

# 提高光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的方法研究\*

朱永 张洁 陈伟民 黎学明 黄尚廉  
(重庆大学光电工程学院, 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要** 光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的好坏直接影响解调精度. 从光纤 F-P 应变传感器的基本原理出发, 针对光纤 F-P 腔内损耗的问题, 提出了用增加端面反射率的办法来弥补耦合损耗的影响; 并通过理论分析、计算机仿真和实验对该问题进行了研究. 实验表明, 选用与 F-P 腔固有的最佳反射率匹配的端面镀膜, 对增加干涉图样的对比度, 提高信号输出幅值有很好的效果.

**关键词** 光纤 F-P 传感器; 耦合损耗; 镀膜

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

对结构关键部位的应力/应变进行长期在线监测, 是实现结构健康监测的一种有效手段. 目前, 对于应变的测量, 通常采用的是电阻应变片和振弦式应变计, 但其原理上所固有的缺陷限制了它们在长期在线应变监测中的应用<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着光纤应变传感器的发展和推广, 越来越多的人把目光转移到这种新型的监测技术上来. 与传统的电类应变传感器相比, 光纤应变传感器具有柔韧、体积小、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、防水、容易和通讯网互联等优点<sup>[2,3]</sup>, 非常适合用作结构的长期在线监测. 其中非本征光纤法布里-珀罗 (Extrinsic Fabry-Perot interferometer) 应变传感器由于其价格较低、制造简单、自校准、容易解调, 以及环境适应性强等优点, 其应用更加普遍.

光纤 F-P 应变传感器可以分为强度调制型和相位调制型; 其中相位型传感器通过对输出信号光谱分析来计算应变值, 由于其不易受外界干扰的优点, 这种解调方法在实际工程中被更多地采用. 但是, 由于受到相位解调的原理限制, 传感器输出干涉信号质量好坏直接影响解调的精度; 另外, 输出信号的强度也影响光纤传感系统的测量距离; 因此提高传感器输出信号的强度和质量, 成为提高光纤 F-P 应变测量系统性能的关键问题之一.

## 1 理论分析

### 1.1 相位型光纤 F-P 应变传感器原理

相位调制型光纤 F-P 应变传感器主要是基于白

光多光束干涉的原理, 其结构如图 1 所示. 将两根单模光纤的端面加工为镜面反射面, 插入一个密封玻璃管内, 并使它们严格平行、同轴, 形成一个腔长为  $g$  的光纤 F-P 腔. 当一束光通过光纤入射到光纤 F-P 腔内时, 就会在腔内形成多光束的干涉输出.

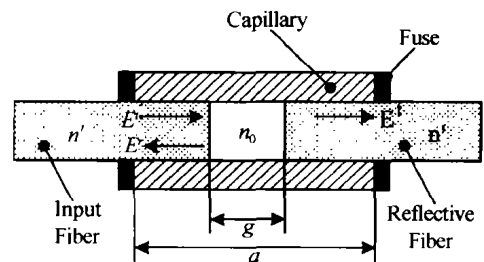


图 1 非本征光纤 F-P 应变传感器  
Fig. 1 EFPI fiber optic sensor

若入射是单色光, 则可以根据多光束干涉理论<sup>[4]</sup>得到 F-P 腔反射光强和腔长之间的函数关系; 考虑到白光 (通常用宽带光源) 的情况, 入射光强度  $I_0(\lambda)$  是波长的函数, 因此反射的总光强是对各个波长成份的积分; 考察反射光每一个波长成份, 其强度实际上是腔长  $g$  和波长  $\lambda$  的函数

$$I_R(\lambda, g) = \frac{(2 - 2\cos\left(\frac{4\pi n_0 g}{\lambda}\right))R}{1 + R^2 - 2R\cos\left(\frac{4\pi n_0 g}{\lambda}\right)} I_0(\lambda) \quad (1)$$

