

文章编号: 0253-2239(2007)11-1950-5

# 光纤光栅传感器阵列有源时域地址查询技术\*

李若明<sup>1</sup> 余有龙<sup>1,2</sup> 代文江<sup>2</sup> 刘盛春<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 暨南大学光电工程研究所, 广州 510632  
<sup>2</sup> 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 报道了一种基于环形腔光纤激光器和  $1 \times 4$  模拟电子开关的具备实时监测功能的光纤光栅传感网络查询技术, 利用级联的波分复用光栅串充当环形腔光纤激光器端镜, 借助可调法布里-珀罗滤波器对反射的信号光进行扫描, 调整光路结构并增加抽运光强度使信号光得到足够的增益, 则可获得各传感元工作波长的激光脉冲, 且依时序输出。又引入  $1 \times 4$  模拟电子开关, 将转换为电信号的激光输出按时序分配至 4 个输出信道。结合非平衡扫描干涉解调技术, 实现了对 4 光栅传感阵列的查询解调。1555 nm 波长时系统传感灵敏度的实验值为  $1.630^\circ/\mu\epsilon$ , 与理论值  $1.674^\circ/\mu\epsilon$  基本吻合。

**关键词:** 光纤光学; 光纤光栅; 传感网络; 环形腔光纤激光器; 波长扫描; 多信道输出; 干涉解调

中图分类号: TN253; TP212.14 文献标识码: A

## Active Time-Domain Addressing Technique for Fiber Bragg Grating Sensor Array

Li Ruoming<sup>1</sup> Yu Youlong<sup>1,2</sup> Dai Wenjiang<sup>2</sup> Liu Shengchun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632)  
(<sup>2</sup> Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080)

**Abstract:** A novel interrogation technology with the function of real-time monitoring for fiber Bragg grating (FBG) sensor system based on a ring-cavity fiber laser, and a  $1 \times 4$  analog electronic switch is reported. A cascaded wavelength-division-multiplexed FBG sensor array is acted as the reflector of the laser. Letting signal light obtain sufficient gain by adjusting the optical route and increasing the intensity of pump light, then laser pluses working at Bragg wavelength of each element will output orderly by introducing the technique of wavelength scanning with a tunable Fabry-Pérot filter. A  $1 \times 4$  analog electronic switch is employed. The laser pluses are allocated to 4-output channels in time-sequence. Demodulated with an unbalanced Michelson scanning interferometer, a 4-element array is addressed successfully. Working with a wavelength of 1555 nm, the system is demonstrated to be with a sensing sensitivity of  $1.630^\circ/\mu\epsilon$ , which agrees with the theoretical value of  $1.674^\circ/\mu\epsilon$ .

**Key words:** fiber optics; fiber Bragg grating; sensor network; ring-cavity fiber laser; wavelength scanning; multichannel output; interferometer demodulation

## 1 引 言

波长编码的光纤光栅(FBG)传感器的传感结果不受系统整体光强和光路中传输损耗的影响;同时它易于复用和网络化管理,可将众多光栅组合起来

对待测量进行准分布式传感<sup>[1~4]</sup>;此外传感回路易于植入、或附着在结构表面,对结构的机械性能几乎没有影响。这些决定其在健康监测和材料智能化领域应用中的优势,从而成为人们的研究热点<sup>[1~10]</sup>。

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0828)和广东省自然科学基金重点项目(04105843)资助课题。

作者简介: 李若明(1982—),男,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感器网络化技术等方面的研究。

