

文章编号: 0258-7025(2008)01-0087-05

高分辨率光纤激光传感系统

肖 浩 李 芳 王永杰 刘丽辉 刘育梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

摘要 提出并实现了一种基于光纤光栅(FBG)激光器的高分辨率光纤传感系统。通过在一段高增益有源光纤写入光纤光栅形成光纤激光传感器,待测信号作用在激光器上引起激光频率变化,采用偏振无关的非平衡迈克耳孙光纤干涉仪将激光频率变化转化为干涉仪相位变化。干涉仪输出的信号经过光电转换后,用采集卡转换为数字信号输入计算机,最后利用改进的归一化相位载波(PGC)解调技术,实现信号的高分辨率解调。实验表明该传感系统的动态应变分辨率达到了 $5.6 \times 10^{-4} \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$,并且解调结果与待测信号具有良好的线性关系。

关键词 光纤光学;光纤传感;光纤激光传感系统;相位载波解调技术;分辨率;干涉仪

中图分类号 TN 253;TP 212.14 **文献标识码** A

High-Resolution Fiber Laser Sensor System

Xiao Hao Li Fang Wang Yongjie Liu Lihui Liu Yuliang

(*Optoelectronics System Laboratory, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract A high-resolution fiber sensor system based on fiber Bragg grating (FBG) laser is proposed and demonstrated. The fiber laser sensor is made by writing Bragg grating into a section of high gain active fiber. Unmeasured signals applied on the fiber laser induce laser frequency shifts. And a polarization-insensitive unbalanced Michelson fiber interferometer is employed to transpose the frequency shifts into phase shifts of the interferometer. After converting the output signals of the interferometer to electric signals, the signals are sampled and input into the computer. An improved normalized phase generated carrier (PGC) demodulation technique is used to achieve high resolution demodulation. Experiments demonstrate that the dynamic strain resolution of this system is $5.6 \times 10^{-4} \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$, and the system output is linear to the strain of the fiber laser sensor.

Key words fiber optics; fiber sensing; fiber laser sensor system; phase generated carrier demodulation technique; resolution; interferometer

1 引 言

光纤光栅(FBG)传感器由于具有尺寸小、抗干扰能力强、易于复用组网等特点,已经成为目前应用最为广泛的光纤传感器之一^[1]。传统的无源光纤光栅传感器是通过检测光纤光栅窄带反射光中心波长的变化,得到外界被测信号的信息。在光纤光栅传感器的众多解调方案中^[2,3],以干涉式解调技术的分辨率最高,据报道目前能够达到 $0.51 \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[4]。但是由于普通光纤光栅带宽与信噪比的限制,要获

得更高的检测分辨率变得十分困难。在一些需要超高检测分辨率的特殊领域,例如海底微弱水声探测^[5,6]、石油天然气行业地震检波等,普通的光纤光栅传感系统很难满足要求。

为了解决这个问题,本文提出了一种基于光纤光栅激光器的新型光纤传感系统^[7]。通过在有源掺铒光纤上写入布拉格光栅的结构制作出短腔有源光纤光栅激光器,外界信号(温度、应变、压力等)作用在激光器上将引起输出激光频率(波长)变化。

收稿日期:2007-06-07;收到修改稿日期:2007-09-05

作者简介:肖 浩(1980—),男,江西人,博士研究生,主要从事高性能光纤激光传感系统、大规模光纤激光传感网络方面的研究。E-mail: xhao@semi. ac. cn

导师简介:刘育梁(1966—),男,山西人,研究员,博士生导师,主要从事大规模光纤激光传感网络的关键技术及其工业应用;用于智能光网络的半导体光子芯片及微米、纳米级集成光信息处理系统方面的研究。E-mail: ylliu@semi. ac. cn

2 系统原理

2.1 光纤光栅激光器传感原理

光纤光栅激光器采用分布式布拉格反射(DBR)结构^[8],如图1所示。两个匹配的光栅和掺稀土有源光纤组成一个法布里-珀罗(F-P)谐振腔。在光栅带通滤波和法布里-珀罗腔选频的共同作用下,有源

