

文章编号 1004-924X(2011)06-1179-06

# 基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计

林巧\*, 陈柳华, 李书, 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**设计、研制了一种基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计。介绍了该加速度计的传感原理及弹性结构设计,并对其性能进行了实验测试。该加速度计用固定于圆网状弹性结构上的硅微反射镜与处理过的光纤端面构成光纤-镜面干涉腔来产生相位差随外界加速度改变的光干涉信号;采用相位生成载波技术通过对干涉信号的调制和解调实现对相位差的精确测定。应用工程软件 Cosmosworks (Solidworks) 对该加速度计弹性结构的灵敏度进行了理论分析,并与样机测试比较。结果表明,该光纤加速度计的灵敏度为  $63.2 \text{ rad/g}$ ,共振频率为  $160 \text{ Hz}$ ,分辨率为  $4 \mu\text{g}$  而动态范围接近  $10^8$ ,结果与理论分析符合得较好。该加速度计不仅结构简单,还集成了多维加速度计的优势。

**关键词:**光纤加速度计;相位生成载波技术;灵敏度;分辨率

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1179

## Fiber optic accelerometer based on fiber-mirror interference cavity

LIN Qiao\*, CHEN Liu-hua, LI Shu, WU Xing-kun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

\* Corresponding author, E-mail: linqiaoa@yahoo.com.cn

**Abstract:** An optical fiber accelerometer was designed based on a fiber-mirror interference cavity. The sensing principle and elastic structure of the accelerometer were introduced and its performance was measured. A silicon micro-mirror mounted on a mesh spring elastic structure and a fiber facet were used to form a fiber-mirror cavity to generate optical interference signals as a function of acceleration. A Phase Generated Carrier (PGC) technology was adopted to modulate the interference signals to obtain phase difference signals with high resolution. Finally, the strain analysis of elastic structure was performed by Cosmosworks (Solidworks) to calculate the sensitivity. The performance measurement of prototype shows that the accelerometer can offer a sensitivity of  $63.2 \text{ rad/g}$  in the resonance frequency of  $160 \text{ Hz}$  and a resolution of  $4 \mu\text{g}$  with a dynamic range near  $10^8$ . Furthermore, the accelerometer is structure simple and easy to be intergrated and multi-dimensioned.

**Key words:** fiber optic accelerometer; Phase Generated Carrier (PGC); sensitivity; resolution

## 1 引言

光纤加速度计由于具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、电绝缘性好、耐腐蚀、体积小、质量轻等优点而在许多领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。一个高质量的光纤加速度计,在实现高分辨率和大动态范围的同时,必须达到尽可能高的灵敏度和尽可能大的共振频率。灵敏度作为衡量加速度计性能的一个重要指标,可表示为相位差与加速度的比值  $\Delta\varphi/\Delta a$ 。近年来,国内外已经研究出了多种光纤加速度计。例如,王金海等提出了一种基于光弹效应的光纤加速度计,其共振频率达到了 3 500 Hz,但是灵敏度只有  $3.7 \times 10^{-4}$  rad/g<sup>[4]</sup>;曾楠等提出了一种灵敏度为 79.4 rad/g,共振频率接近 1 000 Hz 的光纤加速度,但是其交叉灵敏度约为 2 rad/g,限制了该加速度的多维应用能力<sup>[5]</sup>。

本文提出了一种新型的由光纤与镜面形成干涉腔的加速度计。相对与双臂光纤传感的马赫曾德或迈克尔逊干涉式的光纤加速度计,该加速度计由于只采用单臂光纤而不需要在设计上考虑如何隔离参考臂的传感;相对于需要较复杂的信号处理系统的光纤布拉格光栅加速计,其采用较简单的相位生成载波技术(Phase Generated Carrier, PGC)即可实现高精度的加速度检测<sup>[6-9]</sup>。与基于本征型光纤法布里-珀罗干涉的传感器相比,该加速度计具有受温度影响小,不存在双折射问题和横向应变不会转变成轴向应变的优点<sup>[10-13]</sup>。本文提出的加速度计用固定于圆网状弹性结构上的硅微反射镜与处理过的光纤端面构成光纤-镜面干涉腔,采用 PGC 技术对随加速度变化的干涉腔腔长进行音频调制,从而提高了该类型加速度计的分辨率,使其值达到了  $4 \mu g$ 。实验测试结果表明,该加速度计在 160 Hz 的共振频率下的灵敏度达到了 63.2 rad/g,交叉灵敏度仅为  $7.9 \times 10^{-4}$  rad/g,具有很好的集成多维加速度计的性能。

