

文章编号: 0253-2239(2006)05-0776-5

光纤微机电系统法布里-珀罗压力传感器的波分复用*

倪小琦 王 鸣 陈绪兴 戴霞娟

(南京师范大学物理科学与技术学院光电技术省重点实验室, 南京 210097)

摘要: 提出了一种用阵列波导光栅复用光纤微机电系统法布里-珀罗压力传感器的方法, 实现了法布里-珀罗压力传感器的准分布式测量。传感器基于法布里-珀罗腔干涉的原理, 采用微机电系统技术加工制作, 用双波长方法解调干涉信号, 利用传感器对两个不同波长光的反射率的比值与压力的单值关系确定所施加压力的大小, 用阵列波导光栅实现传感器复用。理论分析与实验验证了传感器解调和复用的基本原理。实验结果表明: 在压力的线性测量范围(0~1.5 MPa)内, 系统的灵敏度(相对反射率比值/压力)可达到 0.02026 MPa^{-1} , 测量结果具有较好的线性, 相对反射率比值的标准偏差小于 3×10^{-4} 。该系统可以补偿传感器光网中和波长无关的变动引起的误差, 具有好的线性、灵敏度和精度, 复用能力强且复用传感器间无串扰。

关键词: 导波与光纤光学; 法布里-珀罗传感器的复用; 双波长解调; 微机电系统; 阵列波导光栅

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Wavelength Multiplexing of Optical Fiber Microelectromechanical System Fabry-Pérot Pressure Sensors

Ni Xiaoqi Wang Ming Chen Xuxing Dai Xiajuan

(*Jiangsu Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097*)

Abstract: In order to realize the quasi-distributed measurement for Fabry-Pérot (F-P) sensors, a multiplexing scheme of optical fiber microelectromechanical system (MEMS) Fabry-Pérot pressure sensors with arrayed waveguide grating is presented. Based on Fabry-Pérot interferometry, the sensors are fabricated with microelectromechanical system techniques and interrogated with the dual-wavelength method. In this method, the single-valued relation between ratio of sensor reflectance at two different wavelengths and the calibrated pressure are used to determine the pressure. The arrayed waveguide grating (AWG) is used to multiplex the sensors. The demodulation and multiplexing principles are theoretically analyzed and experimentally verified. The experimental results demonstrate that in the linear measurement range of pressure (0~1.5 MPa), the sensitivity (ratio of sensor reflectivity/pressure) of the system achieves 0.02026 MPa^{-1} , the measured ratio has a good linearity with the pressure, and the standard deviation of the reflectance ratio is less than 3×10^{-4} . The system can eliminate errors resulted from wavelength-independent variations in the fiber interconnection to the sensor, and has reasonable linearity, sensitivity and precision. Many sensors can be multiplexed in this system and there is no observable crosstalk among them.

Key words: guided wave and fiber optics; multiplexing of Fabry-Pérot pressure sensors; dual-wavelength demodulation; microelectromechanical system; arrayed waveguide grating

1 引 言

光纤微机电系统(MEMS)压力传感器由于其具有的微型、响应频带宽、高灵敏度、可批量生产、免

除电磁干扰、适用于恶劣环境等特点而成为光纤传感领域中的热点^[1,2]。工业生产中常需要用多个光学传感器测量温度、应力和压力等物理量,这就使得

* 国家自然科学基金(50375074)和江苏省高技术研究计划(BG2003024)资助课题。

作者简介: 倪小琦(1981-),女,江苏常州人,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: xiaoqi_ni@163.com

导师简介: 王 鸣(1950-),男,江西九江人,教授,博士生导师,主要从事激光应用与传感方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn