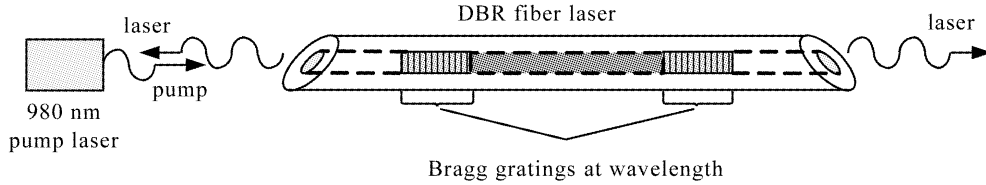


图1 分布式布拉格反射光纤激光器结构原理图

Fig. 1 Configuration of the DBR fiber laser

对于腔长为 L_{FL} 的法布里-珀罗谐振腔,谐振频率 ν_{FL} 可表示为^[9]

$$\nu_{FL} = mc/2nL_{FL}, \quad (1)$$

式中 c 为光速, n 为纤芯折射率, m 为整数, 每一个 m 代表谐振腔内的一个模式。当激光器工作在单纵模状态, 即只有一个模式落在光栅带宽内时, 外界信号作用在光纤光栅激光器上, 改变激光器谐振腔长度, 使其输出光频率 ν_{FL} 产生偏移 $\Delta\nu_{FL}$, 可表示为

$$\Delta\nu_{FL} = - \left(\frac{\Delta L_{FL}}{L_{FL}} + \frac{\Delta n}{n} \right) \cdot \nu_{FL} = - \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right\} \cdot \varepsilon \cdot \nu_{FL}, \quad (2)$$

式中 p_{11}, p_{12} 为光纤弹光矩阵系数, μ 为泊松比, ε 为外界信号引起的光纤光栅激光器谐振腔的应变变量,

令 $\zeta = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right\}$, 则(2)式可写成

$$\Delta\nu_{FL} = -\zeta \cdot \varepsilon \cdot \nu_{FL}, \quad (3)$$

式中 ζ 为与光纤材料性能有关的常数, 通常 $\zeta \approx$

光纤中在抽运激光作用下产生的宽带荧光谱中的特定部分在腔内来回反射的同时得到不断放大, 最终形成激光。激光的频率(波长)由谐振腔长度、光栅带宽以及有源光纤的自发辐射谱共同决定。合理地选择掺稀土光纤的种类和长度、光栅匹配波长和抽运激光, 可以得到单纵模激光的连续输出。

0.78, 因此根据(3)式可知, 外界信号引起的激光频率(波长)的变化与激光器谐振腔的应变呈线性关系。所以, 通过检测激光频率的变化可以得到谐振腔的应变值, 进而还原外界待测信号。

2.2 高分辨率解调系统原理

光纤激光传感器高分辨率解调系统基于干涉式传感原理, 激光器发出的激光 I_0 经过非平衡干涉仪后, 其干涉信号 I 可表示为

$$I = I_0 \cdot (1 + \eta \cdot \cos\Delta\varphi), \quad (4)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为干涉仪两臂之间的相位差, η 为干涉条纹可见度。根据光干涉的原理可知, 光纤激光器的频率变化 $\Delta\nu_{FL}$ 经过臂长差为 L 的非平衡干涉仪后将转化为干涉仪相位差变化 $\Delta\varphi$, $\Delta\nu_{FL}$ 与 $\Delta\varphi$ 的关系可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot n \cdot L}{c} \cdot \Delta\nu_{FL}, \quad (5)$$

将(3)式代入(5)式可得

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot n \cdot L}{c} \cdot \zeta \cdot \nu_{FL} \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