式中,  $R$  为光纤两端面的反射率,  $n_0$  是空气的折射率 ( $n_0 = 1$ ). 因此, 在  $I_0(\lambda)$  已知的情况下, 只要获得  $I_R(\lambda, g)$  和  $\lambda$  的关系曲线 (即输出信号的光谱), 即可反算出 F-P 腔的腔长  $g$ , 进而算出应变. 理想情况下, 对于一个没有镀膜的光纤 F-P 腔, 由于两个光纤端面具有相同的反射率 (约 4%), 其输出多光束干涉信号的对比度应该非常好. 但在实际系统中, 由于耦合损耗的影响, 反射光纤端面反射光耦合到入射光纤中的光强小于入射光纤端面本身反射光强, 导致输出反射信号的强度和干涉图样对比度降低; 前者降低了光纤 F-P 应变测量的测量距离 (传感

\*国家自然科学基金重点项目资助 (No. 50135030)、重庆大学骨干教师项目资助  
Tel: 023-65111847 Email: yongzhu@cqu.edu.cn  
收稿日期: 2003-05-28

器到测量仪的距离),后者影响整个系统的解调测量精度. 以下将详细分析耦合损耗对干涉图样对比度的影响,并探讨提高干涉信号对比度的方法.

### 1.2 光纤 F-P 应变传感器中反射光的损耗

对于光纤 F-P 应变传感器而言,由于主要关心的是两个光纤端面反射光的干涉,不关心透射光的情况,因此可以把反射光纤简化为一个镜面来处理(图 2(a)),图中等效反射面的倾斜是由反射光纤的端面处理角度误差造成的. 光从入射光纤传播到反射镜上,经过反射以后又耦合到入射光纤中去,可以进一步等效为两个轴线有一个夹角的光纤端面之间的耦合(图 2(b)).

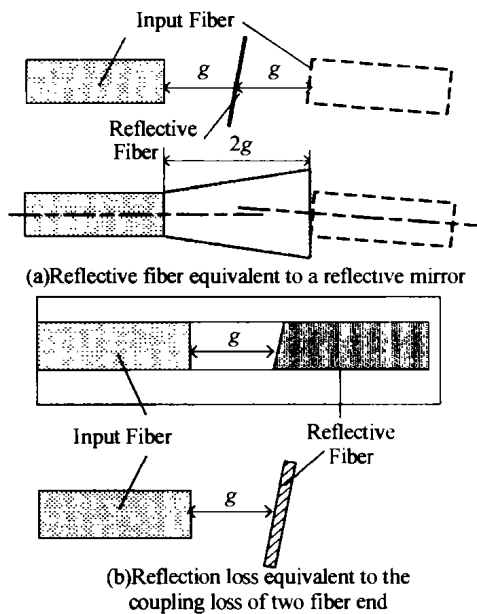


图 2 光纤 F-P 传感器耦合损耗示意图  
Fig. 2 Coupling loss schematic diagram of EFPI fiber optic sensor

两个光纤之间耦合损耗的原因很多<sup>[5]</sup>,其中最主要的有:两根光纤之间有间隙、两根光纤的轴线横向偏离、两根光纤的轴线成折线等几种;图 2(b)中虚线示意的光纤实际上是入射光纤的镜像,因此可以认为二者之间不存在轴向偏离;其损耗主要是由轴线夹角和间隙引起的,用高斯近似方法处理,两种损耗引起的耦合系数分别描述为<sup>[6]</sup>

$$q_{\text{ang}} = \exp \left[ - \left( \frac{n\pi w_0 \sin(\alpha)}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$q_{\text{end}} = \frac{1}{\left[ \frac{z\lambda}{2\pi n w_0^2} \right]^2 + 1}$$

