

文章编号: 0258-7025(2010)02-0549-05

高稳定的光纤 3×3 耦合器干涉振动测量系统

李 敏 谢 芳 陈志敏

(北京交通大学理学院物理系, 北京 100044)

摘要 利用光纤 3×3 耦合器和光纤光栅构成能有效补偿环境干扰的光纤干涉振动测量系统。该测量系统包含干涉臂几乎重合的两个光纤迈克尔逊干涉仪, 其中一个光纤迈克尔逊干涉仪利用一个电子反馈环节补偿环境干扰对测量系统的影响, 以提高系统的测量精度; 另一个光纤迈克尔逊干涉仪利用另一个电子反馈环节跟踪由于振动引起的相位变化, 从而实现对振动幅值的测量及振动方向的确定。结果表明, 该系统可对频率为 0.1~200 Hz 的振动进行测量, 测量灵敏度为 $6 \mu\text{m}/\text{V}$ 。

关键词 光纤光学; 振动; 干涉测量; 反馈控制

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0549

Vibration Measurement System Based on a Highly Stabilized Fiber 3×3 Coupler Interferometer

Li Min Xie Fang Chen Zhimin

(Department of Physics, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A highly stabilized fiber 3×3 coupler Michelson interferometer vibration measurement system, which employs fiber Bragg gratings to interleave two fiber Michelson interferometers that share the common interferometric-optical-path, is presented. One interferometer uses an electronic feedback loop to compensate for the low frequency drift in the phase of the interferometric signal which is resulted from environmental disturbances, while the other one uses another electronic feedback loop to track the phase variation induced by the measured vibration, and thus the amplitude measurement of the vibration and the vibration direction are measured simultaneously. The results show that the measurement system is designed to be capable of measurement vibration with frequencies ranging from 0.1 Hz to 200 Hz and the measurement sensitivity is $6 \mu\text{m}/\text{V}$.

Key words fiber optics; vibration; interferometry; feedback control

1 引 言

光纤干涉仪由于体积小、重量轻、抗电磁干扰、能波分复用、高度集成、价格低廉等优点被广泛应用于精密测量领域, 可对位移^[1~3]、振动^[4,5]、应变^[6~9]以及温度^[9~11]等参量进行测量。在很多光纤干涉测量系统中, 光纤的功用仅是用来传光, 干涉信号的相位变化应该只由被测量的变化量引起^[12~17]。但是由于干涉臂中的光纤长度对环境干扰(环境振动、温度变化)非常敏感, 这些干扰将使干涉信号的相位随机地变化, 这种相位随机变化将降低系统的测量

精度, 甚至使测量系统无法正常工作。为了提高测量精度, 需要对环境干扰引起的相位随机变化量进行补偿。Dejiao Lin 等^[1,12,13]利用反馈控制环节驱动压电陶瓷(PZT)调节光纤干涉仪的一个臂的光程, 使干涉仪始终处于正交状态(两个干涉臂的相位差始终为 $\pi/2$)来实现对环境干扰的修正补偿。为了实现对环境干扰的连续修正补偿, 当驱动压电陶瓷的电压达到饱和值时, 需要对压电陶瓷上的电压进行放电。对于文献[1]所述的系统, 压电陶瓷放电会影响其测量过程, 所以很难应用于实际测量中; 文

收稿日期: 2009-07-13; 收到修改稿日期: 2009-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(50675018, 50975022)和北京市自然科学基金(3072009)资助项目。

作者简介: 李 敏(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事精密测试、光纤传感方面的研究。E-mail: 09122269@bjtu.edu.cn

导师简介: 谢 芳(1966—), 女, 博士, 副教授, 主要从事精密测试、光纤传感和精密仪器方面的研究。

E-mail: fxie@bjtu.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: S0401m30S)

献[12,13]所述的系统不能对位移进行测量,同时也存在对压电陶瓷放电会影响测量过程的问题。此外,对于基于干涉原理的测量系统,当被测位移变化时干涉信号呈正弦规律变化,无法仅凭干涉信号的变化判断被测量(振动、位移)的方向,即使系统可以判向^[12],但是结构复杂。

本文研究了利用光纤 3×3 耦合器和光纤布拉格光栅(FBG)构成具有自补偿功能的振动测量系统,能测量振动的振幅并同时提供振动方向的信息,有效地弥补了现有测量系统的不足,可以对微机电系统、微电子、微生物等领域中的振动有效地进行非接触测量。