收稿日期: 2006-05-09; 收到修改稿日期: 2006-10-17

多路复用成为光学传感器的一个重要问题。复用使得单个传感器的成本大幅度降低,提高了光学传感器对传统的电子传感器的竞争力。由于光纤布拉格光栅具有反射率高,反射特定波长的光,而其余波长的光都被透射的特点,所以目前对复用系统的研究主要集中在光纤布拉格光栅上^[3,4]。光纤法布里-珀罗传感器受其原理限制,复用技术十分困难。最近已有一些相关技术用于法布里-珀罗传感器的复用解调,例如,傅里叶变换复用解调法^[5],波分频分复用方法^[6]等。但这些方法的的复用能力和应用条件有一定的限制。

本文用双波长方法解调传感器干涉信号,有效提高了传感器的抗干扰能力^[7]。提出用阵列波导光栅复用光纤微机电系统压力传感器,阵列波导光栅解复用器将由光源输入的多波长光按波长分开,从不同的通道输出,具有滤波特性良好、性能长期稳定、高重复性、高可靠性、低插损、低串扰、易于与光纤有效耦合等优点。根据双波长解调的原理,只要光源的波长范围大于阵列波导光栅的自由频谱范围,阵列波导光栅的两个通道就可以用来解调一个光纤微机电系统压力传感器,系统的复用能力取决于光源的波长范围、阵列波导光栅的自由频谱范围和通道数。系统所用器件均为光器件,避免了电路噪声的引入,解调结果准确,具有较高的线性、灵敏度和精度。

2 复用系统及解调理论

2.1 传感器的复用系统

传感器的复用系统如图 1 所示,为简单起见,只

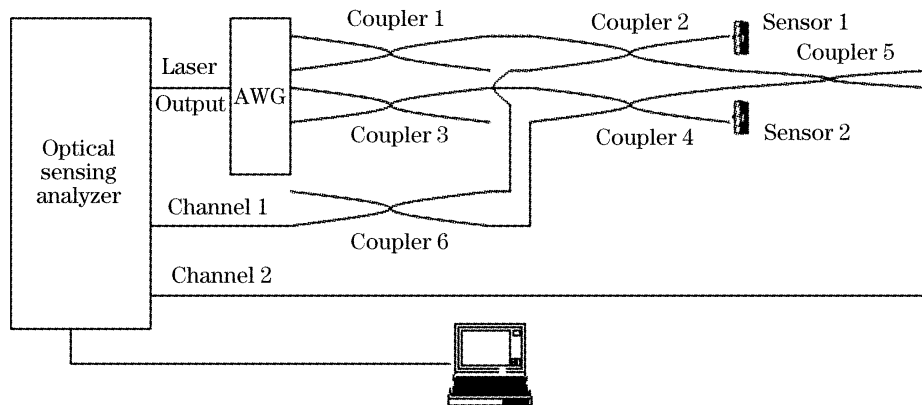


图 1 压力传感器复用系统

Fig. 1 Multiplexing system of pressure sensors

2.2 传感器的解调

该系统复用的传感器为光纤微机电系统压力传感器,基于法布里-珀罗腔干涉的原理,采用微机电

示出了两个光纤微机电系统压力传感器的复用系统。该系统包含一台光纤传感分析仪,一个阵列波导光栅(AWG),六个 2×2 的耦合器以及用于数据处理的计算机。光纤传感分析仪集激光光源和光谱接收设备的功能于一体,它内置一个波长范围为 $1510 \sim 1590 \text{ nm}$ 的激光扫描光源和两个光输入通道,可以用 5 Hz 的频率同时扫描两个输入通道。阵列波导光栅将输入光按波长从不同通道引出,每个通道的带宽约为 0.6 nm ,通道间隔为 0.8 nm (100 GHz)。选取阵列波导光栅的两个通道,通过耦合器 1 将两个波长的光耦合到一起,再经耦合器 2 分成功率相等的两束:一束经由耦合器 5 接到分析仪的通道 2,作为入射光;另一束照射到传感器 1,经反射后再次通过耦合器 2,经由耦合器 6 接到分析仪的通道 1,作为反射光。同理,选取阵列波导光栅的另外两个通道,通过耦合器 3,4 将这两个通道的光同时照射到传感器 2 上,入射光和反射光分别通过耦合器 5,6 由传感分析仪同时接收。分析仪将扫描到的四个波长的信号通过网线传到计算机,进行数据处理,从而解调出每个传感器上施加的压力。这样,我们就实现了法布里-珀罗腔传感器的两路复用。实际应用中,只需适量的增加耦合器,就可以实现更多路的复用,当然,复用的总个数受到阵列波导光栅通道数的限制。不管复用多少个传感器,每个传感器分得的波长都不相同,入射光和反射光光谱可以同时和分析仪上显示出来。又因为分析仪进行连续快速的扫描,所以,和一般使用可调激光光源的系统相比,该系统具有更好的实时性。