## 2 光学传感原理

图 1 所示为本文设计的光纤加速度计的原理图。分布式反馈激光器(Distributed Feedback Lasers, DFB)发出波长为 1550 nm 的光束经光纤 1 到达 3 dB 光纤耦合器,光纤耦合器将光束耦合到光纤 2,4% 能量的光束在光纤 2 出射端面反射回光纤 2 形成参考光,另一部分光经光纤-镜面腔后,被固定于弹性结构上的硅微反射镜反射回光纤 2 形成信号光;而在该腔内经过 3 次反射后进入光纤 2 的光能量只有参考光(或信号光)能量的千分之二左右,对干涉信号的影响非常小,因而在分析时只考虑参考光与信号光形成的干涉<sup>[14]</sup>。该干涉腔腔长受压电陶瓷振动片(PZT)调制产生相位(光程差)调制信号。参考光与信号光在在光纤 2 的端面处产生干涉,该干涉光经耦合器和光纤 3 后进入光电探测器(Photo-Detector, PD)转换为电信号,数字示波器将该信号储存为数字信号,最后由计算机采用 PGC 技术对信号处理解调出干涉信号的相位差。

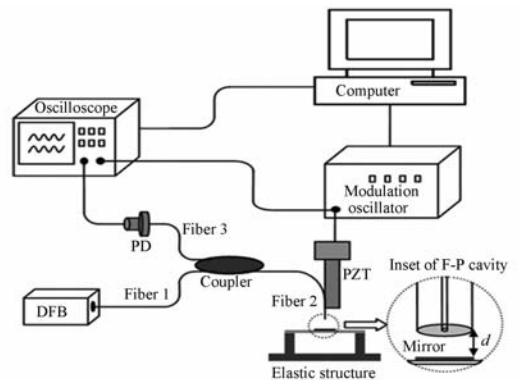


图 1 光纤加速度计原理图

Fig. 1 Schematic of proposed fiber optical accelerometer

当压电陶瓷振动片未开启时,参考光与信号光可表示为:

$$E_1 = i_x A \exp [j(\omega t - kz)] , \quad (1)$$

$$E_2 = i_x A \exp [j(\omega t - kz - \varphi)] , \quad (2)$$

式(1)和(2)中  $\omega$  为光束的角频率; $k$  为光波的传播矢量; $z$  为光波的传播方向; $\varphi$  为干涉腔引入的相位差,其值为  $4\pi d/\lambda$ , $d$  为干涉腔的腔长。当压电陶瓷振动片开启后,干涉信号受到相位调制信号  $M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  调制,其能量表达式可表示为<sup>[15]</sup>:

$$I = 2I_0 \cos[\varphi + M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)] = 2I_0 \cos(\varphi) \cos[M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)] - 2I_0 \sin(\varphi) \sin[M\sin(\omega_0 t + \varphi_0)], \quad (3)$$

式(3)中  $\omega_0$  为相位调制信号的交变振荡频率, $\varphi_0$  为相位调制信号的初始相位; $M$  为相位调制信号的调制深度,在本实验中其值为  $\pi$ 。利用 PGC 技术,在一个调制周期内取得 12 个等间隔的干涉信号值,标记为  $S_0, S_1, S_2 \dots S_{11}$ 。根据该 12 点的特性,得到两个等式  $(S_7 - S_1) + (S_{11} - S_5) = 8I_0 \sin(\varphi)$  和  $(S_0 + S_6) - (S_3 + S_9) = 8I_0 \cos(\varphi)$ 。最后,小于  $2\pi$  的相位差  $\varphi$  的值可由  $8I_0 \sin(\varphi)$  与  $8I_0 \cos(\varphi)$  的正负值以及它们的比值求得<sup>[15]</sup>。