因此通过检测干涉信号的相位变化就可以得到外界

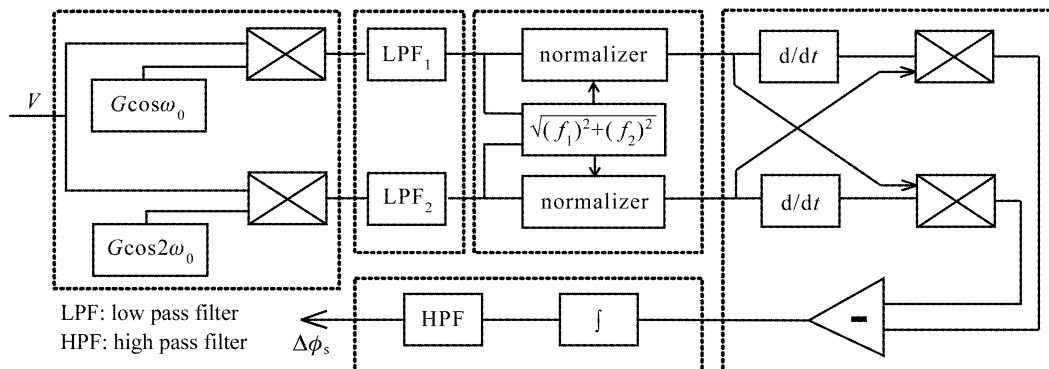


图2 归一化相位载波解调算法原理图

Fig. 2 Principle diagram of normalized PGC demodulation algorithm

信号引起的激光器腔长的应变。同时从(6)式可以看出, L 越大, 相当于对微弱应变 ϵ 的放大作用越强, 由于光纤光栅激光器的线宽很窄, 通常在几万赫兹量级, 相干长度达到数十千米, 因此干涉仪的臂长差可以达到几十米甚至上百米, 从而可以将外界信号引起的极其微弱的光频变化放大为可检测的相位变化, 这就是光纤激光传感系统能够具有超高检测分辨率的原因。

为了精确地将激光频率变化引起的干涉仪相位差变化解调出来, 系统采用了改进的归一化相位载波(PGC)解调技术(见图2), 通过在传统相位载波解调算法^[10]中引入归一化操作, 消除了解调结果中光源功率的影响。与其他干涉式解调技术相比较^[2,9,11~14], 该解调技术具有动态范围大、解调分辨率高、抗干扰能力强等优点。

根据光干涉式(4), 使用频率为 ω_0 (远高于待测信号频率 ω_s) 的载波信号对干涉仪相位进行调制, 干涉仪信号经过光电转换后可以表示为

$$V = A + B \cdot \cos[C\cos\omega_0 t + \phi(t)], \quad (7)$$

其中 A 为与光源功率成正比的常数项, B 为与光源功率和干涉条纹可见度相关的系数, C 为相位调制幅度, 令 $\phi(t) = \Delta\phi_s(t) + \phi_0(t)$, $\Delta\phi_s(t)$ 为激光器频率变化引起的待测相位变化, $\phi_0(t)$ 为干涉仪的初始相位。

将(7)式以贝塞耳函数形式展开, 得到

$$V = A +$$

$$B\{[J_0(C) + 2 \sum_{K=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos 2k\omega_0 t] \cos\phi(t) - 2[\sum_{K=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t] \sin\phi(t)\}, \quad (8)$$

式中 $J_k(C)$ 为第 k 阶贝塞耳函数, 将(8)式分别乘以载波信号 $G\cos\omega_0 t$ 和载波的二倍频信号 $G\cos 2\omega_0 t$ 后 (G 为载波信号幅度), 再进行低通滤波, 将含有 ω_0 及其倍频项滤去, 可得

$$-BGJ_1(C) \sin\phi(t), \quad (9)$$

$$-BGJ_2(C) \cos\phi(t), \quad (10)$$

调整相位载波的幅度使 $J_1(C) = J_2(C)$, 此时 $C \approx 2.64$, (9)式的平方加上(10)式的平方再开方可得

$$\sqrt{B^2 G^2 J_1^2(C) \sin^2\phi(t) + B^2 G^2 J_2^2(C) \cos^2\phi(t)} = BGJ_1(C), \quad (11)$$