E-mail: rml1982@yahoo.com.cn

导师简介: 余有龙(1965—),男,安徽桐城人,教授,博士生导师,主要从事光纤光电子领域方面的研究。

E-Mail: youlongyu@163.com

收稿日期: 2007-02-08; 收到修改稿日期: 2007-05-30

然而,一个光纤光栅传感网络实用与否、性能如何,关键之一在于其地址查询技术。已报道的查询技术根据光栅所起作用的不同,可分为有源<sup>[1]</sup>和无源<sup>[2~6]</sup>两种查询方式,具体方案很多,可归纳为滤波法<sup>[1,5,7]</sup>、时域地址查询法<sup>[2,6]</sup>、锁模法<sup>[8]</sup>以及色散法<sup>[11]</sup>等。无源查询方式虽然理论预期有较强的查询能力,但受制于光源能量和光路的传输损耗,实际查询能力有限。有源查询方式将能量集中于查询波长,利于增加系统的实际查询能力,且可获得 25 dB 以上的信噪比<sup>[1]</sup>。

用于健康监测的光纤光栅传感网络对待测量应该具备实时监测能力,否则对突发灾害难以预警。已报道的技术中仅多信道输出时域地址查询技术具备实时监测功能<sup>[2]</sup>,由于采取的是无源查询方式,系统的信噪比有待提高。本文将环形腔波长选择输出技术与光纤光栅传感网络时域地址查询技术相结合,借助非平衡迈克尔孙(Michelson)干涉解调技

术<sup>[12]</sup>,对充当端镜的光纤光栅波分复用(WDM)传感元件串成功地进行了有源时域地址查询。

## 2 原 理

如图 1 所示,在抽运激光激发下,掺铒光纤(EDF)中自发辐射形成的光波将由环形器进入波分复用光纤光栅传感元件串,辐射光被光栅串反射后,再由环形器耦合至法布里-珀罗(F-P)滤波器,其透过光中少部分光波由耦合器( $I/I'=5/1$ )耦合输出,大部分光波由隔离器至掺铒光纤,经其放大后至波分复用耦合器,构成闭合回路。环型腔中的法布里-珀罗滤波器受锯齿波信号驱动对各光纤光栅反射的信号进行波长扫描。对某个光栅的反射光波来说,滤波器的扫描调制了该波长在复合腔中的损耗,当满足适当的条件,该波长激光将能够实现脉冲输出。

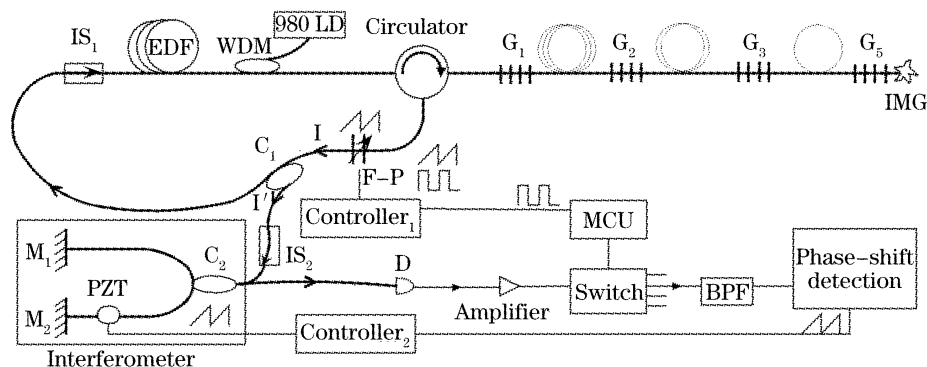


Fig. 1 Active time-domain addressing FBG sensor system  
G<sub>i</sub> ( $i=1,2,\dots,4$ ), fiber Bragg grating; IS<sub>i</sub> ( $i=1,2$ ), isolator; G: 20:80 coupler; C<sub>2</sub>: 3 dB coupler; M<sub>i</sub> ( $i=1,2$ ), mirror; EDF: erbium-doped fiber; D: detector; BPF: band-pass filter; MCU: micro control unit; IMG: index matching gel, WDM: wavelength division multiplexer, PZT: piezoelectric ceramic