### 3 制作及测试

本实验中用于固定硅微反射镜的弹性结构采用了 100  $\mu\text{m}$  厚的不锈钢网状膜片,其由 0.8  $\mu\text{m}$  步长的精密雕刻机加工而成,如图 2 所示。

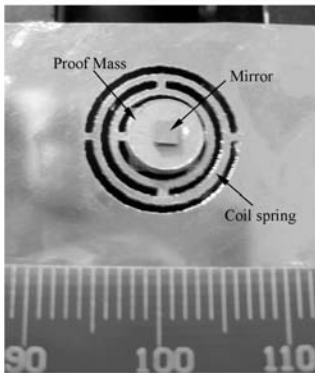


图 2 中央安装硅微反射镜的圆网状弹性结构

Fig. 2 Fabricated mesh spring with stainless steel film and silicon micro-mirror in the center

两片 0.8 mm 厚的不锈钢质量块对称地贴在该膜片中心的两侧,此对称结构大幅度地降低了固定于其中一个质量块上的硅微反射镜(2 mm  $\times$  2 mm  $\times$  0.27 mm)的位移与平行镜面方向的加速度的关联,有效地提高了与垂直镜面方向的加速度的分离度。实验测量并分析了该弹性结构中的微反射镜位移与垂直镜面方向的加速度的关系,测试结果表明,在 -200 g 到 200 g 的加速范围内,位移和加速度成简单线性关系  $a = (k_{\text{eff}}/m_{\text{eff}}) \Delta d$ ,其中  $k_{\text{eff}}$  和  $m_{\text{eff}}$  分别表示等效弹性系数和等效质量,且  $k_{\text{eff}}/m_{\text{eff}} = 8.33 \times 10^4 \text{ g/m}$ , $\Delta d$  为腔长的变化量即位移。

在波长不变的情况下,灵敏度的大小主要由弹性结构的机械参数决定,本实验所使用的机械参数如表 1 所示。图 3 所示为采用工程软件 Cosmosworks 对不同机械参数下的加速度计灵敏度有限元分析结果。

表 1 弹性结构的参数

Tab. 1 Parameters of elastic structure

Symbol	Typical Value	Description
$E$	190 GPa	Young's modulus of mesh
$\nu$	0.26	Poisson ratio of mesh material
$\rho$	7 700 kg/m <sup>3</sup>	Density of mesh and proof mass material
$T$	100 $\mu\text{m}$	Thickness of mesh
$W_1$	18 mm	Width of mesh
$L$	24 mm	Length of mesh
$W$	0.5 mm	Width of coil
$D_1$	8 mm	Inner diameter of the first coil
$D_2$	11 mm	Inner diameter of the second coil
$W_2$	0.74 mm	Width of the connection between coils
$L_1$	1 mm	Length of the connection between coils
$N$	2	Number of coils
$D$	6 mm	Diameter of proof mass
$T_1$	0.8 mm	Thickness of proof mass
$\rho_1$	2 330 kg/m <sup>3</sup>	Density of micro silicon mirror material

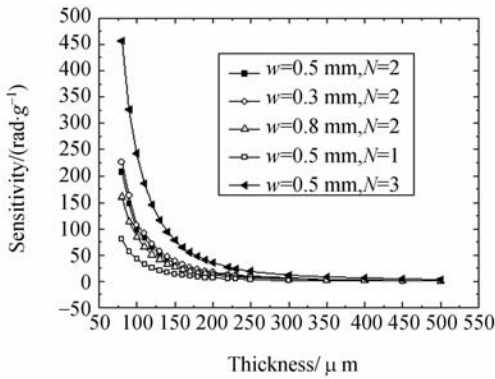


图 3 不同机械参数下的灵敏度

Fig. 3 Sensitivity as a function of elastic structure parameters

从图 3 可以分析出,使用更薄的钢片或者更多的圈数,该加速度计的灵敏度就得到大大的提高。然而,更薄的钢片增加了加工难度,更多的圈数意味着必须增大该传感器的尺寸。考虑到这些因素,本文采用厚度为  $100\ \mu\text{m}$ ,圈数为 2 圈的圆网状不锈钢膜片作为弹性结构。加速度计的共振频率可由式(4)计算得到<sup>[16]</sup>:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_{\text{eff}}}}, \quad (4)$$