(9)式与(10)式分别除以(11)式进行归一化操作, 得到

$$-\sin\phi(t), \quad (12)$$

$$-\cos\phi(t), \quad (13)$$

经过微分得到

$$-\cos\phi(t) \frac{d\phi(t)}{dt}, \quad (14)$$

$$\sin\phi(t) \frac{d\phi(t)}{dt}, \quad (15)$$

由(13)式乘(14)式减(12)式乘(15)式可得

$$\frac{d\phi(t)}{dt}, \quad (16)$$

经过积分得到

$$\phi(t) = \Delta\phi_s(t) + \phi_0(t), \quad (17)$$

由于干涉仪初始相位 $\phi_0(t)$ 为缓变信号, 可通过高通滤波将其滤除, 这样最终得到由激光传感器频率变化引起的相位变化 $\Delta\phi_s(t)$ 。根据前面的推导, $\Delta\phi_s(t)$ 与 ϵ 呈线性关系, 因此通过干涉式相位载波解调技术最终还原出待测信号。

3 系统结构

图3所示为光纤激光传感系统示意图。在980 nm抽运激光作用下, 光纤光栅激光器产生稳定的窄线宽单频激光, 波长为1530 nm。经过1550/980波分复用器(WDM)后, 滤去抽运光。为了减小反射光引入的噪声, 激光从波分复用器输出后接入光隔离器。然后使用1×2耦合器将激光分为两束, 其中一束接入光谱仪(OSA)进行测试, 另一路进入非平衡干涉仪。

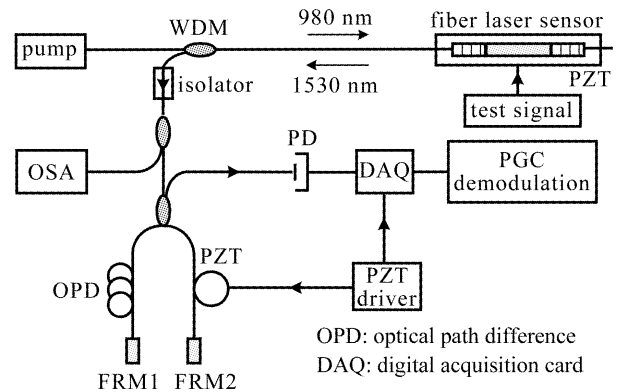


图3 光纤激光传感系统实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of diagram of experimental setup of the fiber laser sensor system

非平衡干涉仪采用迈克耳孙结构, 在两臂的末端使用法拉第旋转反射镜(FRM), 可以消除由于输入光偏振态变化造成的干涉信号幅度衰落^[15], 提高系统解调结果的稳定性。实验中, 迈克耳孙干涉仪的臂长差为10 m。

为了产生解调需要的相位载波, 将干涉仪其中一个臂上的光纤缠绕在压电陶瓷(PZT)管上, 压电

陶瓷驱动器产生远高于待测信号频率的正弦调制信号,驱动压电陶瓷管产生振荡,带动上面的光纤产生周期性的伸缩,即干涉仪的臂长差发生周期性变化,从而对干涉仪的相位产生高频调制。通过改变压电陶瓷的驱动电压,可以改变相位调制的幅度。实验中,调制信号的频率为10 kHz,相位调制的幅度为2.64 rad。

经过调制的光干涉信号进入光电探测器(PD)转化为电压信号,用A/D采集卡将模拟电信号转化为数字信号后,利用计算机对数字信号进行归一化的相位载波解调,最终得到外界待测信号。

基于数字化的相位载波解调技术具有设计简便、使用灵活、精度高等特点,但由于A/D采集卡的有限采样速度限制了载波信号频率,因此待测信号的频率范围通常低于5 kHz。

4 实验结果

图4为使用安捷伦86140光谱仪测得的分布式布拉格反射光纤激光传感器光谱图,此时抽运激光器的功率为100 mW,采用的光纤光栅激光器腔长为2.5 cm,测量得到的激光波长为1530.12 nm。