式中,  $n$  为光纤的群折射率,  $w_0$  为高斯光束束腰半径,  $\alpha$  为两光纤轴线的夹角,  $\lambda$  为工作波长,  $z = 2g$  是两光纤端面之间的距离. 严格而言,图 2(b)中两光纤的耦合损耗不应该是每种损耗因素的简单组合<sup>[7]</sup>,考虑光纤 F-P 传感器的特点和本文的研究目的. 则总的耦合系数近似为

$$q \approx q_{\text{ang}} q_{\text{end}} \quad (3)$$

对于具体的光纤 F-P 传感器,腔长  $g$  变化范围为  $50 \sim 150 \mu\text{m}$ , 光纤端面处理角度  $\alpha/2$  为  $0.1^\circ \sim 0.5^\circ$ , 工作波长在  $850 \text{ nm}$  的单模光纤的模场直径 ( $2w_0$ ) 为  $8 \mu\text{m}$  左右,群折射率  $n$  为  $1.466$ . 取典型参量  $g = 100 \mu\text{m}$ ,  $\alpha/2 = 0.3^\circ$  代入式(3),可得其耦合系数  $q = 0.41$ .

### 1.3 传输损耗对传感器输出信号强度和干涉条纹对比度的影响

如图 3, 设入射光纤为介质 1, 空气为介质 2, 反射光纤为介质 3, 从入射光纤到空气的反射系数和折射系数分别为  $r_{12}, t_{12}$ ; 从空气射到第二根光纤的反射系数和折射系数分别为  $r_{23}, t_{23}$ ; 从空气射到入射光纤的反射系数和折射系数分别为  $r_{21}, t_{21}$ . 假设输入的振幅为  $E_0(\lambda)$ , 则反射回入射光纤中各光束的振幅分别为

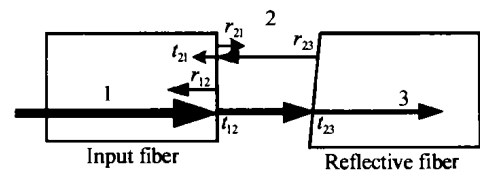


图 3 光在光纤 F-P 腔内的反射  
Fig. 3 Light reflection in EFPI

$$E_{1r}(\lambda, t) = r_{12} E_0(\lambda)$$

$$E_{2r}(\lambda, t) = t_{12} r_{23} q t_{21} E_0(\lambda) e^{-i\theta}$$

$$E_{3r}(\lambda, t) = t_{12} r_{23} q r_{21} r_{23} q t_{21} E_0(\lambda) e^{-i2\theta}$$

$$\dots$$

$$E_{nr}(\lambda, t) = t_{12} r_{23} q^{(n-1)} r_{21}^{(n-2)} r_{23}^{(n-2)} t_{21} \cdot E_0(\lambda) e^{-i(n-1)\theta} \quad (4)$$

式中  $\theta = \frac{2\pi}{\lambda} 2g$  为两光纤间隙引起的相位差,  $g$  为 F-P 腔的腔长,  $q$  为损耗引起的振幅耦合系数. 合成复振幅为

$$E_r(\lambda, t) = E_{1r}(\lambda, t) + \sum_{n=2}^{\infty} E_{nr}(\lambda, t) \quad (5)$$

把式(4)各次反射的振幅带入式(5),利用等比数列整理求和,并考虑菲涅耳公式  $r_{12} = -r_{21}, t_{12} t_{21} = 1 - r_{12}^2$ , 得

$$E_r(\lambda, t) = E_0(\lambda) \frac{r_{12} + r_{23} q e^{-i\theta}}{1 + r_{12} r_{23} q e^{-i\theta}} \quad (6)$$

考虑反射系数和反射率的关系  $r^2 = R$ , 则传感器反射光强度为

$$I_r(\lambda, t) = E_r(\lambda, t) E_r^*(\lambda, t) = E_0(\lambda)^2 \frac{R_1 + R_2 q^2 - 2 \sqrt{R_1 R_2} q \cos \theta}{1 + R_1 R_2 q^2 - 2 \sqrt{R_1 R_2} q \cos \theta} \quad (7)$$

一般情况下,以光源中心波长  $\lambda_0$  处的反射光强  $I_r(\lambda_0)$  作为考察光纤 F-P 应变传感器信号强度指标. 在没有对入射光纤端面做特殊处理的情况下  $R_1 =$