已知  $k_{\text{eff}}/m_{\text{eff}} = 8.33 \times 10^4\ \text{g/m}$ ,由此可得该加速度计的理论共振频率为 144 Hz。

为了验证理论计算所得的灵敏度和共振频率,将制作好的加速度计探头置于振动方向与加速度计传感方向相同的振动平台上进行测试,测试结果如图 4 所示。

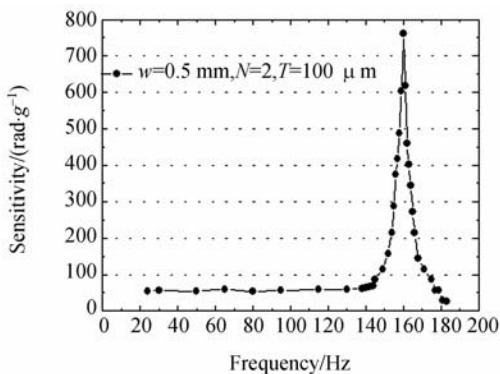


图 4 不同振动频率下的加速度计的灵敏度

Fig. 4 Sensitivity of prototype corresponding to different frequencies

由图 4 可知,该加速度计实际的灵敏度约为  $63.2\ \text{rad/g}$ ,其共振频率为 160 Hz,与理论计算所得的灵敏度  $97.3\ \text{rad/g}$  和共振频率 144 Hz 相比略有偏差,原因在于材料的均匀性和装配过程中造成的应力,这个测量结果同时表明了该加速度计达到了较高的灵敏度和共振频率<sup>[17]</sup>。将加速度计探头置于振动方向与加速度计传感方向垂直的振动平台上,对加速度计的交叉灵敏度进行测量。测量结果显示,该加速度计的交叉灵敏度非常小,只有  $7.9 \times 10^{-4}\ \text{rad/g}$ ,表明该加速度计能较容易地集成为多维加速度传感器<sup>[18]</sup>。

采用 PGC 技术,对该加速度计取得的实验数据进行分析。图 5 所示为 3 组典型的干涉信号数据曲线图,3 组曲线对应的加速度分别为  $-3412$ ,  $0$  和  $64\ 586\ \mu\text{g}$ 。经观察和计算,干涉信号曲线以  $a = \pm 64\ 567\ \mu\text{g}$  为周期循环往复的变化,每改变一个周期对其计数并用正负符号记录下改变的方向。利用 matlab 软件分析干涉信号曲线,得到干涉信号的平均噪声约为  $1.6\ \text{mV}$ ,对应的信噪比 (Signal-to-Noise ratio, SNR) 为 159。