2 测量系统的原理

2.1 原理分析

系统的测量原理如图 1 所示。利用一个光纤 3×3 耦合器以及光纤布拉格光栅作为反射镜,构成两个光路几乎重合的光纤迈克耳孙干涉仪。两支中心波长分别为 $\lambda_1 = 1557.32 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1558.52 \text{ nm}$ 的分布反馈(DFB)激光器发出的光由于光纤光栅的波分复用分别作用于这两个光纤迈克耳孙干涉仪中。一个光纤迈克耳孙干涉仪用于补偿环境干扰,完成稳定测量系统的工作;另一个光纤迈克耳孙干涉仪用于完成测量工作。两支 DFB 激光器(DFB1 和 DFB2)发出的光功率均为 2.5 mW,且在 20 dB 的谱宽均为 0.2 nm。光纤光栅 FBG1,FBG2 和 FBG3 的中心波长均为 1557.32 nm,布拉格反射谱的 3 dB 带宽为 0.3 nm。FBG4 的中心波长为 1558.52 nm,布拉格反射谱的 3 dB 带宽也为 0.3 nm。

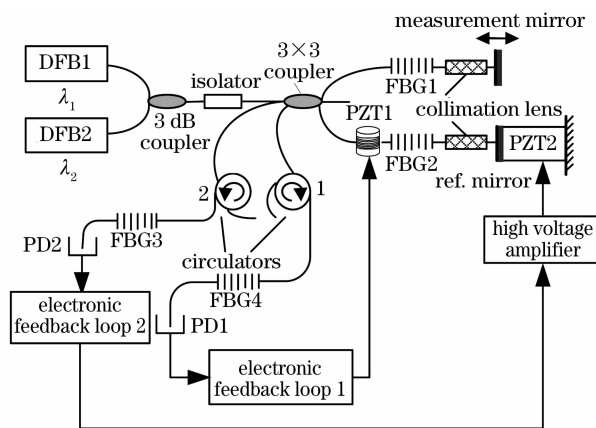


图 1 测量系统原理

Fig. 1 Principle of measurement system

第一个以 FBG1 和 FBG2 为反射镜的光纤迈克耳孙干涉仪(参考干涉仪)用于补偿环境干扰。波长

为 $\lambda_1 = 1557.32 \text{ nm}$ 的 DFB 激光器发出的光经过 3 dB 耦合器、光纤隔离器、光纤 3×3 耦合器后被分为 3 路,其中 2 路光分别被 FBG1 和 FBG2 反射,这两束反射光在光纤 3×3 耦合器中相遇并发生干涉。第 1 路干涉信号由于光纤隔离器的作用无法到达光源,因此不会对光源产生影响;第 2 路干涉信号经过环行器 2 后被 FBG3 反射,再由环行器 2 导出测量系统;第 3 路干涉信号经过环行器 1,FBG4 后,被光电探测器 1(PD1)探测,再经过电子反馈环节 1 处理后输出一个修正电压驱动压电陶瓷管 PZT1(管长 35 mm,外径 35 mm,壁厚 2 mm),PZT1 上缠有约 11 m 的参考臂中的光纤。修正电压驱动 PZT1 调节参考臂的光程,使干涉仪(参考干涉仪)的两个臂的相位差始终保持在 $\pi/2$,由此实现对该干涉仪的稳定。因为 FBG1 和 FBG2 与光纤准直镜紧邻,光纤准直镜的端面与反射镜的距离小于 1 mm,所以重叠在一起的两个光纤迈克耳孙干涉仪的两个干涉臂的光路几乎重合。当第 1 个光纤迈克耳孙干涉仪稳定后,第 2 个用于测量的光纤迈克耳孙干涉仪也稳定了。

第 2 个以测量镜和参考镜为反射镜的光纤迈克耳孙干涉仪(测量干涉仪)用于完成测量工作。波长为 $\lambda_2 = 1558.52 \text{ nm}$ 的 DFB 激光器发出的光经过 3 dB 耦合器、光纤隔离器、光纤 3×3 耦合器后被分为 3 路,其中 2 路光经过 FBG1 和 FBG2,然后被光纤准直镜准直后分别被测量镜和参考镜反射回系统,并在 3×3 耦合器相遇并干涉。第 1 路干涉信号由于光纤隔离器的作用不能到达光源,因此不会对光源产生影响;第 2 路干涉信号经过环行器 2 和 FBG3 后被探测器 2(PD2)探测;第 3 路干涉信号经过环行器 1 后,被 FBG4 反射,再由环行器 1 导出测量系统。