系统技术加工而成,结构如图 2 所示。

光从单模光纤进入传感器,在光纤-硼硅玻璃、硼硅玻璃-空气腔、空气腔-铝介质界面上反射,反射

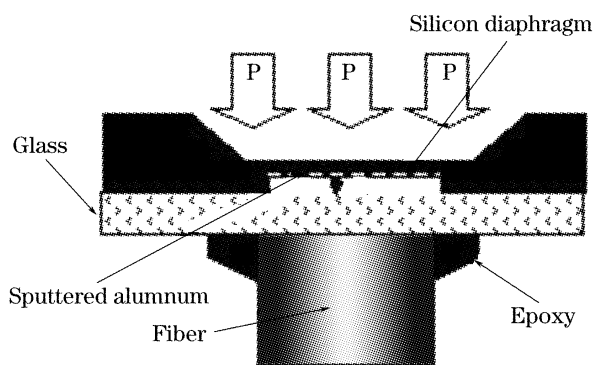


图 2 光纤微机电系统压力传感器结构示意图

Fig. 2 Sketch of optical fiber microelectromechanical system pressure sensor

光彼此干涉,最后反射到光纤的是复合腔的干涉信号,复合法布里-珀罗腔由硼硅玻璃层和空气腔构成。当硅敏感膜受到压力时,产生形变,导致法布里-珀罗腔腔长减小。根据弹性力学原理,在小挠度情况下,单晶硅横隔膜受到压力后的形变量可表示为^[8]

$$\omega = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left(1 - \frac{d^2}{R_0^2}\right)^2, \quad (1)$$

式中 ω 为硅敏感膜的形变量, P 为硅敏感膜所承受的压力, d 为到硅敏感膜中心轴的距离, E 为硅敏感膜的杨氏模量, h 为厚度, ν 为泊松比, R_0 为半径。从上式可以看出,硅敏感膜的形变与压力呈线性关系,传感器的灵敏度为 ω/P 。对硅膜, $E = 160 \text{ GPa}$, $h = 40 \text{ }\mu\text{m}$, $R_0 = 300 \text{ }\mu\text{m}$, $\nu = 0.22$, 根据(1)式可以算出硅敏感膜的灵敏度是 $0.13 \text{ }\mu\text{m}/\text{MPa}$ 。

复合腔的反射率可表示为

$$R(\lambda) = \frac{I_R}{I_0} = \left| \frac{r_1 + r_{23} \exp(j\Omega_1)}{1 + r_1 r_{23} \exp(j\Omega_1)} \right|^2, \quad (2)$$

$$r_{23} = \frac{r_2 + r_3 \exp(j\Omega_2)}{1 + r_2 r_3 \exp(j\Omega_2)}, \quad (3)$$

$$\Omega_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{glass}} t_{\text{glass}}, \quad \Omega_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_{\text{air}} t, \quad (4)$$