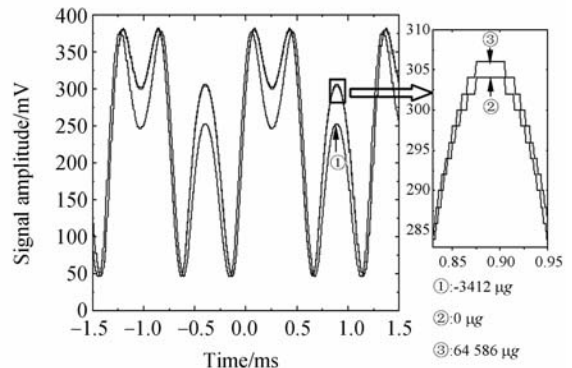


图 5 干涉信号曲线图

Fig. 5 Interference signals of accelerometer recorded in experiment

为了得出不同信噪比下该 PGC 解调方法的精确度,将一系列白噪声插值进入干涉信号得到不同信噪比下的相对相位误差与相位误差分布密度函数,如图 6 所示。

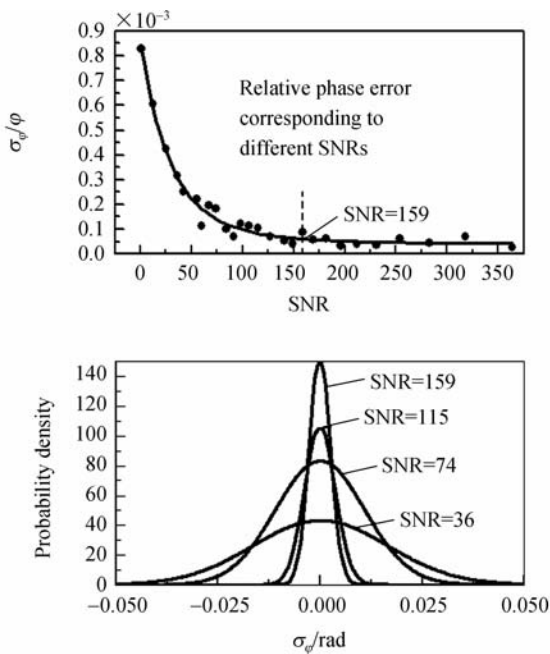


图6 不同信噪比下的相对相位误差与相位误差密度分布函数

Fig. 6 Relative and probability density functions of phase error corresponding to different SNRs

#### 参考文献:

- [1] DAE H K, MARIA Q F. A novel optical fiber accelerometer system for monitoring civil infrastructure [C]. *In Proceedings of the 2005 IEEE Sensors Conference*, 2005, 1107-1111.
- [2] 王永杰, 李芳, 肖浩, 等. 盘片式光纤传感器灵敏度计算方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1387-1392. WANG Y J, LI F, XIAO H, *et al.*. Sensitivity calculation of disk-type fiber optic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1387-1392. (in Chinese)
- [3] 于清旭, 贾春艳. 膜片式微型 F-P 腔光纤压力传感器[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12): 2887-2892. YU Q Y, JIA CH Y. Diaphragm based miniature fiber optic pressure sensor with F-P cavity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 19(5): 985-989. (in Chinese)
- [4] 王金海, 陈才和, 唐东林, 等. 基于光弹效应的三分量光纤地震加速度计[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 804-806. WANG J H, CHEN C H, TANG D L, *et al.*. Three-component photoelastic fiber optic accelerometer based on the photoelastic effect [J]. *Chinese*

由图6可知,相对相位误差随着信噪比的增大而减小。本实验中信噪比为159,其对应的相对相位误差 $\sigma_\varphi/\varphi$ 为 $8.8 \times 10^{-5}$ 。由相位误差密度分布函数可求得该信噪比下的相位误差 $\sigma_\varphi$ 主要分布在 $-1.6 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-4}$  rad,相应的能分辨的最小加速度变化约为 $4 \mu g$ 。已知可测量的加速度为 $-200 \sim 200 g$ ,因此可得该加速度计的动态范围约为 $10^8$ 。

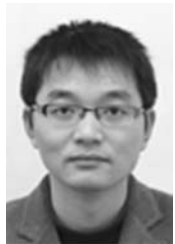
## 4 结 论

本文提出并制作了一种基于光纤-镜面干涉腔的光纤加速度计。介绍了该加速度计的传感原理及弹性结构设计,并对其性能进行了实验测试。实验结果表明,PGC技术的应用大大提高了加速度计的分辨率,其最高分辨率已达到 $4 \mu g$ ,而在160 Hz的共振频率下的灵敏度为 $63.2 \text{ rad/g}$ 。该光纤加速度计的优势在于较高的分辨率、较简单的结构和易于集成为多维形式。