PD2 探测到的干涉信号由电子反馈环节 2 处理后输出的信号经过高压放大器放大 10 倍,驱动压电陶瓷 PZT2(PI 公司产品,型号 P-841.40)调节参考臂的光程,使此干涉仪(测量干涉仪)的两个臂的相位差也始终保持在 $\pi/2$,跟踪由于测量镜的振动引起的相位变化,实现对振动的测量。因电子反馈环节 2 的输出电压与振动的幅值成正比,所以将电子反馈环节 2 的输出电压作为测量结果记录下来,在对振动幅值进行测量的同时还提供了被测振动方向的信息。电子反馈环节 2 的带宽为 0~5 kHz, PZT2 的频率响应为 0~200 Hz,由于 PZT2 自身带有反馈环,能对压电陶瓷的非线性性和磁滞性进行

补偿,所以在 0~200 Hz 频率带宽内它的驱动电压与其变形量的线性度达 99.9%,当驱动电压为最大值 100 V 时,对应 PZT2 的变形量为 60 μm 。由以上分析可知,该测量系统能够对 0.1~200 Hz 的振动进行高精度的测量。

2.2 电子反馈环节分析

电子反馈环节 1 的探测器 PD1 探测到的参考干涉仪的干涉信号经过电流-电压转换后,可表示为

$$u = u_0[1 + k\cos(\phi_d + \phi_s)], \quad (1)$$

式中 u_0 为一个与输入光强和电流-电压转换增益有关的量, k 为干涉条纹的可见度, ϕ_d 为两个干涉臂的静态相位差, ϕ_s 为由于环境干扰引起的随机相位差。PD1 探测到的信号经过截止频率为 0.019 Hz 的高通滤波器后滤去直流分量,输出为

$$u_1 = k_1\cos(\phi_d + \phi_s). \quad (2)$$

当参考干涉仪处于正交状态(相位差为 $\pi/2$)时,即 $\phi_d + \phi_s = \frac{\pi}{2}$,有 $u_1 = 0$,在正交状态附近,(2)式可表示为

$$u_1 = K_1\Delta\phi, \quad (3)$$

式中 K_1 为高通滤波器输出的干涉信号在正交点附近的增益, $\Delta\phi = \phi_d + \phi_s - \frac{\pi}{2}$ 。

在正交状态附近 u_1 与参考干涉仪偏离正交点的大小成正比,因此本测量系统将 u_1 经过一个积分器后作为修正信号驱动 PZT1,调节参考臂光程,使参考干涉仪保持在正交状态,实现对环境干扰的补偿。电子反馈环节 1 的频率带宽为 0.019~1.5 Hz,实验证明可对环境干扰进行有效补偿。

电子反馈环节 2 的探测器 PD2 探测到的测量干涉仪的干涉信号经过电流-电压转换后,可表示为

$$u'_1 = u'_{10}[1 + k'\cos(\phi'_d + \phi'_s)], \quad (4)$$

式中 u'_{10} 为一个与输入光强和电流-电压转换增益有关的量, k' 为干涉条纹的可见度, ϕ'_d 为两个干涉臂的静态相位差, ϕ'_s 为由于测量镜的振动引起的相位变化量。由于相位的随机变化已经被电子反馈环节 1 补偿,所以(4)式中无相位的随机变化量。PD2 探测的信号经过截止频率为 0.019 Hz 的高通滤波器后滤去直流分量,再经过两个串联的积分器处理后的输出信号经过高压放大器放大 10 倍后,驱动 PZT2 跟踪相位变化,使测量干涉仪保持正交状态。如果测量镜振动,电子反馈环节 2 的输出电压将驱动 PZT2 跟踪由于测量镜的振动引起的相位变化,从而对振动的振幅进行测量,并且提供振动方向的

信息。PZT2 的驱动电压与测量镜的位移变化量成正比,只要测量出 PZT2 上的驱动电压值,就可得到测量镜的振动幅值及方向。电子反馈环节 2 的输出经过模/数(A/D)卡转换后由计算机记录作为测量结果。电子反馈环节 2 是一个二阶控制系统,频率带宽为 0.019 Hz~5 kHz。