图 1 有源时域地址查询系统

Fig. 1 Active time-domain addressing FBG sensor system

设法布里-珀罗滤波器的透射波长随驱动电压升高线性增加,每个周期从短波长向长波长扫描,扫描周期为  $T$ ,各个光栅的反射带宽相近都为  $\Delta\lambda_{3\text{ dB}}$ ,滤波器中心波长扫过带宽为  $\Delta\lambda_{3\text{ dB}}$  的光纤光栅波长范围所用时间  $\Delta t_i$  可表示为

$$\Delta t_i = \frac{\Delta\lambda_{3\text{ dB}}}{\lambda_{\text{long}} - \lambda_{\text{short}}} T, \quad (1)$$

式中扫描起、止波长  $\lambda_{\text{short}}$  和  $\lambda_{\text{long}}$  涵盖全部光栅的工作波长,且与滤波器的驱动电压有关。扫描开始后滤波器单个透射峰中心波长  $\lambda(t)_{\text{F-P}}$  与第  $i$  个光栅的中心波长  $\lambda_{\text{Bi}}$  重合所用时间为

$$t_{\text{Bi}} = \frac{\lambda_{\text{Bi}} - \lambda_{\text{short}}}{\lambda_{\text{long}} - \lambda_{\text{short}}} T, \quad (2)$$

若抽运光强高于阈值、 $L_i$  为与第  $i$  个光栅对应的谐振腔光程,  $\Delta t_i > 2L_i/c$  时,扫描该光栅的过程中,谐

振腔中足够建立激光振荡,并形成激光输出。而每扫描一个周期,图 1 所示的装置将能够对各传感光栅依波长次序实现脉冲激光输出,从而实现对各传感元的地址查询。

各激光脉冲经非平衡迈克尔孙扫描干涉仪后到达探测器,它将光信号变为电信号后,一个周期内其输出  $I_D$  可表示为

$$I_D \propto [1 + k(\lambda_{\text{Bi}}) \cos(\Phi_i + \Delta\Phi_i)] \times \sum_{i=1}^4 I_{i0} \text{rect}\left(\frac{t - t_{\text{Bi}}}{\Delta t_i}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right), \quad (3)$$

其中,  $I_{i0}$  为一个扫描周期内第  $i$  个光栅形成的激光脉冲强度,  $k(\lambda_{\text{Bi}})$  为对应布拉格波长的干涉条纹的可见度,  $\phi_i$  为对应波长照射时干涉仪两臂间静态相差,而  $\Delta\phi_i$  为其动态相位差。受单片机控制,  $1 \times N$  模拟电子开关将按时序将各信号分配至对应的输出信

道。一个扫描周期内第  $i$  个传感元对应的信道输出  $I_i$  为

$$I_i \propto I_{i0} [1 + k(\lambda_{Bi}) \cos(\Phi_i + \Delta\Phi_i)] \times \text{rect}\left(\frac{t - t_{Bi}}{\Delta t_i}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right), \quad (4)$$

输出的激光脉冲强度与抽运功率,腔内损耗,和相邻激光脉冲的时间间隔有关,且在不同的周期中是变化的。用  $a_i(t)$  表示第  $i$  个光纤光栅对应激光脉冲强度的变化系数,则该光栅对应信道输出  $I_i(t)$  为

$$I_i(t) \propto a_i(t) I_{i0} [1 + k(\lambda_{Bi}) \cos(\Phi_i + \Delta\Phi_i)] \times \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \otimes \text{rect}\left(\frac{t - t_{Bi}}{\Delta t_i}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = a_i(t) \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \otimes I_i, \quad (5)$$

若干涉仪的短臂缠绕在受锯齿波信号驱动的压电陶瓷(PZT)上,(3)式~(5)式中  $\Delta\Phi_i$  可表示为

$$\Delta\Phi_i = -\frac{4\pi nL}{\lambda_{Bi}} (1 - P_e) \epsilon_{xi} - \frac{4\pi n \Delta L_0}{\lambda_{Bi} \tau} \times \text{comb}\left(\frac{t}{\tau}\right) \otimes \left[ t \times \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (6)$$