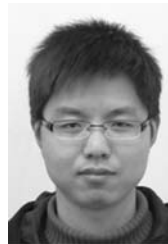
- Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(3): 804-806. (in Chinese)
- [5] 曾楠,施纯峥,张敏,等. 一种可用于油藏监测的3分量光纤加速度传感器[J]. *光电子·激光*, 2005, 16(8): 901-905. ZENG N, SHI CH ZH, ZHANG M, *et al.*. A 3 component fiber optic accelerometer for well logging [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, 16(8): 901-905. (in Chinese)
- [6] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 473-477. LI L, LIN Y CH, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [7] 林志恒,孟克,芮东峰. 基于LabVIEW的光纤加速度计解调系统的研究[J]. *应用科技*, 2007, 34(11): 25-27. LIN ZH H, MENG K, RUI D F. Design of optical fiber accelerometer based on labview [J]. *Applied Science and Technology*, 2007, 34(11): 25-27. (in Chinese)
- [8] WANG Y J, XIAO H, ZHANG S W, *et al.*. De-

- sign of a fibre-optic disc accelerometer; theory and experiment [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18: 1763-1767.
- [9] 郭明金, 姜德生, 袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 326-330.  
GUO M J, JIANG D SH, YUAN H C. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 326-330. (in Chinese)
- [10] 江毅, 黄尚廉, 古渊, 等. 光激菲涅耳反射器形成的本征光纤干涉仪[J]. *光子学报*, 1997, 26(2): 140-143.  
JIANG Y, HUANG SH L, GU Y, *et al.*. Intrinsic fiber optic interferometer based on photoinduced Fresnel reflectors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(2): 140-143. (in Chinese)
- [11] 毕卫红. 本征不对称光纤法布里-珀罗干涉仪的理论模型[J]. *光学学报*, 2000, 20(7): 873-878.  
BI W H. Mathematical model for fiber-optical non-symmetrical fabry-perot interferometric cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(7): 873-878. (in Chinese)
- [12] 柯涛, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 171-175.  
KE T, ZHU T, RAO Y J, *et al.*. Accelerometer based on All-Fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 171-175. (in Chinese)
- [13] 江毅, 唐才杰. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用[M]. 国防工业出版社, 2009.  
JIANG Y, TANG C J. *Optical Fiber Fabry-Perot Interferometer Principle and Applications* [M]. 2009. (in Chinese)
- [14] DJAFAR K M, LOWELL L S. *Fiber-Optic Communications Technology* [M]. Science Press, 2002.
- [15] ALLEN C. Demodulator for interferometric sensors [J]. *SPIE*, 1999, 3860: 338-347.
- [16] SMEU E, PUSCAS N N. Theoretical analysis of the mechanical system for a fiber optic seismic sensor [J]. *SPIE*, 2005, 59720X: 1-7.
- [17] 吴永红, 屈文俊, 邵长江, 等. 光纤光栅传感器光力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, 29(8): 2067-2070.  
WU Y H, QU W J, SHAO CH J, *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2067-2070. (in Chinese)
- [18] 唐东林, 郭峰, 刘泽年, 等. 光弹效应的三分量光弹波导加速度传感器[J]. *光学精密工程*, 2009, 19(5): 985-989.  
TANG D L, GUO F, LIU Z N, *et al.*. Three component photoelastic waveguide accelerometer based on photoelastic effect [J]. *Opt. Precision Eng*, 2009, 19(5): 985-989. (in Chinese)

#### 作者简介:



林巧(1984—),男,浙江平阳人,博士研究生,2006年于浙江大学获得学士学位,主要从事光纤传感器的研究。E-mail: linqiao@yaho. com. cn



李书(1983—),男,湖南邵阳人,博士研究生,2006年于浙江大学获得学士学位,主要从事微光学以及光器件应用的研究。E-mail: liysue@163. com



陈柳华(1985—),男,广东湛江人,硕士研究生,2008年于浙江大学获得学士学位,主要从事光纤传感器的研究。Email: chenliuhua@coer. zju. edu. cn



吴兴坤(1961—),男,浙江海盐人,教授,博士生导师,1995-1996年于美国斯坦福研究院任博士后,主要从事集成波导通信器件应用的研究。E-mail: xingkunwu@163. com