3 实验及实验结果

当两个电子反馈环节处于非工作状态(断开),且测量镜和参考镜静止时,PD2 探测到的干涉信号一直在波动,如图 2 所示,该干涉信号的波动是由于环境干扰引起的。当 PD1 的输出信号经过电子反馈环节 1 处理后驱动 PZT1 调节参考臂光程,使参考干涉仪处于正交状态时,PD2 探测到的信号即稳定在 -5 V,说明环境干扰对干涉仪的影响被消除了。如图 3 所示,当 PZT1 上的驱动电压(电子反馈环节 1 的输出电压)的绝对值大于 7 V 时,即被放电电路置零,开始新一轮相位跟踪。对 PZT1 的放电使得电子反馈环节 1 能连续地对环境干扰进行补

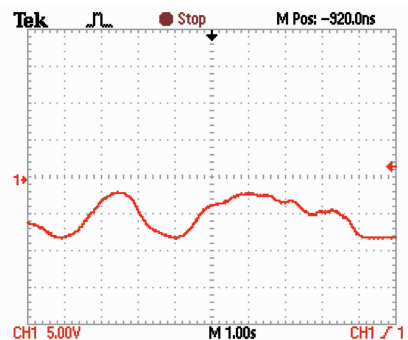


图 2 电子反馈环节 1 断开时 PD2 探测到的信号
Fig. 2 Signal detected by PD2 with electronic feedback

loop 1 out of operation

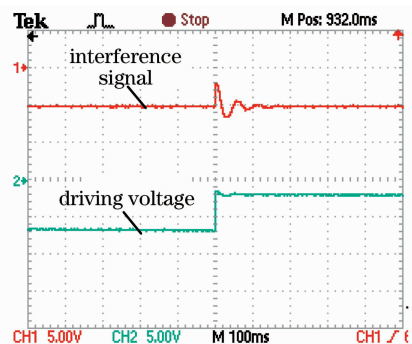


图 3 PD2 探测到的信号及电子反馈环节 1 的输出电压

Fig. 3 Interference signal detected by PD2 and output voltage from electronic feedback loop 1

偿。由于两个 DFB 激光器的波长很接近,两个光纤迈克耳孙干涉仪有各自独立的反射镜,所以对 PZT1 的放电不会影响测量工作,这可由图 4 加以证明。测量干涉仪的两个干涉臂的臂长可分别表示为

$$L_1 = l_{11} + l_{12} + l_{13}, \quad (5)$$

$$L_2 = l_{21} + l_{22} + l_{23}, \quad (6)$$

式中 l_{11} 和 l_{21} 分别为参考干涉仪的两个干涉臂的长度, l_{12} 和 l_{22} 分别为测量干涉仪的两个干涉臂中的光纤光栅到准直镜端面的距离, l_{13} 和 l_{23} 分别为准直镜端面到反射镜和参考镜之间的距离。

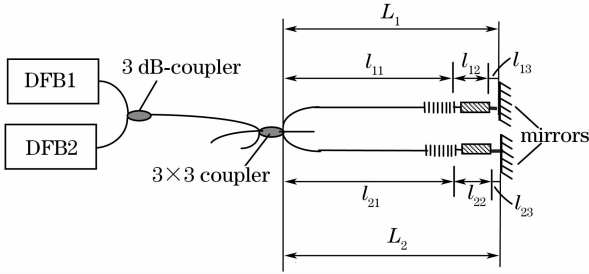


图 4 两个干涉仪的干涉臂之间的关系

Fig. 4 Relationship of optical paths in two interleaved fiber interferometers

测量干涉仪的光程差为

$$\Delta_m = n_f(l_{21} - l_{11}) + n_g(l_{22} - l_{12}) + (l_{23} - l_{13}), \quad (7)$$

式中 n_f 为光纤的折射率, n_g 为准直镜的折射率。

测量干涉仪的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_m &= \frac{\Delta_m}{\lambda} 2\pi = \frac{n_f(l_{21} - l_{11})}{\lambda} 2\pi + \\ &\frac{n_g(l_{22} - l_{12})}{\lambda} 2\pi + \frac{(l_{23} - l_{13})}{\lambda} 2\pi = \\ \Delta\varphi_r + \Delta\varphi &= (2n + 1) \frac{\pi}{2} + \Delta\varphi, \quad (8) \end{aligned}$$

