形式

$$\Delta\beta(\omega) = \beta_x(\omega) - \beta_y(\omega) = \frac{\omega_0}{c}\Delta n + \frac{\omega - \omega_0}{c}\Delta N - \pi c \frac{(\omega - \omega_0)^2}{\omega_0^2}\Delta D, \quad (7)$$

式中 $c$ 为光速, $\omega_0$ 为光谱中心频率, $\omega$ 为光波频率, $\Delta n$ 为相位双折射, $\Delta N$ 为群双折射, $\Delta D$ 为光纤双折射色散。 $\Delta D$ 可以表示为

$$\Delta D = d\tau/d\lambda = -[\omega_0^2/(2\pi c)](d^2\Delta\beta/d\omega^2)|_{\omega=\omega_0}. \quad (8)$$

考虑光纤双折射色散的影响,干涉仪输出光强可表示为

$$I_{\text{DS-out}} = I_0 \left\{ 1 + \exp\left[-\left(\frac{d}{L_c}\right)^2\right] \cos(k_0 d) + \frac{\sqrt{h-h^2}}{\sqrt{1+\eta^2}} \exp\left[-\frac{1}{1+\eta^2} \frac{(\Delta N l - d)^2}{2L_c^2}\right] \right\} \times \cos\left[-\frac{\eta}{1+\eta^2} \frac{(\Delta N l - d)^2}{2L_c^2} + k_0(\Delta n l - d) + \frac{1}{2} \arctan \eta\right], \quad (9)$$

式中 $\eta = (\Delta\lambda/\lambda_0)^2 \cdot 2\pi c(\Delta D)l$ 。此时系统的空间分辨率应改写成

$$L_R = \sqrt{1+\eta^2} \frac{\lambda L_b}{\Delta\lambda}. \quad (10)$$

由(10)式可以看到,空间分辨率不仅取决于光源谱宽,还取决于光纤的双折射色散。比较(9)式和(1)式可以看出,随着耦合点距光纤出射端长度的增加,耦合点耦合强度以 $(1+\eta^2)^{-1/4}$ 速度衰减,空间

分辨率以 $(1 + \eta^2)^{1/2}$ 的速度降低。文献[12, 17]从理论上说明了双折射色散对该应力传感系统的影响,但都没有给出长距离光纤检测的实验数据。采用文献[18, 19]的方法,测量得到实验时所用光纤的双折射色散值为 $0.0065 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。图8为测量耦合强度衰减速度和空间分辨率与光纤长度关系的理论模拟曲线。

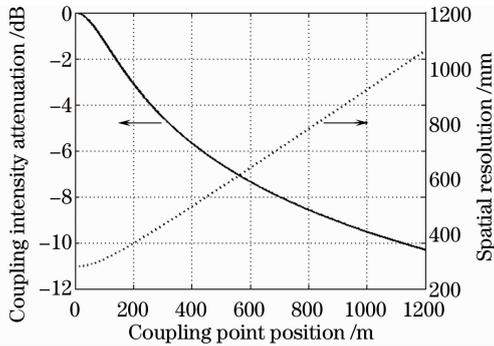


图8 计算耦合强度衰减速度和空间分辨率与光纤长度关系的理论模拟

Fig. 8 Theory simulation of the relationship between coupling intensity attenuation and spatial resolution with fiber length

从图8可以看出,理论模拟和实验值具有相同的衰减趋势,但实际耦合强度测量值的衰减速度要大于理论模拟。这主要是由于迈克耳孙干涉仪两反射镜角度失配造成的<sup>[20]</sup>。同时从图8还可以看到,空间分辨率随着光纤长度的增加而逐渐降低,其趋势及衰减速度与实验值均相符。这说明,保偏光纤双折射色散对系统性能有很大影响。此外,空间分辨率还受迈克耳孙干涉仪扫描分辨率的影响<sup>[13]</sup>。

针对双折射色散对测量造成的影响,一种可行的方案是在干涉仪固定臂中插入一厚度可调的色散介质以动态补偿保偏光纤的双折射色散。同时,还可以从算法上实现耦合强度和空间分辨率的色散补偿,这些将有待于进一步的研究。

