

文章编号:1004-4213(2010)01-0047-6

# 一种基于光纤光栅法布里-珀罗腔的低频振动传感器\*

成振龙, 赵建林<sup>†</sup>, 周王民, 吕全超, 潘子军, 樊帆

(西北工业大学 理学院 光信息科学与技术研究所; 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710072)

**摘要:**提出了一种基于光纤光栅法布里-珀罗(F-P)腔的低频振动传感方案并进行了理论分析和实验研究. 采用单频激光器作为光源, 光纤光栅 F-P 腔通过两点涂胶方式粘接在等强度悬臂梁上, 待测振动信号通过支架和悬臂梁将振动作用传至光纤光栅 F-P 腔, 引起腔长周期性变化, 从而改变光纤光栅 F-P 腔的反射光谱特性, 通过解调输出光信号的振荡频率和峰值, 即可实现对振动信号频率和幅值的测量. 利用压电陶瓷模拟的低频振动信号进行了实验验证, 测量结果与理论分析相吻合. 该传感器测量灵敏度高, 特别适用于微弱振动信号的测量.

**关键词:**振动传感器; 光纤传感器; 光纤布喇格光栅; 法布里-珀罗腔

**中图分类号:** TN253

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 3788/gzxb20103901. 0047

## 0 引言

振动测量在微机电系统、土木建筑、公路桥梁、电力设备、起搏器控制、精密隔振平台检测等各个方面均有广泛应用<sup>[1-5]</sup>. 光纤振动传感器由于灵敏度高、响应速度快、不受电磁干扰、可进行非接触测量等优点而更受到广泛关注. 目前, 光纤振动传感器采用的测量方法主要有偏振态法<sup>[6]</sup>、波长调制法<sup>[7]</sup>及干涉法<sup>[8-9]</sup>等. 其中, 偏振态法利用光纤中传输光波随测量值变化而导致偏振状态发生改变来感知振动信号, 但单模光纤双折射引起的光波偏振态随机变化是其在应用中面临的主要问题; 波长调制主要采用光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Gating, FBG), 但其解调系统比较复杂, 且难以实现高灵敏度的振动测量<sup>[10]</sup>; 干涉法采用的主要干涉光路结构包括双光路型干涉仪和法布里-珀罗干涉仪(F-P Interferometer, FPI). 双光路型干涉仪由信号臂光纤和参考臂光纤构成, 利用振动产生的光纤应变使干涉仪信号臂的相位发生变化. 最初的光纤振动传感器即采用双光路干涉式结构, 由于灵敏度低且易受环境温度及光纤损耗等因素的干扰, 其应用受到限制; FPI 型振动传感器测量准确度高, 但传统的 FPI 不易加工, 且非本征型 FPI 易受外界环境温度影响.

本文提出一种基于光纤光栅 F-P 腔的低频振动传感器. 该传感器兼具一般 FPI 测量准确度高和 FBG 传感器可绝对测量的特点, 采用单频激光作光源, 光信号经过光电探测系统进入示波器或专用信号解调电路, 根据示波器输出波形的强度峰-峰值和频率, 完成对低频振动信号的准确和稳定测量.

## 1 理论分析

### 1.1 理论基础

如图 1, 在一根单模光纤中间隔一定距离写入两个光栅常量  $\Lambda$  和光栅长度  $L_0$  相同的 FBG<sub>1</sub> 与 FBG<sub>2</sub> 作为一对反射镜, 便构成一个光纤光栅 F-P

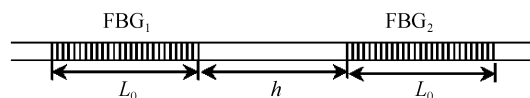


图 1 光纤光栅 F-P 腔结构  
Fig. 1 Schematic diagram of the fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity

腔. 设 FBG 的复振幅反射系数为  $r_g = |r_g| \exp(i\varphi)$ , 则其反射率为  $R_g = r_g \cdot r_g^*$ , 其中  $r_g^*$  表示  $r_g$  的复共轭. 利用耦合波方程<sup>[11]</sup>, 可以计算出腔长为  $h$  的光纤光栅 F-P 腔的反射率表达式为

$$R_{F-P} = \frac{I_R}{I_0} = \frac{F \sin^2(\beta h + \varphi)}{1 + F \sin^2(\beta h + \varphi)} \quad (1)$$

式中,  $F = 4R_g / (1 - R_g)^2$  为精细系数,  $\beta = 2n_{\text{eff}}\pi/\lambda$  为传播常量,  $n_{\text{eff}}$  为光纤纤芯的有效折射率,  $\varphi$  为 FBG 复振幅反射系数的初始相位.