式中 $\Delta\varphi_r$ 为参考干涉仪的相位差, $\Delta\varphi$ 为由于 l_{12} 和 l_{22} 的光程差以及 l_{13} 和 l_{23} 的光程差引起的相位差, n 为整数。由(8)式可知, $\Delta\varphi_m$ 的有效值决定于 $\Delta\varphi$ 而与参考干涉仪的相位差 $\Delta\varphi_r$ 无关。电子反馈环节 1 对 PZT1 的放电只改变 n 的大小, (8) 式仍得到满足, 这将使放电对测量没有影响。由图 3 可知放电的过程将对 PD2 探测的信号引起约 150 ms 的扰动, 由于 150 ms 极短, 不会对测量带来影响, 在 150 ms 内采集的数据可通过后续程序数据处理时剔除。

在测量实验中将测量镜粘贴在一个压电陶瓷上, 用正弦激励电压驱动该压电陶瓷, 测量干涉仪的正交状态即被破坏。电子反馈环节 2 的输出电压经

过高压放大器放大 10 倍后, 驱动 PZT2 调节测量干涉仪的参考臂的光程, 使测量干涉仪恢复到正交状态。电子反馈环节 2 的输出电压的幅值与带动测量镜振动的压电陶瓷上的驱动电压成正比, 同时也与测量镜振动幅值成正比。电子反馈环节 2 的输出电压的方向对应测量镜振动的方向, 所以只要测量出电子反馈环节 2 的输出电压(大小以及变化方向), 即测量出了测量镜振动幅值和振动方向。

不同频率、相同幅值的正弦电压激励测量镜振动的实验结果如图 5 所示。由图 5 可知, 电子反馈环节 2 的输出电压与激励电压成正比, 而与激励电压的频率无关, 所以在 PZT2 的频率响应 0 ~ 200 Hz 的范围内, 测量镜的振动幅值和方向可以由电子反馈环节 2 输出的电压的幅值和方向确定。

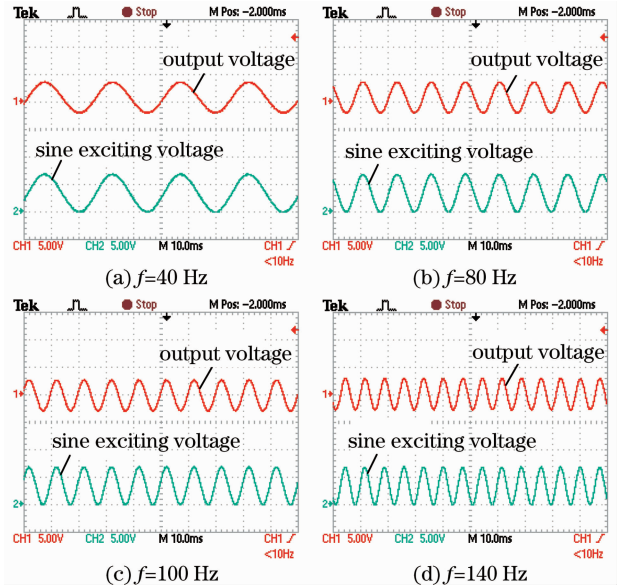


图 5 不同频率、相同幅值的正弦激励电压和反馈控制环节 2 对应的输出电压

Fig. 5 Sine exciting voltages with different frequencies and the same amplitudes and the corresponding output voltages from feedback loop 2

用测振仪 (Polytec OFV3000) 对测量镜的振动进行测量, 将其测量结果与利用该测量系统测量的结果作对比, 图 6 是激励电压的频率为 50 Hz, 幅值由 0 V 增加到 3 V 时, 测振仪的测量结果与该测量系统的测量结果的对比, 可见这两种方法的测量结果的线性相关性达 99%, 验证了该测量系统的测量原理的正确性。由图 6 可知, 该测量系统的测量灵敏度为 $6 \mu\text{m}/\text{V}$ 。由此可知, 图 5 中实验振动幅值为 $36 \mu\text{m}$, 振动频率与激励正弦电压的频率相同。