0.04, 取典型参量  $g = 100 \mu\text{m}$ , 耦合系数  $q = 0.41$ , 且设  $E_0(\lambda) = 1$  代入式(7), 可以得到  $R_2$  和光强  $I_r(\lambda_0)$  的关系图(图4). 可见当  $R_2$  增加时,  $I_r(\lambda_0)$

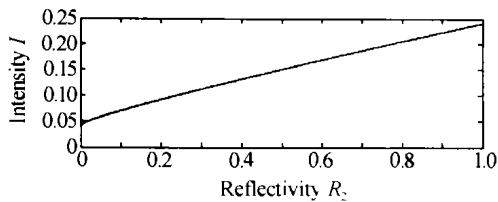


图4 输出信号强度与反射光纤端面反射率  $R_2$  的关系

Fig. 4 Output intensity curve vs. Reflectivity  $R_2$

是单调增加的, 这也说明增加反射光纤的反射率有利于提高传感器的输出信号强度. 但是, 信号的好坏不仅仅取决于强度, 更依赖于信号干涉条纹的对比度. 通常对比度是用来定义条纹明暗条纹之间的明暗对比关系的, 定义式如下

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

当  $\theta = (2k+1)\pi, k = 1, 2, 3, \dots$  时,

$$I_{\max} = E_0^2 \frac{R_1 + R_2 q^2 + 2\sqrt{R_1 R_2} q}{1 + R_1 R_2 q^2 + 2\sqrt{R_1 R_2} q}$$

当  $\theta = 2k\pi, k = 1, 2, 3, \dots$

$$I_{\min} = E_0^2 \frac{R_1 + R_2 q^2 - 2\sqrt{R_1 R_2} q}{1 + R_1 R_2 q^2 - 2\sqrt{R_1 R_2} q}$$

则

$$V = \frac{2\sqrt{R_1 R_2} q (1 + R_1 R_2 q^2 - R_1 - R_2 q^2)}{R_1 + R_2 q^2 + R_1^2 R_2 q^2 + R_1 R_2^2 q^4 - 4R_1 R_2 q^2} \quad (9)$$

仍然将典型参量  $R_1 = 0.04$ , 代入式(9)可以得到对比度和  $R_2$  的关系图(图5).

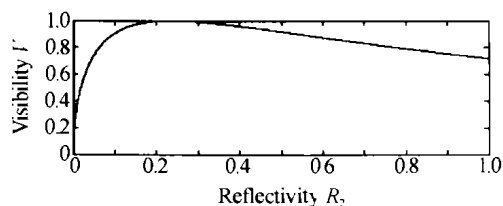


图5 对比率与反射光纤反射率的关系曲线

Fig. 5 Fringe visibility curve vs. reflectivity  $R_2$

如图, 因为损耗影响, 当反射光纤的反射率  $R_2$  与入射光纤的反射率  $R_1$  相等时, 光纤 F-P 传感器的输出信号对比度并不高(约为 0.69), 为了提高信号的对比度, 必须增加反射光纤的反射率  $R_2$ . 令  $R_1$  为常数, 且对式(9)求导, 并令  $dV/dR_2 = 0$ , 可以得出当  $R_1 = R_2 q^2$  时,  $V_{\max} = 1$ ; 即  $R_2$  不能无限制的增加, 对不同的耦合系数  $q$  有不同的最佳值.

## 2 实验研究

为了直观显示损耗对输出干涉信号对比度的影响, 设光源入射强度  $I_0(\lambda_0) = 1$ , 并利用计算机仿真了腔长为  $100 \mu\text{m}$ , 耦合系数为 0.41 的光纤 F-P 传