式中 r_{23} 是光从玻璃透射入空气腔,经镀膜面反射,又返回玻璃腔的等效反射系数。 r_1, r_2, r_3 分别表示光纤-硼硅玻璃,硼硅玻璃-空气、空气-铝介质介质的反射率,表达式如下:

$$\begin{cases} r_1 = (n_{\text{fiber}} - n_{\text{glass}})/(n_{\text{fiber}} + n_{\text{glass}}), \\ r_2 = (n_{\text{glass}} - n_{\text{air}})/(n_{\text{air}} + n_{\text{glass}}), \\ r_3 = (n_{\text{air}} - n_{\text{Al}})/(n_{\text{air}} + n_{\text{Al}}), \end{cases} \quad (5)$$

式中 λ 为工作波长, t_{glass} 和 t 分别为玻璃的厚度和空气腔的腔长, $n_{\text{glass}}, n_{\text{air}}, n_{\text{Al}}$ 分别为玻璃、空气和铝介质的折射率。

为了消除光路中波长无关的干扰,采用双波长

法对反射信号进行处理。定义相对反射率 R' 为接收到的传感器的反射信号与入射信号光功率的比值,则有

$$R'(t, \lambda) = \alpha(\lambda) \frac{L(\lambda) M_1 R(\lambda)}{L(\lambda) M_2} = \alpha(\lambda) \frac{M_1 R(\lambda)}{M_2}, \quad (6)$$

其中 $\alpha(\lambda)$ 为光学系统对应 λ 引起的任何损耗,包括光纤的连接损耗,光器件的插入损耗等; $L(\lambda)$ 为光源发出的对应波长 λ 的光强; M_1 为光从光源发出,直到作为反射光被分析仪接收所经过的耦合器的分光比的乘积,包括耦合器 1、6,两次经过耦合器 2; M_2 为光从光源发出直到作为入射光被分析仪接收所经过的耦合器的分光比的乘积,包括耦合器 1、2、5。 $R(\lambda)$ 为传感器的反射率。

定义相对反射率的比值为 $I(t, \lambda_1, \lambda_2)$:

$$I(t, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{R'(t, \lambda_1)}{R'(t, \lambda_1) + R'(t, \lambda_2)} = \frac{\alpha(\lambda_1) \frac{M_1 R(\lambda_1)}{M_2}}{\alpha(\lambda_1) \frac{M_1 R(\lambda_1)}{M_2} + \alpha(\lambda_2) \frac{M_1 R(\lambda_2)}{M_2}} = \frac{\alpha(\lambda_1) R(\lambda_1)}{\alpha(\lambda_1) R(\lambda_1) + \alpha(\lambda_2) R(\lambda_2)}. \quad (7)$$

假设由光学系统引起的任何光损耗在波长范围内与波长 λ_1, λ_2 无关,则有

$$I(t, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{R(\lambda_1)}{R(\lambda_1) + R(\lambda_2)}, \quad (8)$$

结合(8)式和(2)式,可以看出,当输入光波长 λ_1, λ_2 确定时,由于空气腔腔长的变化改变了相干光的相位差,引起法布里-珀罗传感器输出光强的变化,进而引起 $I(t, \lambda_1, \lambda_2)$ 的变化。

通过模拟计算得到如图 3 所示的相对反射率比值 I 与空气腔腔长的关系。选择模拟参量为 $\lambda_1 = 1533 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1537.7 \text{ nm}$, 光纤是单模阶越型的,折射率为 1.468; 硼硅玻璃厚度为 $400 \text{ }\mu\text{m}$, 折射率为 1.473; 铝的反射率为 0.98。

从图 3 可以看出,当传感器空气腔腔长在一定范围内变化时,比值信号与传感器腔长存在线性关系,这时通过测量计算比值的大小就可以反推出腔长微位移,即硅敏感膜的微小变化,从而根据硅膜挠度与压力的线性关系推出硅膜受到的压力。实际应用中通过测量并计算得比值 I 后代入用最小二乘法拟合得到的压力与反射率比值的校正公式就可以得到压力 P 。由于制作的传感器初始腔长约为 $4.350 \text{ }\mu\text{m}$, 当压力增加到 1.5 MPa 时,硅膜的挠度为 $0.195 \text{ }\mu\text{m}$, 传感器腔长减小为 $4.155 \text{ }\mu\text{m}$ 。从图 3