$P_e$  为光纤介质的有效弹光系数,  $n$  为纤芯的折射率,  $\epsilon_{xi}$  为作用于第  $i$  个光纤光栅的轴向应变,  $L$  为干涉仪臂长差,  $\Delta L_0$  为加在干涉仪上的扰动幅度,  $\tau$  为扰动周期。将第  $i$  个光栅对应信道的信号通过以  $(1/\tau)$  为中心频率的有源带通滤波器后,输出  $I_{bpi}(t)$  为

$$I_{bpi}(t) = A(t) \cos(\Phi_i + \Delta\Phi_i), \quad (7)$$

式中  $A(t)$  为有源带通滤波器的放大倍数,与在压电陶瓷一个扰动周期内的第  $i$  个光栅对应的激光脉冲数量和强度相关,其值是变化的。以压电陶瓷的驱动信号做为相位计的参考信号,以  $I_{bpi}(t)$  作为相位计的测量信号,则相位计显示的相位差  $\Delta\phi$  将为  $-\frac{4\pi nL}{\lambda_{Bi}} (1 - P_e) \epsilon_{xi}$ , 这样就可以通过测  $\Delta\Phi$  再根据

$$\epsilon_{xi} = -\frac{\lambda_{Bi}}{4\pi nL (1 - P_e)} \Delta\Phi, \quad (8)$$

计算加在第  $i$  个光纤光栅上的轴向应变  $\epsilon_{xi}$ 。

### 3 实验结果

实验中各光栅的反射率和半峰全宽接近,分别为 90% 和 0.2 nm。光栅布拉格波长由左到右依次为  $G_1$ : 1557.801 nm、 $G_2$ : 1549.881 nm、 $G_3$ : 1551.939 nm 和  $G_4$ : 1555.119 nm,这样的排序可使被反射率略有不同的光栅反射的光信号强度近似相等。环形器与第一个传感元  $G_1$  间距为 140.6 cm,

由近及远各光栅间距分别为 137.7 cm、217.3 cm、158.7 cm。阈值电流为 18 mA 的 980 nm 激光器的功率  $I_p$  可达 100 mW。掺铒光纤长度为 2683.2 cm,环形腔中其他光纤长度为 1655.7 cm。环形器(Circulator)被用来规定光在环形腔和光栅串之间传播的方向,同时还用于阻止法布里-珀罗腔镜的逆时针反射光对系统的干扰。其插入损耗为 0.976 dB (1→2), 0.912 dB (2→3); 隔离度是 67.79 dB (2→1), 56.54 dB (3→2)。隔离器  $IS_1$  的插入损耗和隔离度为 0.14 dB 和 42 dB,  $IS_2$  的插入损耗和隔离度为 0.34 dB 和 36.5 dB。  $IS_1$  用于规定腔中环形振荡的方向,阻止掺铒光纤自发辐射光波被法布里-珀罗滤波器反射后在输出端输出,  $IS_2$  用来阻止光返回至激光腔,从而保证系统输出的稳定性。环形器左侧环路的衰减量约为 28.38 dB,其中铒光纤吸收为 22.75 dB,法布里-珀罗滤波器的插入损耗约为 3 dB。

#### 3.1 滤波器透过波长与控制电压间关系

所用法布里-珀罗滤波器的自由光谱范围为 56.7 nm,带宽为 66 pm。调节法布里-珀罗滤波器的控制电压,其透过波长随电压增加向长波长方向移动,可实现其在 1520~1570 nm 范围内调节。

#### 3.2 有源时域地址查询技术

驱动法布里-珀罗滤波器的锯齿波信号的频率为 1000 Hz,占空比为 100%,该驱动器同时产生一同频的占空比为 30% 的逻辑方波,用于触发单片机,使之控制模拟电子开关依次打开各个通道。