对于图 2 所示的等腰三角形等强度悬臂梁<sup>[12]</sup>

<sup>†</sup> Tel: 029-88431656-801  
收稿日期: 2009-03-26

Email: jljzhao@nwpu.edu.cn  
修回日期: 2009-05-05

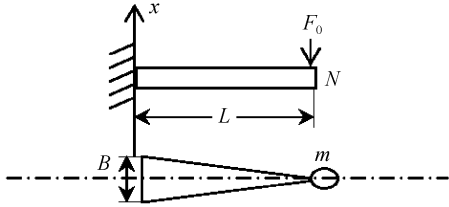


图2 等强度悬臂梁结构

Fig. 2 Cantilever structure of even distribution of strain along the axis

结构,当梁的三角形顶端受到力  $F_0$  的作用时,梁的上下两个表面处的轴向应变  $\varepsilon$  为均匀分布,其大小可以表示为

$$\varepsilon = \frac{6F_0L}{EBN^2} = \frac{6L}{EBN^2} \frac{EBN^3}{6L^3} x = \frac{N}{L^2} x \quad (2)$$

式中,  $E$  为悬臂梁的杨氏模量;  $L$ ,  $B$  和  $N$  分别表示悬臂梁的长度、底部宽度和厚度;  $F_0$  为外界振动在悬臂梁端部所引起的等效作用力,该作用力使梁的自由端发生离轴振动;  $x$  表示等强度悬臂梁自由端部的离轴受迫振动位移。

如图3,将光纤光栅 F-P 腔粘在悬臂梁上,当待测振动通过支架作用到等强度悬臂梁上而引起挠度变化时,因应力均匀分布,光纤光栅 F-P 腔将整体

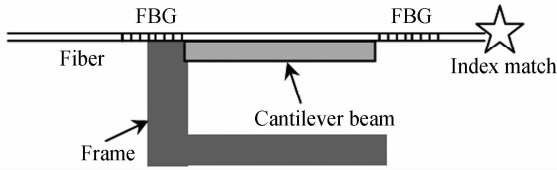


图3 光纤光栅 F-P 腔振动传感器探头结构

Fig. 3 Schematic diagram of the vibration sensor based on fiber Bragg grating F-P cavity

发生周期性的均匀应变,引起 F-P 腔长周期性变化,从而改变光纤光栅 F-P 腔的反射光谱特性.应变与光纤光栅 F-P 腔长变化  $\Delta h$  的关系为

$$\Delta h = \varepsilon h = \frac{Nh}{L^2} x \quad (3)$$

式中  $x = (A_0/K)(\sin \omega t / 1 - \tau^2) = B_0(\sin \omega t / 1 - \tau^2)$ , 其中  $K = EBN^3/6L^3$  为悬臂梁的等效弹性刚度系数,  $A_0$  为激振振幅,  $\omega$  为激振频率,  $\tau = \omega/\omega_0$  为频率比,  $\omega_0$  为悬臂梁固有频率,  $B_0 = A_0/K$ ,  $B_0/1 - \tau^2$  表示受迫振动的幅值. 式(3)表明,光纤光栅 F-P 腔长变化量  $\Delta h$  与振动位移  $x$  成正比。

当光纤光栅 F-P 腔反射率较低 ( $R_{F-P} < 5\%$ ) 时,可以近似等效为双光路干涉情况<sup>[13]</sup>,故光纤光栅 F-P 腔反射率与腔长的关系可表示为

$$I_R = 2I_0 R_g \left[ 1 + \cos \left( \frac{2n_{\text{eff}} \pi}{\lambda} \Delta h + \varphi \right) \right] \quad (4)$$

调节光纤光栅 F-P 腔的静态工作点,并且将腔长  $h$

的变化限制在小于  $\lambda/4$  的较小范围,则光电探测系统的输出信号强度与腔长变化量  $\Delta h$  之间的关系,可以由式(4)简化为近似线性关系<sup>[13]</sup>,即

$$I_R \approx 2I_0 R_g \left( \frac{2n_{\text{eff}} \pi}{\lambda} \right) \Delta h = \alpha I_0 \Delta h \quad (5)$$