可以看出,只有当压力不超过 1.5 MPa 时,相对反射率比值与传感器的腔长才具有良好的线性关系。因此,传感器的测量范围是 0~1.5 MPa。

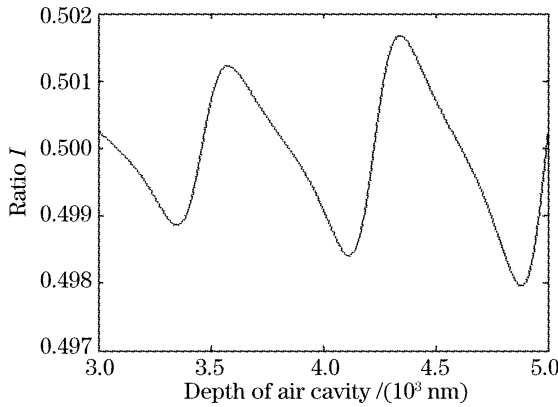


图 3 相对反射率比值 I 与空气腔腔长的关系
Fig. 3 Ratio of reflectivity versus depth of air cavity

3 实 验

实验装置如图 1 所示,光纤传感分析仪的激光输出端和阵列波导光栅解复用器的输入端通过单模光纤相连。所用阵列波导光栅有 40 个通道,波长范围为 1529.5~1561.4 nm,自由频谱范围为 31.9 nm,通道间隔为 100 GHz。耦合器 1 将阵列波导光栅的通道 6(中心波长为 1533.011 nm,带宽 0.648 nm)和通道 12(中心波长 1537.702 nm,带宽 0.654 nm)输出的光耦合到一起,照射到传感器 1,耦合器 3 将阵列波导光栅通道 19(中心波长 1543.241 nm,带宽 0.653 nm)和通道 25(中心波长 1548.019 nm,带宽 0.654 nm)输出的光耦合到传感器 2。每个传感器分得两个波段的光,如图 4 所示。

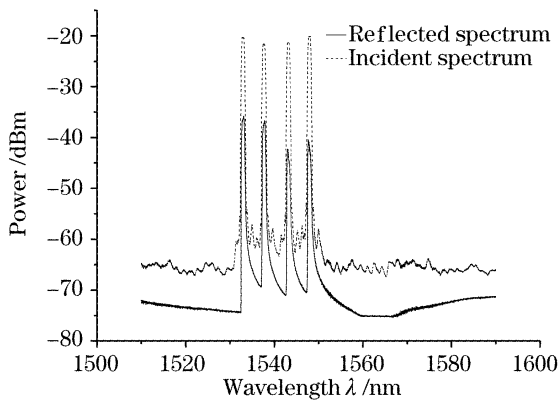


图 4 压力为 0 时传感器的入射谱和反射谱
Fig. 4 Incident and reflected spectra of sensors when pressure is 0 MPa

入射光和反射光同时由分析仪接收,图 4 中虚线为传感器的入射谱,实线为反射谱,反射光和入射光的比值作为传感器的相对反射率 R 。利用标准活

塞式压力计给光纤微机电系统压力传感器加压,从 0 开始,到 1.5 MPa,间隔 0.1 MPa 同时对两个传感器施加压力,每个压力对应的传感器入射谱和反射谱分别测量十次。为了清晰起见,只选取压力分别为 0,0.5 MPa,1.0 MPa,1.5 MPa 时 1530~1550 nm 波段的反射谱列于图 5。