图 2 中波形 1 是法布里-珀罗滤波器中压电陶瓷(压电陶瓷)两端的实际驱动信号(纵坐标:1,2 为 10 V/div;3 为 5 V/div;4 为 2 V/div),下降沿有毛刺且较平缓。出现毛刺是由于锯齿波下降沿对应的高频接近压电陶瓷的共振频率,导致压电陶瓷发生了短时共振<sup>[13]</sup>。压电陶瓷两极电荷分布与内部的

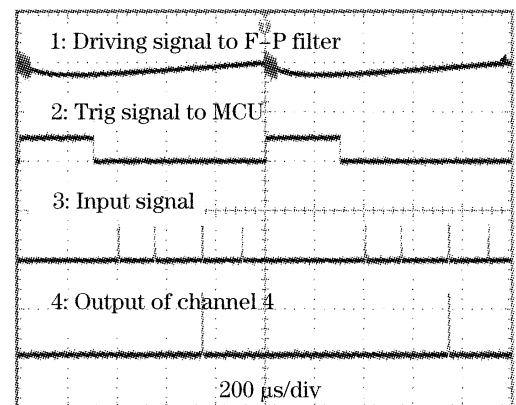


图 2 一个扫描周期中涉及到的信号  
Fig. 2 Different signals of a scan cycle

总极化强度是对应的,它们都和机械形变同步,而机械形变一般都比较缓慢,此乃下降沿变平缓的原因。波形 2 对应触发信号,其上升沿与锯齿波下降沿同步,下降沿触发。当  $I_p$  等于 55 mW,锯齿波直流为 8.0 V,交流峰-峰幅值为 3.6 V 时,法布里-珀罗滤波器的每次扫描产生 4 次激光输出(见图 3 所示)。这些输出的激光脉冲经探测器接收后变为电信号(图 2 中波形 3),电信号时序与光纤光栅的波长对应,短波长的激光脉冲先输出,一个周期内光信号输出次序为  $G_2$ : 1549.881 nm、 $G_3$ : 1551.939 nm、 $G_4$ : 1555.119 nm 和  $G_1$ : 1557.801 nm。模拟电子开关将探测器转换的脉冲信号分配到相应的各个信道,图 2 中波形 4 是与波长 1555.119 nm 的传感元对应信道的输出。

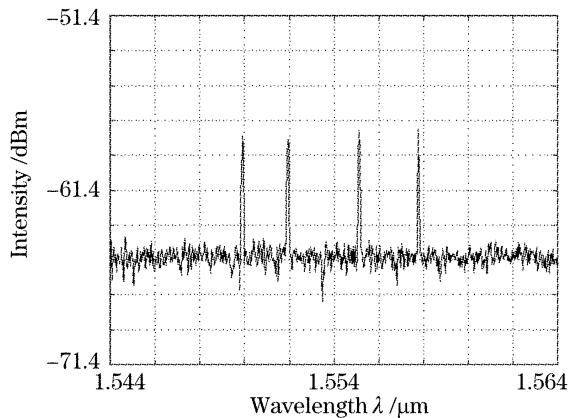


图 3 光谱仪记录到的环形腔输出

Fig. 3 Output of ring-cavity laser recorded by an optical spectrum analyzer

### 3.3 干涉解调

非平衡迈克尔孙干涉仪的平均臂长为 106 cm,臂长差  $L$  为 3.2 mm,光纤介质的折射率为 1.4489,两端镜的反射率均接近 90%,条纹的对比度为 0.3。干涉仪中压电陶瓷的驱动信号是 40 Hz 的锯齿波,其占空比为 100%。

光栅  $G_4$  (波长 1555.119 nm) 在不同应力作用下示波器显示的波形经叠加后如图 4(2)。输出端条纹随待测应变的增加而左移如图 4(3),表示干涉输出中出现附加相移,对应应变引起光纤光栅的波长漂移。在图 4(3)中 d 的幅度较小,对应输出的激光强度较弱。用相位计对其进行监测,图 5 是相移 ( $\Delta\phi_4$ ) 随应变 ( $\epsilon_4$ ) 变化关系的实验曲线,两者呈线性关系,斜率  $1.630^\circ/\mu\epsilon$  为系统传感灵敏度的实验值。取  $P_e=0.22, \lambda_{Bz}=1555$  nm,由(1)确定的理论值为  $1.674^\circ/\mu\epsilon$ 。在误差许可范围内可认为两者一致,从而证实了系统的应变传感能力。