式中  $\alpha = 4n_{\text{eff}} \pi R_g / \lambda$  为光纤光栅 F-P 腔的特性参量. 将式(3)代入式(5),得

$$I_R = \alpha I_0 \frac{Nh}{L^2} \frac{A_0 \sin \omega t}{k(1 - \tau^2)} = \beta A_0 \sin \omega t \quad (6)$$

式中  $\beta = \alpha I_0 Nh / L^2 k(1 - \tau^2)$ . 对于给定传感器系统,光纤光栅 F-P 腔和悬臂梁结构的参量确定. 可以看出,当悬臂梁固有频率较高时,对于低频振动信号,有  $1 - \tau^2 \approx 1$ . 此时  $\beta$  仅仅是一个与光纤光栅 F-P 腔和悬臂梁结构参量有关的常量,于是光纤光栅 F-P 腔的反射光强幅值和振动幅值成正比,而频率和被测振动频率相等。

## 1.2 最低可探测振幅计算

光纤光栅 F-P 腔振动传感器的灵敏度取决于 F-P 腔工作点的选取. 当 F-P 腔工作在输出光强随相位变化的最大处时,即可获得最大探测灵敏度. 设 F-P 腔工作于点  $\phi_0$  时  $dI/d\phi$  取最大值,外界激振作用通过悬臂梁振动而导致光纤光栅 F-P 腔长改变,使反射光产生相位变化  $\Delta\phi$ ,从而使反射光强发生变化. 忽略高次项,得

$$I_R(\phi_0 + \Delta\phi) = I_R(\phi_0) + \left( \frac{dI_R}{d\phi} \right)_{\text{max}} \Delta\phi \quad (7)$$

$$\left| \frac{dI_R}{d\phi} \right|_{\text{max}} = 0.64 \sqrt{F} \quad (8)$$

设入射光为单色光,忽略波长变化的影响,则光纤光栅 F-P 腔的相位变化为

$$\Delta\phi = (4n_{\text{eff}} \pi / \lambda) \Delta h \quad (9)$$

光纤光栅 F-P 腔的输出光信号经过光电二极管接收,产生光电流为

$$i_{\omega} = I \eta = \eta \left( \frac{dI_R}{d\phi} \right)_{\text{max}} \Delta\phi \quad (10)$$

式中  $\eta$  为光电探测系统的光-电转换效率. 只考虑光电流幅值  $i_{\omega}$ , 则为

$$i_{\omega} = \left| \frac{dI_R}{d\phi} \right|_{\text{max}} \eta \frac{4n_{\text{eff}} \pi Nh}{\lambda L^2} \frac{B_0}{1 - \tau^2} \quad (11)$$

因为系统中主要的噪音来自光电二极管,所以考虑噪音主要是散粒噪音,则其均方根电流为

$$i_n^2 = 2eI_0 \Delta f \quad (12)$$

式中,  $e$  为电子电荷,  $\Delta f$  为传感器系统的带宽,  $I_0$  为入射光强. 由此得传感器系统的信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{i_{\omega}^2}{i_n^2} = \frac{1}{2eI_0 \Delta f} \left( \left| \frac{dI}{d\phi} \right|_{\text{max}} \frac{4\pi n_{\text{eff}} Nh}{\lambda L^2} \eta \frac{B_0}{1 - \tau^2} \right)^2 \quad (13)$$

若采用示波器直接模拟采集信号,在散粒噪音极限

下,即  $SNR=1$  时,有

$$B_0 = \frac{(1-\tau^2)\lambda L^2}{2.56n_{\text{eff}}\pi\eta Nh\sqrt{F}} \sqrt{\frac{2eI_0\Delta f}{F}} \quad (14)$$

于是,可求得最小可探测振动振幅为

$$A_0 = KB_0 = K \frac{(1-\tau^2)\lambda L^2}{2.56n_{\text{eff}}\pi\eta Nh\sqrt{F}} \sqrt{\frac{2eI_0\Delta f}{F}} \quad (15)$$