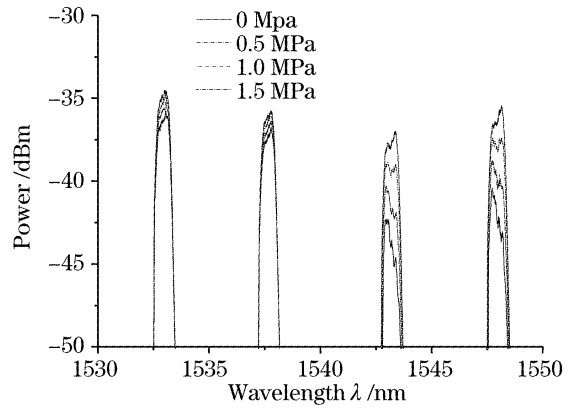


图 5 压力为 0,0.5 MPa,1.0 MPa,1.5 MPa 时两传感器的反射谱

Fig. 5 Reflected spectra of the sensors when pressure is 0,0.5 MPa,1.0 MPa,1.5 MPa

从图中可以看出,随着施加压力的增加,反射谱的幅值逐渐增大,但传感器 1 的变化幅度比传感器 2 的小。接下来进行数据处理。对传感器 1,选用 $\lambda_1 = 1533.0$ nm 和 $\lambda_2 = 1537.7$ nm,根据这两个波长对应的反射光和入射光的功率,算出相对反射率 $R_{1\sim 10}(\lambda_1)$ 和 $R_{1\sim 10}(\lambda_2)$,根据(8)式算出相对反射率比值 $I_{1\sim 10}(P, \lambda_1, \lambda_2)$,求出平均值 $I(P, \lambda_1, \lambda_2)$ 。对传感器 2,选用的双波长为 $\lambda_1 = 1543$ nm 和 $\lambda_2 = 1548$ nm,同样算出每个压力对应的相对反射率比值平均值 $I(P, \lambda_1, \lambda_2)$ 。然后以压力(单位 MPa)为横坐标,相对反射率比值为纵坐标,用最小二乘法分别对两个传感器的实验数据进行线性拟合,得到各自的拟

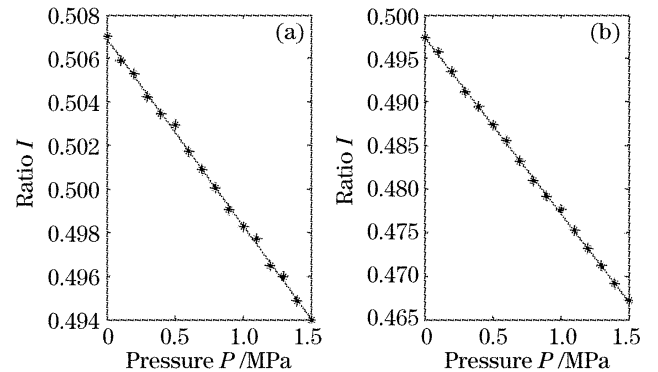


图 6 相对反射率比值 I 与压力 P 的关系。
(a) 传感器 1, (b) 传感器 2

Fig. 6 Reflectivity ratio I versus pressure P .
(a) Sensor 1, (b) sensor 2

合直线,如图 6 所示。传感器 1 的拟合直线为: $I=0.50693-0.00858P$,系统灵敏度为 $0.00858/\text{MPa}$;传感器 2 的拟合直线为: $I=0.49749-0.02026P$,系统灵敏度为 $0.02026/\text{MPa}$ 。图 7 为两个传感器的标准偏差。从图 6 和图 7 可以看出,系统复用两个光纤微机电系统压力传感器,在硅敏感膜受到 $0\sim 1.5\text{ MPa}$ 压力时具有好的线性和精度,且传感器之间没有明显的串扰。