感器的输出光谱图; 由图 6(a) 可见, 受到损耗的影响, 光纤 F-P 传感器的输出信号强度和对比度都不理想. 然后, 利用图 7 的实验装置进行了实验. 如图 7 所示, 宽带超辐射发光二极管光源(OSLD -820-MPI-FC/APC, Opto-link)的光经 X 耦合器后入射到光纤 F-P 传感器(EFPI), 耦合器的另一端插入折射率匹配液以消除端面反射; F-P 传感器的反射光再一次经过耦合器而输入到光谱仪(Ando 6317B)中, 以便进行测量和分析. 实验中 F-P 传感器没有如图 1 中那样固定, 而是安装在一个精密微动工作台上, 这样可以自由地改变腔长, 研究腔长、耦合以及信号质量之间的关系. 图 6(b) 是端面没有特殊处理的光纤制作的 F-P 传感器的输出光谱图; 由于端面处理不良, 实际的光纤 F-P 传感器的输出信号质量比计算机仿真的结果还要差. 为了解决这一问题, 对反射光纤的端面蒸镀了反射波长为 850 nm 的介质膜, 并利用镀膜后的光纤制作了 F-P 腔. 图 8(a)、9(a)、10(a) 为不同反射率、不同腔长以及不同耦合系数的 F-P 传感器的输出干涉图样计算机仿真图, 图 8(b)、9(b)、10(b) 为相应的 F-P 传感器的输出干涉图样实测图. 与理论仿真图 8(a) 一致反射率由 0.04 镀膜增加到最佳值 0.09 后(见图 8(b)), F-P 腔输出信号的强度和对比度都有所提高, 对比度接近 1. 反射率进一步增加为 0.22 后, 信号幅值将进一步增大, 但该反射率与 F-P 腔固有的最佳反射率失配, 对比度却反而下降(图 9(a)), 实际测量中, F-P 腔的输出信号增加至饱和(图 9(b)); F-P 腔长增加到  $101 \mu\text{m}$  时, 却可以获得较高

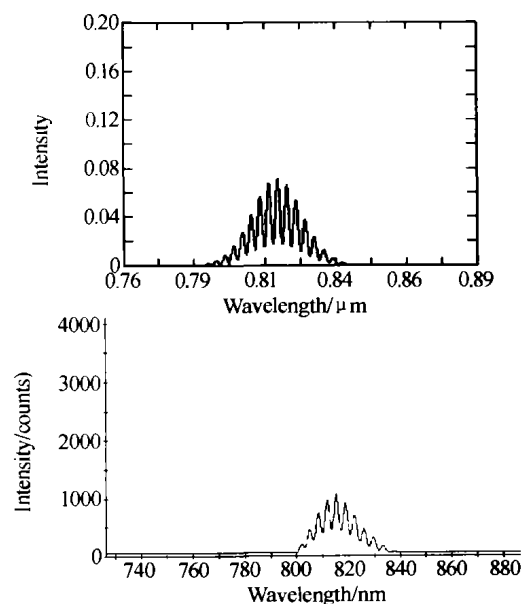


图6 (a) 计算机仿真光纤 F-P 传感器的输出干涉图样  
(b) 未镀膜光纤 F-P 应变传感器的输出干涉图样  
Fig. 6 (a) Stimulated output pattern of EFPI sensor ( $g = 100 \mu\text{m}, q = 0.41$ ); (b) Output pattern of EFPI sensor without coating