## 2 实验结果

图 4 为实验系统示意图.光源为分布反馈式激光器(Distributed Fiber Laser,DFB),功率  $I_0=5\text{ mW}$ ,带宽  $\Delta f<10\text{ MHz}$ ;探头中的悬臂梁采用图 2 所示等强度悬臂梁结构,悬臂梁采用 304 号不锈钢材料,其杨氏模量  $E=1.875\times 10^{11}\text{ N/m}^2$ ,尺寸规格为: $N=1.5\text{ mm}$ , $B=10\text{ mm}$ , $L=60\text{ mm}$ ,端部质量块  $m=50\text{ g}$ ,固有频率  $\omega_0>10\text{ kHz}$ ;悬臂梁支架同样采用 304 号不锈钢,利用 AB 胶与悬臂梁粘合;所用光纤光栅 F-P 腔的中心波长为  $1549.89\text{ nm}$ ,光栅反射率为  $4.97\%$ ,纤芯有效折射率  $n_{\text{eff}}=1.457$ ,F-P 腔的腔长为  $10\text{ cm}$ ,将光纤光栅 F-P 腔通过两点涂胶的方式粘贴在等强度悬臂梁上,粘贴时对 F-P 腔施加一定预应力使其处于有效工作状态.由光源发出的光经过环形器进入传感器探头,光纤光栅 F-P 腔反射后再次通过环形器到达光电探测器,探测到的信号经光电转换后送入数字示波器,最后由数字示波器读取输出电压的幅值与频率.

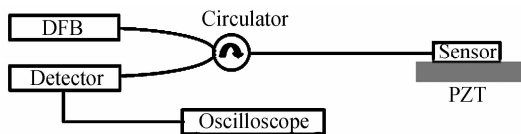


图 4 实验系统

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental system

实验中采用 PZT 模拟振动信号,PZT 尺寸为  $8\times 8\times 60\text{ mm}^3$ ,由信号发生器提供驱动电压和频率,调节信号发生器,即可改变 PZT 振动信号.利用

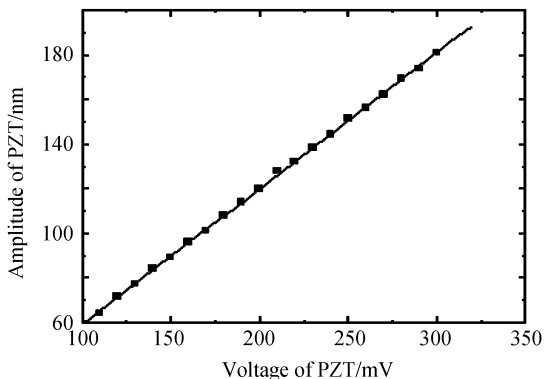
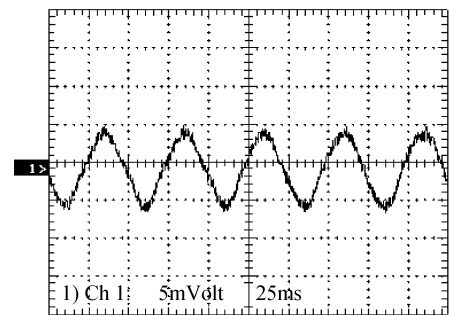


图 5 驱动电压和振幅的关系

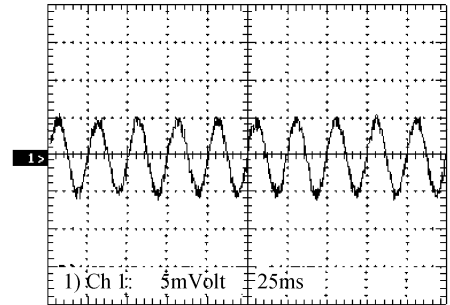
Fig. 5 Dependence of amplitude on driving frequency of PZT

FBG 匹配法对 PZT 的驱动电压和振动幅值进行定标,定标曲线如图 5,拟合结果的线性度为  $99.98\%$ ,表明 PZT 驱动电压和振动幅值之间成线性关系.

实验环境温度为  $19.7\text{ }^\circ\text{C}$ .调节 PZT 的驱动电压为  $200\text{ mV}$ ,使 PZT 驱动频率分别为  $20\text{ Hz}$  和  $40\text{ Hz}$  时,示波器的输出波形如图 6,由于驱动电压振幅一定,测量过程只是改变驱动电压频率即振动频率,故此时实际上是对振动频率的测量.对  $20\sim 200\text{ Hz}$  的振动信号测量结果如图 7,可以看出,测量频率与实际频率在误差范围内相等,拟合线性度为  $99.98\%$ ,与式(6)分析结论一致,说明对振动频率的测量在误差范围内准确.