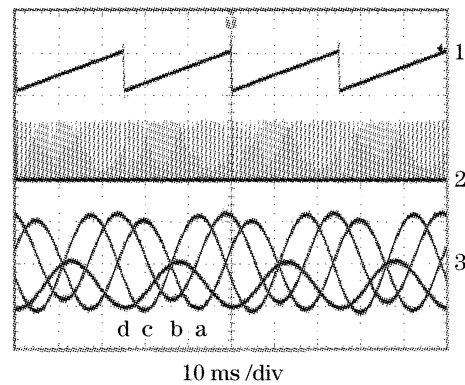


图 4 不同应力作用于  $G_4$  时对应的干涉仪输出。纵坐标: 1 为 10 v/div, 2 为 100 mv/div, 3 为 2 v/div。1: 压电陶瓷驱动信号; 2: 干涉仪的输出; 3: 经 38~42 Hz 的带通滤波器后的输出

Fig. 4 Output traces of the interferometer for different strain applied at  $G_4$ . Vertical, trace 1 is 10 V/div, trace 2 is 100 mV/div, trace 3 is 2 V/div; Trace 1: PZT driving signal; trace 2: the output of the interferometer; trace 3: trace 2 filtered with a 38~42 Hz band-pass filter. a:  $\epsilon_4 = 0 \mu\epsilon, \Delta\lambda_{Bz} = 0$  pm; b:  $\epsilon_4 = 50 \mu\epsilon; \Delta\lambda_{Bz} = 60.65$  pm; c:  $\epsilon_4 = 100 \mu\epsilon, \Delta\lambda_{Bz} = 121.3$  pm; d:  $\epsilon_4 = 150 \mu\epsilon, \Delta\lambda_{Bz} = 181.9$  pm

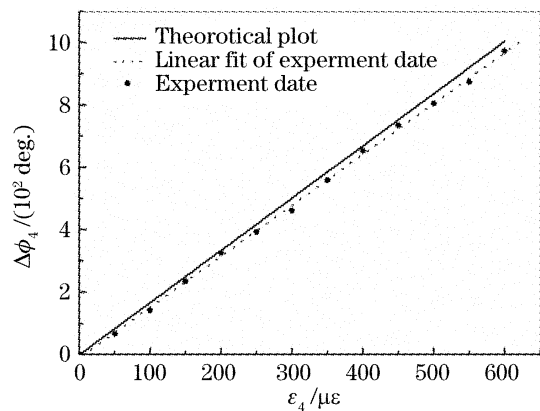


图 5  $\Delta\phi_4$  随  $\epsilon_4$  的变化曲线

Fig. 5 Experiment plot of  $\Delta\phi_4$  versus  $\epsilon_4$

系统的查询能力由法布里-珀罗滤波器的扫描范围,传感光栅的波长间距和掺铒光纤的谱宽决定,同时受查询速度制约。传感分辨力取决于干涉仪的臂长差以及相位计的角分辨力,所用的相位计的分辨力为  $0.01^\circ$ ,系统具备鉴辨约为  $6$  nε 的能力。裸纤光纤的应变承受能力可达  $10^4 \mu\epsilon$  左右,因此系统的测量范围取决于光纤光栅的谱间隔,以谱间隔不超过最小波长间隔的一半为被测应变范围的判据,这样本系统的测量范围  $-827 \sim 827 \mu\epsilon$ 。查询的频率决定系统对应变的响应时间,受激光建立时间和压电陶瓷响应时间制约,有源查询频率存在上限,本系统为 1000 Hz。