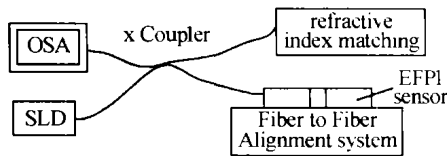


图 7 实验装置示意  
Fig. 7 Schematic diagram of experiment system

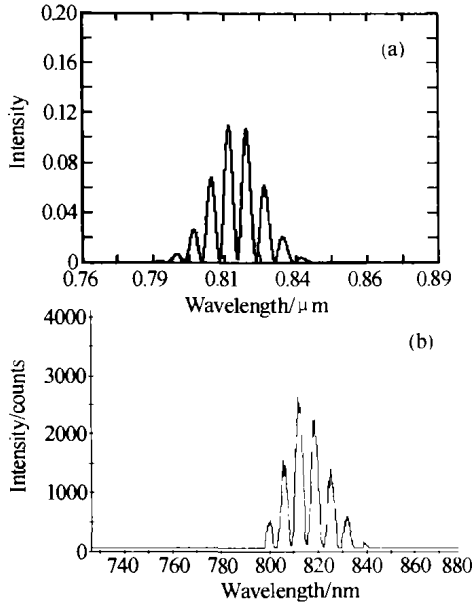


图 8 (a) 镀反射膜以后的光纤 F-P 传感器输出仿真  
(b) 镀反射膜以后的光纤 F-P 传感器输出光信号  
Fig. 8 (a) Stimulated output pattern of EFPI sensor with coating ( $g = 51 \mu\text{m}, R_2 = 0.09, q = 0.71$ ); (b) Output pattern of EFPI sensor with coating ( $g = 51 \mu\text{m}, R_2 = 0.09$ )

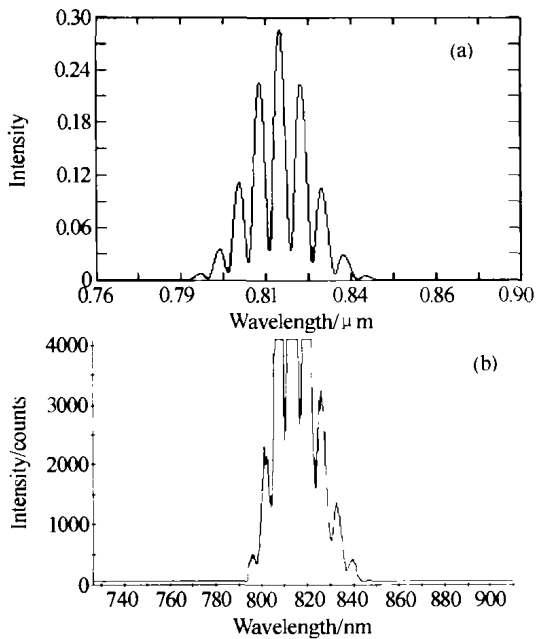


图 9 (a) 镀反射膜以后的光纤 F-P 传感器输出仿真  
(b) 镀反射膜以后的光纤 F-P 传感器输出光信号  
Fig. 9 (a) Stimulated output pattern of EFPI sensor with coating ( $g = 51 \mu\text{m}, R_2 = 0.22, q = 0.71$ ); (b) Output pattern of EFPI sensor with coating ( $g = 51 \mu\text{m}, R_2 = 0.22$ )

的信号强度和对比度,这是因为  $101 \mu\text{m}$  F-P 腔的损耗远远大于  $51 \mu\text{m}$  的 F-P 腔(图 10(a)、10(b)),因此其对应的最佳反射率要大得多;这也符合理论分析得出结论:对于不同的 F-P 腔,由于耦合损耗不

同,  $R_2$  存在一个最佳值.

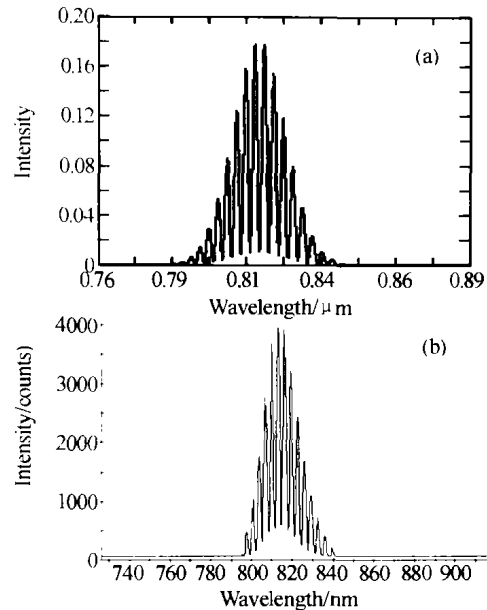


图 10 (a) 镀反射膜以后的光纤 F-P 传感器输出仿真  
(b) 镀反射膜以后的光纤 F-P 传感器输出光信号  
Fig. 10 (a) Stimulated output pattern of EFPI sensor with coating (b) Output pattern of EFPI sensor with coating ( $g = 101 \mu\text{m}, R_2 = 0.22$ )