(a)  $f=20\text{ Hz}$



(b)  $f=40\text{ Hz}$

图 6 输出波形与振动频率的关系

Fig. 6 Dependence of the sensor output on vibration frequencies of PZT

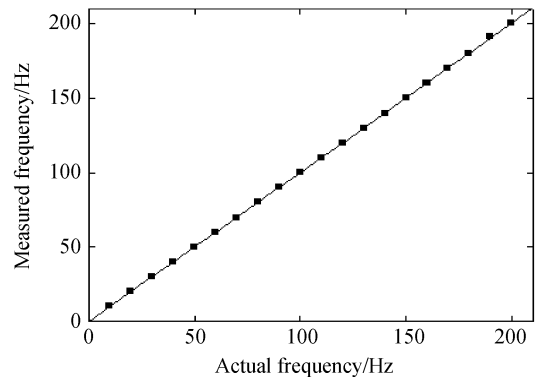


图 7 测量频率与实际频率的关系

Fig. 7 Measured frequencies vs. actual frequencies

调节 PZT 的驱动频率为  $20\text{ Hz}$ ,当 PZT 驱动电压分别为  $100\text{ mV}$  和  $260\text{ mV}$  时,示波器输出波形

如图 8. 给定频率 20 Hz, 对驱动电压为 100 ~ 300 mV 的振动信号进行测量, 由于驱动电压频率一定, 当电压幅值不同时对应不同的示波器输出幅值, 读取相应的输出电压峰-峰值, 利用图 5 定标曲线, 可以得到示波器输出电压峰-峰值和所施加振幅之间的关系, 此时实现的是对振动幅值的测量, 如图 9. 对图 9 中示波器电压波形峰-峰值和所施振幅之间关系进行线性拟合, 结果为  $f(x) = 3.36 + 0.029x$ , 线性度为 99.85%, 可以看出光纤光栅 F-P 腔的反射光强幅值和振动幅值成正比, 与式(6)的分析结论一致.

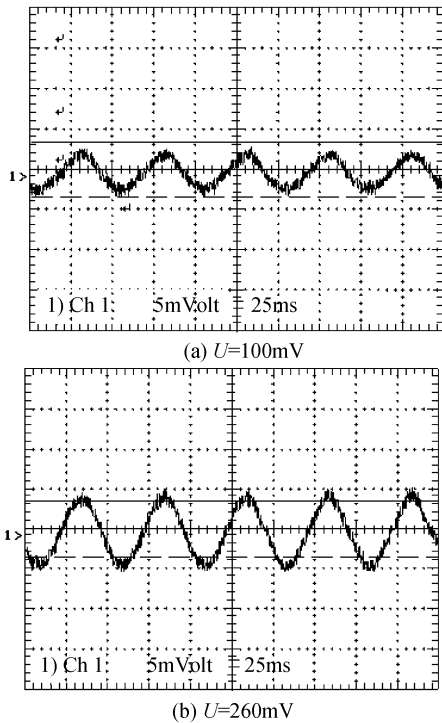


图 8 输出波形与振动幅值的关系  
Fig. 8 Dependence of the sensor output on amplitudes of PZT

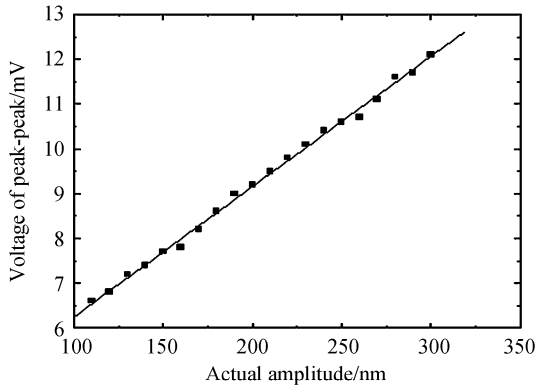


图 9 输出电压峰-峰值与振动幅值的关系  
Fig. 9 Dependence of peak-peak on amplitudes

PZT 的驱动频率对应着示波器输出电压的频率, 输出电压峰-峰值仅与驱动电压幅值有关, 所以

图 9 所示曲线拟合结果的反函数, 即  $f(x) = 3.36 + 0.029x$  的反函数  $f(x) = -115.862 + 34.483x$  可以作为输出电压峰-峰值与振幅之间的定标函数, 即每得到一个输出电压峰-峰值通过定标函数就可以得到被测振动幅值.