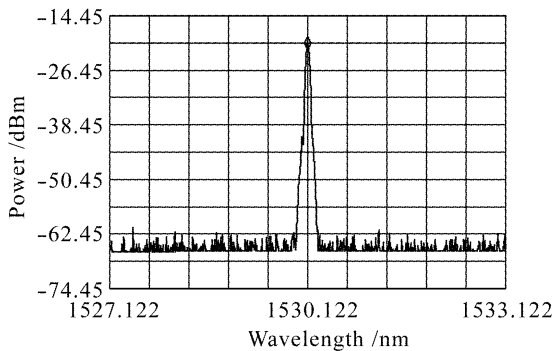


图4 分布式布拉格反射光纤激光传感器光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of the DBR fiber laser sensor

为了测试该系统对动态应变信号的检测能力,将光纤光栅激光器粘在压电陶瓷片上,通过信号发生器产生正弦测试电压信号施加到压电陶瓷片上,使其带动激光器的腔长产生动态应变。当压电陶瓷上施加幅度为60 mV,频率为1 kHz的信号时,系统解调结果 $\Delta\phi_s(t)$ 与压电陶瓷外加电压如图5所示,可见系统解调结果与外界施加信号基本同步。通过改变电压值的大小可以得到解调信号与压电陶瓷电压的关系,如图6所示。由于压电陶瓷伸缩引起的激光器腔长应变大小与压电陶瓷所加电压成正比,因此从图6可以看出,解调信号大小与激光器腔长应变基本呈线性关系,这与(6)式给出的两者关系相

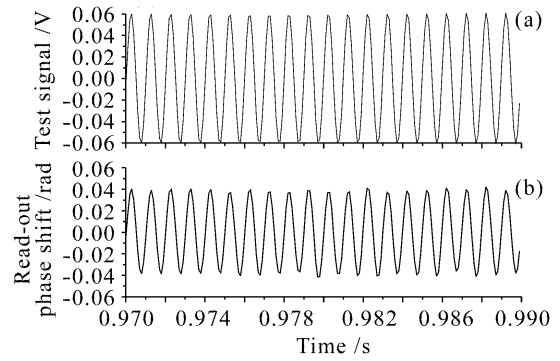


图5 测试信号(a)与系统解调结果(b)

Fig. 5 Test signal (a) and output signal (b) of the fiber laser sensor system

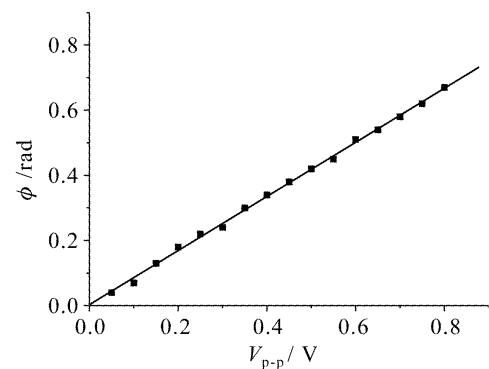


图6 解调相位变化与测试信号的关系

Fig. 6 Relationship between the variation of demodulated phase and the applied signal

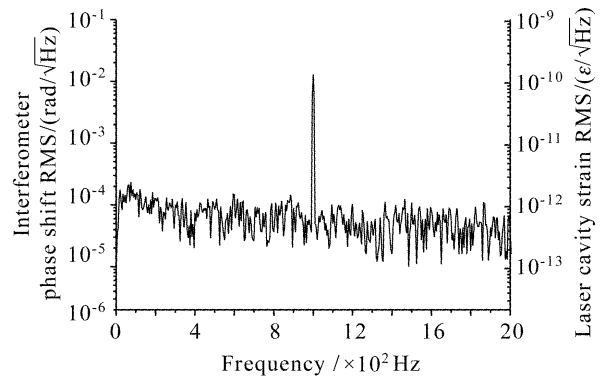


图7 光纤激光传感系统解调信号幅度谱

Fig. 7 Amplitude spectrum of demodulation signal of the fiber laser sensor system