本测量系统的测量量程和动态范围均由 PZT2 决定, PZT2 的最大变形量为 $60 \mu\text{m}$, 频率响应带宽

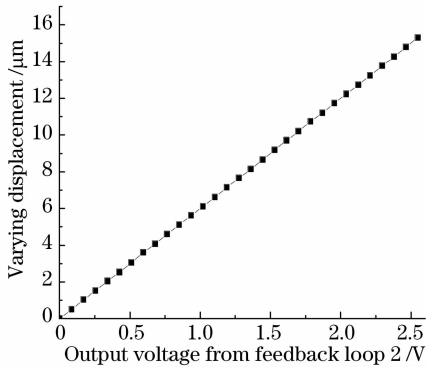


图 6 电子反馈环节 2 的输出电压与 Polytec 测振仪的测量结果对比

Fig. 6 Comparison of output voltage from feedback loop 2 and displacement of the measured mirror measured by Polytec vibrometer

为 $0 \sim 200$ Hz, 由于电子反馈控制环节 2 的带宽为 0.019 Hz ~ 5 kHz, 所以该测量系统的动态范围为 $0.019 \sim 200$ Hz, 测量量程为 $60 \mu\text{m}$ 。当 PZT2 的频率响应带宽更宽, PZT2 的变形量更大时, 该测量系统即可对更宽频率、更大幅值的振动进行测量。

4 结 论

利用光纤 3×3 耦合器以及光纤光栅构成具有自补偿功能的光纤复合迈克耳孙干涉振动测量系统。该系统包含两个光路几乎重合的光纤迈克耳孙干涉仪, 一个光纤迈克耳孙干涉仪利用一个电子反馈环节补偿环境干扰对测量系统的影响, 另一个光纤迈克耳孙干涉仪利用另一个电子反馈环节跟踪由于测量镜的振动引起的相位变化, 从而实现了对振动幅值的测量以及振动方向的确定。该测量系统动态频率范围为 $0.1 \sim 200$ Hz, 可测量的最大幅值为 $60 \mu\text{m}$, 测量灵敏度为 $6 \mu\text{m}/\text{V}$ 。

参 考 文 献

- Dejiao Lin, Xiangqian Jiang, Fang Xie. High stability multiplexed fiber interferometer and its application on absolute displacement measurement and on-line surface metrology [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(23):5729~5734
- Wang Zhong, Hong Haitao, Xiao Hai *et al.*. Optic fiber interferometer for absolute distance measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **B6**(5):435~440
- Youlong Yu, Hwayaw Tam, Wenghong Chung *et al.*. Fibre Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(16):1141~1143
- Jiang Yi. Devising technology of optical fiber vibration sensing head [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2):148~149
- 江 毅. 光纤振动传感器探头的设计 [J]. *光学技术*, 2002, **28**(2):148~149
- Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. A J_0 - J_1 method for measurement of dynamic phase changes in an interferometric fiber sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):105~108
- 王泽锋, 罗 洪, 熊水东 等. 一种用于干涉型光纤传感器动态相移测量的 J_0 - J_1 法 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):105~108
- M. Jiang, E. Gerland. A simple strain sensor using a thin film as a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer [J]. *Sensors and Actuators A*, 2001, **88**(1):41~46
- B. T. Meggitt, C. J. Hall, K. Weir. An all fibre white light interferometric strain measurement system [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, **79**(1):1~7
- Wu Zhaoxia, Wu Fei, Cai Lulu *et al.*. Strain measurement using a fiber Bragg grating Fabry-Perot sensor [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4):559~562
- 吴朝霞, 吴 飞, 蔡璐璐 等. Bragg 光纤光栅法布里-珀罗传感器的应变测量 [J]. *光学技术*, 2005, **31**(4):559~562
- Jia Hongzhi, Li Yulin. Simultaneous strain and temperature measurement with optical fiber gratings: error analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **B9**(3):243~248
- Yuanhong Yang. Temperature sensor based on PNR in Sagnac interferometer [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5):259~261
- Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):779~782
- 张锦龙, 余重秀, 王葵如 等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4):779~782
- Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11):633~635
- D. A. Jackson, A. Dandridge, A. B. Tveten. Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(17):2926~2929
- K. Fritsch, G. Adamovsky. Simple circuit for feedback stabilization of a single-mode optical fiber interferometer [J]. *Review of Science Instrument*, 1981, **52**(7):996~1000
- Chen Rongsheng, Liao Yanbiao, Zheng Gangtie *et al.*. A novel acoustic emission fiber optic sensor based on a single mode optical fiber coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(3):195~198
- K. A. Murphy, M. F. Gunther, A. M. Vengsarkar *et al.*. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4):273~275
- Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1681~1685
- 赵洪霞, 鲍吉龙, 陈 莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1681~1685