给定频率 20 Hz, 利用定标函数对 PZT 驱动电压在 10~100 mV 的振动幅值进行测量, 实验中直接读取的是驱动电压与输出电压幅值, 可以得到如图 10 的关系曲线.

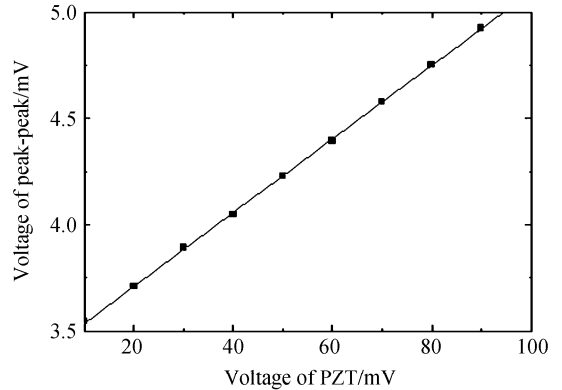


图 10 输出电压峰-峰值与驱动电压的关系  
Fig. 10 Dependence of peak-peak on voltage of PZT

对图 10 关系曲线的横、纵坐标分别利用图 5 所示 PZT 驱动电压和振动幅值的定标曲线及输出电压峰-峰值与振幅之间的定标函数  $f(x) = -115.862 + 34.483x$ , 可以得到振动幅值的测量值与实际值之间的关系, 如图 11. 对该关系进行线性拟合, 结果为  $y = 0.139 + 0.996x$ . 当振幅小于 6 nm 时, 系统不能响应; 当振幅为 6 nm 左右时, 相对误差达到 5%, 准确性较低; 当振幅大于 6 nm 时, 相对误差减小至 4%, 测量较准确, 所以该传感器最低振幅分辨率为 6 nm. 分析实验测量的最低振动幅值小于理论分析值的原因, 除了实验误差之外, PZT 的性能和实验解调系统的准确度也会影响实验结果.

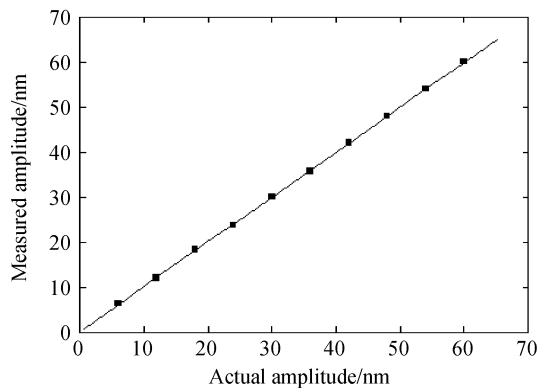


图 11 测量振幅与实际振幅的关系  
Fig. 11 Measured amplitudes vs. actual amplitudes

### 3 结论

提出了一种测量低频振动的纤维光栅 F-P 腔传感器结构. 理论分析表明, 振动信号作用于纤维光栅 F-P 腔, 使得 F-P 腔的腔长发生周期性改变, 引起输出信号波形变化. 振幅信息改变输出波形的峰值, 振动频率引起了输出波形频率的变化. 实验结果表明, 在 19.7 °C 的实验环境温度下, 对振动信号频率的测量拟合曲线和实际频率值的线性度达到 99.98%, 测量准确; 对于振动信号振幅的测量结果显示, 示波器输出波形电压幅值随振动信号振幅变化而成正比例改变, 与理论分析结论一样, 线性度为 99.85%, 最低振幅分辨力达 6 nm, 由于纤维光栅 F-P 腔静态工作点的原因, 振幅测量范围较小. 该传感器适用于精密隔振平台检测等小振幅的弱振动信号的检测.