## 4 结 论

对一长为1050 m的保偏光纤进行了力致偏振耦合检测,实现了大量程的分布式应力传感。对系统的测量灵敏度、空间分辨率、偏振耦合强度与应力大小的关系进行了测试。在实验中发现耦合强度和空间分辨率的测量值随耦合点距光纤出射端距离的增加而降低,并从理论上进行了分析。实验还表明,在温度低于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下耦合点耦合强度的测量受外界温度的影响很小,温度的变化也不会引起新的

耦合点。通过在系统中加一可旋转的半波片来改变检偏器检偏角度,实现了干涉条纹对比度的动态调节。当检偏器检偏角为 $5^\circ$ 时,干涉条纹对比度提高了10 dB。通过检偏角的优化,传感系统的检测灵敏度为85 dB,最大空间分辨率为98 mm,能广泛应用于结构健康检测中。此外,一个重要的应用是它可以检测光纤陀螺环固有耦合点及偏振串扰,单端检测长度大于1000 m。

## 参 考 文 献

- 1 Denis Donagic, Miran Lesic. All-fiber quasi-distributed polarimetric temperature sensor [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22): 10245~10254
- 2 Gabriela Statkiewicz, Tadeusz Martynkien, Wacław Urbanczyk. Measurements of modal birefringence and polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **241**(4-6): 339~348
- 3 Serge Caron, Claude Pare, Patrick Paradis *et al.*. Distributed fiber optics polarimetric chemical sensor [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 1075~1081
- 4 J. G. Ellison, A. S. Siddiqui. A fully polarimetric optical time-domain reflectometer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(2): 246~248
- 5 S. Chen, I. P. Giles, M. Fahadroushan. Quasi-distributed pressure sensor using intensity-type optical coherence domain polarimetry [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(5): 342~344
- 6 Gang Zheng, Michael Campbell, Peter Wallace. Reflectometric frequency-modulation continuous-wave distributed fiber-optic stress sensor with forward coupled beams [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5722~5726
- 7 Shinji Yamashita, Kazuo Hotate. Distributed pressure sensor with a mode-locked fiber-ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(9): 590~592
- 8 I. Cokgor, V. A. Handerek, A. J. Rogers. Distributed optical-fiber sensor for spatial location of mode coupling by using the optical Kerr effect [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(9): 705~707
- 9 M. Shlyagin, A. Khomenko, D. Tentori. Remote measurement of mode-coupling coefficients in birefringent fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(12): 913~915
- 10 Zuyuan He, Kazuo Hotate. Distributed fiber-optic stress-location measurement by arbitrary shaping of optical coherence function [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(9): 1715~1723
- 11 Wencai Jing, Yimo Zhang, Ge Zhou *et al.*. Rotation angle optimization of the polarization eigenmodes for detection of weak mode coupling in birefringent waveguides [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(18): 972~977
- 12 T. H. Xu, W. C. Jing, H. X. Zhang *et al.*. Influence of birefringence dispersion on a distributed stress sensor using birefringence optical fiber [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(1): 83~89
- 13 Wencai Jing, Yimo Zhang, Ge Zhou *et al.*. Analysis of the influence of opto-electro-mechanical devices on the measurement accuracy of a distributed polarization detection system [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(3): 294~300
- 14 A. Ourmazd, Malcolm P. Varnham, R. D. Birch *et al.*. Thermal properties of highly birefringent optical fibers and performs [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(15): 2374~2379
- 15 Juich Noda, Katsunari Okamoto, Yutaka Sasaki. Polarization-maintaining fibers and their application [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**(8): 1071~1089

- 16 Ren Hongliang, Wang Jiuyang, Lou Liren *et al.*. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 249~253  
任洪亮,王久扬,楼立人等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 249~253
- 17 N. Shibata, A. Nakazono, Y. Inoue. Interference between two orthogonally polarized modes traversing a highly birefringent air-silica microstructure fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1244~1252
- 18 F. Tang, X. Z. Wang, Y. Zhang *et al.*. Distributed measurement of birefringence dispersion in polarization-maintaining fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(23): 3411~3413
- 19 Wang Sijia, Zhang Yuying, Hu Minglie *et al.*. Chromatic dispersion measurement of photonic crystal fibers using spectral interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 215~219  
王思佳, 张玉颖, 胡明列等. 频域干涉法测量光子晶体光纤的色散特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 215~219
- 20 Hongxia Zhang, Tianhua Xu, Dagong Jia *et al.*. Effects of angular misalignment in interferometric detection of distributed polarization coupling[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(9): 5112~5116