### 3 结论

本文用高斯近似方法简单探讨了光纤 F-P 应变传感器中反射光的损耗问题,并研究了这一损耗的存在对传感器输出信号强度和干涉图样对比度的影响. 理论分析和实验表明:光纤 F-P 腔的损耗将大大降低传感器输出信号的强度和对对比度,可以利用镀膜增加反射率的办法改善这一问题;但是为了保证对比度,镀膜反射率并不是越高越好,而是必须与该 F-P 腔的最佳反射率匹配.

采用镀膜技术以后,光纤 F-P 应变传感器的信号强度大大增加,提高了整个系统的测量距离;同时信号对比度增加,提高了解调的精度. 但是在测量过程中,光纤 F-P 应变传感器的腔长将在量程范围 ( $50 \sim 150 \mu\text{m}$ ) 内变化,相应的光损耗也在变化,导致固有的光纤端面反射率与最佳反射失配(见图 8),造成测量过程中信号饱和或对比度下降的问题;因此在设计膜层反射率的时候不能只考虑某一腔长的最佳反射率,必须在整个腔长变化范围内统一考虑.

### 参考文献

- 李辉. 对用电阻应变片进行应变长期量测的研究. 重庆建筑大学学报, 1998, 20(4): 21 ~ 26  
Li H. *Journal of Chongqing Architecture University*, 1998, 20(4): 21 ~ 26
- Fuhr P L, Huston D R, Ambrose T P, et al. Internet monitoring of an instrumented civil structure, smart structure and materials. *Proc of SPIE* 1995, 2446: 301 ~ 307

- 3 Ballard C M, Chen S S. Automated remote monitoring of structural behavior via the internet, smart structure and materials. *Proc of SPIE*, 1996, **2719**: 102 ~ 111
- 4 Born M, Wolf E. Principle of optics. Pergamon Press 5<sup>th</sup> ed, 1975. 302 ~ 305
- 5 秦秉坤, 孙雨南. 介质光波导及其应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1991
- 6 Mynbaev D K, Scheiner L L. Fiber-Optic Communications Technology. Prentice Hall, 2000
- 7 石文江. 单模光纤对准四维微动工作台的研究. [硕士学位论文] 重庆大学, 1990
- 8 Qin B K, Sun Y N. Optical waveguide and their Application. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991
- 9 Shi W J. Research on 4D Precision Alignment Workbench for Single Mode Optic Fiber. [Master Dissertation], Chongqing University, 1990

## Study on the Method of Improving EFPI's Signal Quality

Zhu Yong, Zhang Jie, Chen Weimin, Li Xueming, Huang Shanglian  
*Opto-electronic Engineering Department, Chongqing University, Chongqing 400030*

Received date: 2003-05-28

**Abstract** The measurement accuracy of EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometers) strain sensor is affected by the quality of its output signal. However whatever kind of demodulation algorithm is adopted, a poor interferential pattern with low contrast and low amplitude always leads to a rough measurement result. To address this problem, the signal quality of EFPIs with different end-reflectivity was theoretically analyzed in this paper. Computer simulation indicated that the signal quality could be improved by increasing the reflectivity of fiber ends in the F-P cavity. This is also experimentally demonstrated by vaporization coating to each fiber end.

**Keywords** Extrinsic Fabry-Perot interferometer; Coupling loss; Vaporization coating



**Zhu Yong** was born in 1973, in Chongqing P. R. China. He received his B. E. degree in sensing technology & instrument at Opto-electronic Engineering Department of Beijing Institute of Technology, China, in 1993 and the Ph. D. degree of physics-electronic & opto-electronic in 1998. In 1998, he joined the staff at Chongqing University, China. He is now working as a post-doctorate researcher and an associate professor in Chongqing University. He is engaged in the area of health monitoring of civil structure using fiber optic sensors.