#### 参考文献

- [1] WILLISCH R, ECKE W. Potential low-cost optical fiber Bragg grating sensor systems for structural health monitoring and examples of their application[C]. *SPIE*, 2002, **4920**:382-391.
- [2] CHAU K, MOSLEHI B, SONG G, *et al.* Experimental demonstration of fiber Bragg grating strain sensors for structural vibration control[C]. *SPIE*, 2004, **5391**:753-764.
- [3] LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.* Finite element simulation of ultrasonic guided waves generated by a pulsed laser in human skin[J]. *Instrument of Science & Technology*, 2006, **34**(6):711-725.
- [4] WANG Yan, ZHAO Zhong-jie, MA She. Laser detection of micro-angle vibration of optics bench[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2007, **19**(1):40-44.  
王雁, 赵忠杰, 马社. 光学平台微角振动激光探测方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1):40-44.
- [5] VOHRA S, DANVER B, TVETEN A, *et al.* High performance fiber optic accelerometers[J]. *Electron Lett*, 1997, **33**(2):155-157.
- [6] LAN Tian, ZHANG Chun-xi, LI Li-jing, *et al.* Random polarization effects on the dual M-Z fiber optic micro vibration sensor[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, **30**(5):541-543.  
蓝天, 张春熹, 李立京, 等. 双 M-Z 型光纤微振动传感器光波随机偏振分析[J]. *压电与声光*, 2008, **30**(5):541-543.
- [7] BERKOFF T A, KERSEY A D. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, **8**(12):1677-1679.
- [8] LI Ming-ming, WANG Zhao, JIA Shu-hai, *et al.* A fiber optic sensor on MEMS vibration[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4):438-441.  
李鸣明, 王昭, 贾书海, 等. 光纤传感器在微机电系统振动测量中的应用[J]. *光子学报*, 2001, **30**(4):438-441.
- [9] JIANG Yi, LIU Li. Fiber optical Fabry-Perot vibration sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1059-1062.  
江毅, 刘莉. 光纤 Fabry-Perot 腔振动传感器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(9):1059-1062.
- [10] ZENG Xiang-kai, RAO Yun-jiang, YU Ban-mei, *et al.* Simultaneous static-strain, temperature and vibration measurement using a single fiber-optic sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(10):1254-1258.  
曾祥楷, 饶云江, 余般梅, 等. 光纤应变、温度、振动同时测量新技术的研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(10):1254-1258.
- [11] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1277-1294.
- [12] ZHAO Yong. Principle of fiber optic sensor and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007:153-157.  
赵勇. 光纤传感原理与应用技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:153-157.
- [13] JIN Wei, RUAN Shuang-chen. New Progresses of fiber optic sensor technology[M]. Beijing: Scientific Press, 2005:258.  
靳伟, 阮双琛. 光纤传感技术新进展[M]. 北京:科学出版社, 2005:258.

## A Vibration Sensor Based on Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Cavity

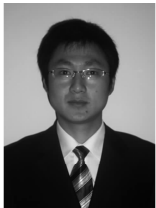
CHENG Zhen-long, ZHAO Jian-lin, ZHOU Wang-min, LÜ Quan-chao, PAN Zi-jun, FAN Fan

(*Institute of Optical Information Science and Technology; Shaanxi Key Laboratory of*

*Optical Information Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

**Abstract:** A sensor solution for weak vibration based on Fiber Bragg Grating Fabry-Perot (F-P) cavity is designed and experimentally demonstrated, in which a laser with single-frequency is used as the light source. The F-P cavity is affixed to the cantilever structure of even distribution of strain along the axis and the pair of fiber Bragg gratings as the cavity reflectors is placed freely. The vibration spreading to fiber grating F-P cavity through the cantilever beam vibration, causes changes in cavity length, thus changing the reflective light intensity of fiber grating F-P cavity. Theoretical analysis indicates that, the amplitudes and frequencies of vibration can be measured by demodulating the peaks and frequencies of the signal. The experimental results of measuring artificial vibration simulated with PZT agree with the theory well. This sensor has high measuring accuracy and can be used for detecting weak vibration.

**Key words:** Vibration sensor; Fiber sensor; Fiber Bragg grating (FBG); Fabry-Perot cavity (F-P)



**CHENG Zhen-long** was born in 1984. He is a M. S. degree candidate at Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University. His main research interests focus on optical fiber sensors.



**ZHAO Jian-lin** was born in 1958. He received his Ph. D degree in optics from Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, in 1998. Currently, he is a professor at NPU. His main research interests focuses on optical information technology and applications.