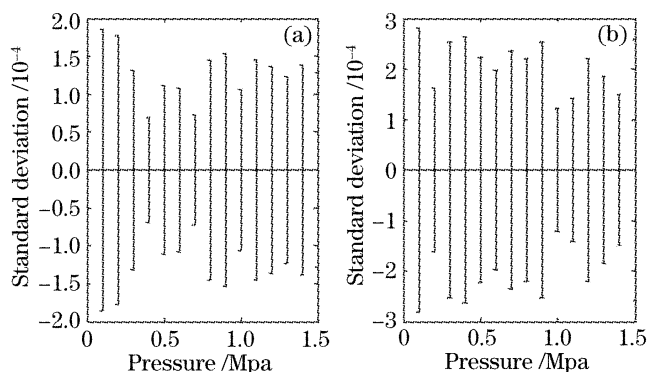


图 7 标准偏差。(a) 传感器 1, (b) 传感器 2

Fig. 7 Standard deviation. (a) Sensor 1, (b) sensor 2

考虑到温度对硅膜的影响,讨论一下温度对该传感器带来的误差。硅的热膨胀系数为 $2.6\ \mu\text{e}/^\circ\text{C}$,对 $40\ \mu\text{m}$ 厚的硅膜,当温度变化 $50\ ^\circ\text{C}$ 时,硅膜厚度的变化为 $5.2\ \text{nm}$ 。在 $1.5\ \text{MPa}$ 的压力下,硅膜的挠度为 $0.195\ \mu\text{m}$ 。也就是说,温度引起的硅膜膨胀相当于 $1.5\ \text{MPa}$ 压力下传感器腔长改变量的 2.67% 。因此,当传感器用于温度变化不太大的环境下或者压力变化范围很大时,温度引起的误差几乎可以忽略。当然,在高精度的测量中,要采取适当的温度补偿策略,比如说同时使用该压力传感器和温度传感器,根据温度传感器的测量值修正压力传感器的测量值。

4 结 论

提出了一种用阵列波导光栅实现光纤微机电系统压力传感器的复用方案,解决了法布里-珀罗干涉仪型传感器组网难的问题。系统避免了光电器件的

使用,从而消除了电噪声的引入。实验证明,该系统具有良好的线性、精度,复用传感器之间没有串扰,而且本系统对复用传感器的初始腔长没有任何限制。本实验系统中所用传感分析仪的光源范围覆盖了阵列波导光栅的通道范围,因此,系统的复用能力取决于阵列波导光栅的通道数。理论上说,该实验系统能复用 20 个传感器。随着阵列波导光栅通道数的增加,系统的复用能力还可以进一步加强。

参 考 文 献

- 1 Don C. Abeysinghe, Samhita Dasgupta, Joseph T. Boyd *et al.*. A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9): 993~995
- 2 Jie Zhou, Samhita Dasgupta, Hiroshi Kobayashi *et al.*. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(4): 598~604
- 3 Yasukazu Sano, Toshihiko Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Lightwave Technology*, 2003, **21**(1): 132~139
- 4 D. C. C. Norman, D. J. Webb, R. D. Pechstedt. Extended range interrogation of wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensors using arrayed waveguide grating[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(24): 1714~1716
- 5 Chen Weimin, Zhu Yong, Tang Xiaochu *et al.*. Study on the serial multiples of optical fiber Fabry-Pérot strain sensors with Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1481~1486 (in Chinese)
陈伟民,朱永,唐晓初等. 光纤法布里-珀罗传感器串连复用的傅里叶变换解调方法初探[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1481~1486
- 6 Zhou Changxue, Rao Yunjiang, Zhu Tao. SFDM/ CWDM of fiber-optic Fizeau strain sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1472~1476 (in Chinese)
周昌学,饶云江,朱涛. 光纤非应变传感器的波分频复用方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1472~1476
- 7 Wang Tingting, Wang Ming, Li Ming *et al.*. Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber Fabry-Pérot sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1297~1301 (in Chinese)
王婷婷,王鸣,李明等. 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1297~1301
- 8 Gregory T. A. Kovacs. *Micromachined Transducers Sourcebook* [M]. Zhang Wendong, Dong Haifeng, Li Yonghong *et al.* transl., Beijing: Science Publishers, 2003. 179~181 (in Chinese)
格雷戈里 T. A. 科瓦奇. 微传感器与微执行器全书[M]. 张文栋,董海峰,李永红等译,北京:科学出版社,2003. 179~181