对于迈克尔孙干涉仪,由于外界的各种干扰的频率都在几十赫兹,提高扰动频率有利于减少外界低频干扰的影响。但对本系统保持查询频率的同时提高扰动频率将减少每个扰动周期内的信号脉冲的数目,这样探测器接收到的脉冲信号包含的扰动信息将出现失真,由采样定理可知干涉仪扰动频率不能高于查询频率的一半,当每个扰动周期内信号脉冲的数量少于两个时,将无法从脉冲信号中提取干涉仪扰动信号的信息,影响解调的结果,所以臂长差扰动频率不宜接近上限频率,干涉仪臂长差的扰动频率选为40 Hz。

本系统同一条光纤上相邻光栅的谱间隔决定传感范围,因光源波长范围的限制,可查询传感元的数目和传感元的传感范围存在矛盾。若能够实时监控每个扫描周期内激光信号的时序用以自动修正下一个扫描周期开关各个通道导通时间,将在不影响查询数目的同时,使传感范围的判据增加到接近相邻光栅间的最小谱间隔。

## 4 结 论

将传感光栅串用作环形腔激光器的端镜,用锯齿波控制法布里-珀罗滤波器扫描环形腔中传输波长,输出信号经模拟电子开关分配到各对应信道,结合迈克尔孙扫描干涉解调技术,对待测应变成功地进行了查询和解调。实验证实系统的传感灵敏度为 $1.630^\circ/\mu\epsilon$ 。该系统同时具备高信噪比和实时监控的功能,它解决了以往波分复用传感网络不能同时查询多个光栅的问题,克服了传统时分复用(TDM)传感技术中传感元间必须连接延时光纤的要求,更适合在埋置空间受限场合应用(如智能皮肤等)。

**致谢** 对黑龙江大学光纤所张金涛老师的支持表示感谢。

## 参 考 文 献

1 Youlong Yu, Luenfu Lui, Hwayaw Tam *et al.*. Fiber laser based wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system

- [J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 2001, **13**(7): 702~704
- 2 Yu Youlong, Liu Shenchun, Hwayaw Tam *et al.*. Time-domain addressing technique for fiber Bragg grating sensor system with the function of real-time monitoring[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 865~868 (in Chinese)
- 余有龙,刘盛春,谭华耀等. 具有实时监测能力的光纤光栅传感系统时域地址查询技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 865~868
- 3 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 822~824
- 4 M. A. Davis, A. D. Kersey. Application of a fiber Fourier transform spectrometer to the detection of wavelength encoded signals from Bragg grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1289~1295
- 5 M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam *et al.*. Interrogation of 60 fibre Bragg grating sensors with micro strain resolution capability[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1393~1394
- 6 R. S. Weis, A. D. Kersey, T. A. Berkoff. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1469~1472
- 7 G. A. Ball, W. W. Morey, P. K. Cheo. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4): 700~703
- 8 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain-sensor system with mode-locked interrogation [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 112~114
- 9 Yang Sha, Cai Haiwen, Huang Chong *et al.*. Stability analysis and improvement of an interferometric interrogation for fiber Bragg grating sensors [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1537~1541 (in Chinese)
- 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
- 10 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235 (in Chinese)
- 黄 锐,蔡海文,瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- 11 M. A. Putnam, M. L. Dennis, J. U. Kang *et al.*. Sensor grating demodulation using a passively mode locked fiber laser [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3042**: 352~357
- 12 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Chung Wenghong. A fiber Bragg grating sensor system with interferometric demodulation technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 987~989 (in Chinese)
- 余有龙,谭华耀,鍾永康. 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
- 13 Xiao Jia, Zhao Jianwei, Tian Shi. Frequency characterization of piezoelectric ceramic actuators driven by triangle-wave [J]. *Piezoelectric & Acoustooptics*, 2003, **25**(3): 203~206 (in Chinese)
- 肖 嘉,赵建伟,田 蔚. 压电陶瓷驱动器三角波频率特性 [J]. *压电与声光*, 2003, **25**(3): 203~206