符。

图7为解调信号的幅度谱。此时光纤光栅激光器频率变化经过干涉仪后产生的相位变化的均方根值(RMS)为 $0.013 \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$,根据(6)式给出的应变与干涉仪相位变化的关系,可得到相应的激光器腔长应变均方根值为 $0.14 \text{ ne}/\sqrt{\text{Hz}}$,信号的信噪比约为48 dB,因此可计算出光纤激光传感系统在1 kHz频率时最小可检测动态应变值为

$5.6 \times 10^{-4} \text{ n}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

从图 7 可以看到,系统在低频段还存在着偏高的噪声峰,这主要是由于光纤激光器在低频段存在 $1/f$ 频率噪声的影响^[16]。同时,在实际使用过程中,外界环境噪声的影响会引起干涉仪臂长差的变化,从而引入附加相位噪声,因此在实际使用过程中,需要对干涉仪进行良好的封装,提高其对外界声音和振动的抗干扰能力。

5 结 论

提出了一种基于光纤光栅激光器的高分辨率光纤传感系统,分析了光纤光栅激光器的传感原理,采用改进的归一化相位载波解调技术进行干涉式解调,最后对该系统进行了动态应变测试。实验结果表明:该系统应变分辨率达到了 $5.6 \times 10^{-4} \text{ n}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$,并且解调结果与待测信号呈线性关系。这种新型的光纤激光传感系统在需要超高检测分辨率、超小传感器尺寸的特殊传感领域将体现出不可比拟的优势。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey. A review of recent developments in fiber optic sensor technology [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, **2**:291~317
- 2 Y. J. Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1997, **8**:355~375
- 3 Yang Sha, Cai Haiwen, Huang Chong *et al.*. Stability analysis and improvement of an interferometric interrogation for fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1537~1541
阳 莎,蔡海文,黄 冲等. 光纤光栅传感器干涉型解调仪的稳定性分析和改进[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1537~1541
- 4 Jiang Yi, Chen Shufen. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on 3×3 coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1487~1490
江 毅,陈淑芬. 用 3×3 耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11):1487~1490
- 5 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. Phase compensating detection method of interferometric fiber-optic hydrophones based on tuning the frequency of the laser [J].

- Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):654~658
王泽锋,罗 洪,熊水东等. 基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):654~658
- 6 Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1575~1579
杨 剑,赵 勇,倪行洁等. 新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1575~1579
 - 7 D. J. Hill, B. Hodder, J. D. Freitas *et al.*. DFB fibre-laser sensor developments [C]. *SPIE*, 2005, **5855**:904~907
 - 8 Wang Tianshu, Guo Yubin, Li Jun *et al.*. All-fiber type short cavity Er/Yb co-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1161~1164
王天枢,郭玉彬,李 军等. 全光纤型 Er/Yb 共掺光纤短腔激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1161~1164
 - 9 K. P. Koo, A. D. Kersey. Fibre laser sensor with ultrahigh strain resolution using interferometric interrogation [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(14):1180~1182
 - 10 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(10):1647~1653
 - 11 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Chung Wenghong. A fiber Bragg sensor system with interferometric demodulation technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):987~989
余有龙,谭华耀,钟永康. 基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):987~989
 - 12 Liang Ming, Qian Jingren, Sun Jian. A novel fiber Bragg grating wavelength detection technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7):865~869
梁 明,钱景仁,孙 箭. 一种新的光纤布拉格光栅波长移位检测技术[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7):865~869
 - 13 Huang Chong, Cai Haiwen, Geng Jianxin *et al.*. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a 3×3 fiber coupler for fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1397~1400
黄 冲,蔡海文,耿健新等. 基于 3×3 耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1397~1400
 - 14 Jiang Yi, Huang Junbin. Wavelength division multiplex based on fiber optical vibration sensor array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1525~1528
江 毅,黄俊斌. 基于波分复用器的光纤光栅振动传感器阵列[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11):1525~1528
 - 15 A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6):518~520
 - 16 Erlend Rønnekleiv. Frequency and intensity noise of single frequency fiber Bragg grating lasers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, **7**:206~235