

文章编号: 0258-7025(2004)04-0473-04

应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器

傅海威^{1,2}, 乔学光², 贾振安², 赵大壮², 傅君眉¹

(¹ 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049; ² 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065)

摘要 提高光纤布拉格(Bragg)光栅传感器响应灵敏度是提高光纤布拉格光栅传感系统检测精度的有效途径之一。基于弹性聚合物材料封装和金属波纹管封装对光纤布拉格光栅应力响应的增敏作用,提出了一种新颖的应力响应增敏的高灵敏度光纤布拉格光栅压强传感器模型。推导了该传感器的压强与布拉格波长相对偏移量之间的关系,给出了该传感器压强响应灵敏度系数的解析表达式。表明该传感器布拉格波长相对偏移量和压强之间具有良好的线性关系,同时也指出通过适当选择弹性体的弹性模量、波纹管弹性系数等特性参数,以及它们的尺寸,就可以方便地调整该传感器的压强响应灵敏度系数。该传感器压强响应灵敏度系数实验值高达 $-4.35 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ (-6.74 nm/MPa),是裸光纤光栅压强响应灵敏度系数的 2197 倍,理论值为 $-4.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$,实验值与理论值吻合得很好。

关键词 传感器技术; 光纤布拉格光栅; 光纤传感; 应力增敏; 压强灵敏度系数

中图分类号 TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A

Stress Sensitivity Enhanced in-Fiber Bragg Grating Pressure Sensor

FU Hai-wei^{1,2}, QIAO Xue-guang², JIA Zhen-an², ZHAO Da-zhuang², FU Jun-mei¹

(¹ School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)
(² Department of Information Science, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract To enhance the sensitivity of the in-fiber Bragg grating (FBG) sensor is one of the effective ways to improve the resolution of the FBG sensing system. Based on effect of FBG stress sensitivity enhancement by encapsulating the FBG with elastic polymer and a metal bellows, a novel model of high-sensitivity FBG pressure sensor is proposed. The relation between relative shift of Bragg wavelength and the pressure applied on the sensor is derived, and the analytical expression of pressure sensitivity coefficient is also given. It indicates that the relation between the relative shift of Bragg wavelength and applied pressure is linear, and the pressure sensitivity coefficient can be enhanced by properly selecting the parameters of the elastic part and the metal bellows, such as the elastic modulus of the elastic part and the elastic constant of the bellows, and the size of them. The experimental pressure sensitivity coefficient of the sensor is $-4.35 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ (-6.74 nm/MPa), which is 2197 times of that of the bare FBG, the theoretical value of the sensor is $-4.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, they fit very well.

Key words sensor technique; in-fiber Bragg grating; optical fiber sensing; stress sensitivity enhancement; pressure sensitivity coefficient

1 引 言

由于光纤布拉格光栅(FBG)有抗电磁干扰、耐

腐蚀等诸多优点,自光纤光栅用于传感以来,光纤光栅传感理论与技术受到人们广泛的关注,已经被广

收稿日期:2003-07-24; 收到修改稿日期:2003-10-16

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2002AA313150)、国家自然科学基金(69877025)、国家教育部科学技术重点项目(02190)、陕西省自然科学基金(2000C34)、陕西省教育厅科学技术项目(02JK158)和西安市科技攻关项目(GG200126)资助课题。

作者简介: 傅海威(1966—),男,陕西岐山人,副教授,西安交通大学电子与信息工程学院微波所博士研究生,主要从事光纤光栅传感器件及系统理论与技术研究。E-mail:hwfu2@tom.com

泛用于应变、压力、压强、温度、流量、流速、气体成分等多种物理量的传感测量^[1~5]。最近,光纤光栅传感器被用来测量油气井下和输油管线的压力、温度等物理量^[3]。

光纤光栅是对应变和温度都敏感的器件^[4,6],可以直接用来测量应变和温度,可以利用应力应变关系间接测应力、压强、压力等。对于裸光纤光栅来讲,单位轴向应力所产生的应变是确定的,所引起的中心波长偏移是一定的,也就是说应力灵敏度系数是一个常量。若直接使用光纤光栅测量小范围变化的压强,要想提高测量的精度,在信号解调的精度一定的情况下,就必须采取应力或压强增敏措施,所以应力增敏的理论和技术研究就成了光纤光栅压强传感测量乃至其他可以转换为压强的参量的传感测量研究的一个核心问题^[6~10]。文献[8]中用聚合物封装的办法,将压强传感器的灵敏度系数提高到了 $-3.41 \times 10^{-3} \text{ nm/MPa}$ (相当于灵敏度 -5.277 nm/MPa),本文提出了基于弹性体和波纹管的应力增敏的模型,得到了灵敏度系数高达 $-4.35 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ (相当于灵敏度 -6.74 nm/MPa)的光纤光栅压强传感器。

2 光纤光栅应力响应

根据光纤布拉格光栅的耦合模理论^[11],均匀光纤布拉格光栅可将其中传输的一个导模耦合到另一个沿相反方向传输的导模而形成窄带反射波,反射波中心波长 λ_B 为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为导模的有效折射率, Λ 为光栅周期。

当光纤光栅受到外力作用时,将引起光栅周期的变化和弹光效应的作用,布拉格光栅反射波中心波长 λ_B 将发生偏移,即

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

在轴向应力作用下,布拉格光栅反射波中心波长相对偏移量与轴向应变之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon \quad (3)$$

式中 p_e 为光纤的有效弹光系数, ϵ 为光纤光栅的轴向应变,对于石英光纤 $p_e = 0.216$,应变灵敏度系数为 7.84×10^{-7} 。

再根据轴向压应力与应变的关系可得中心波长相对偏移量与应力之间的关系

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{1 - p_e}{E}\sigma \quad (4)$$

式中 E 为光纤光栅的弹性模量, σ 为轴向应力。对于熔石英光纤来讲, $E = 7.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$,则其轴向压应力灵敏度系数为 $-1.12 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ 。

3 光纤光栅应力增敏理论

对于作为传感的光纤光栅来讲,它是实心圆柱,也可以看作是各向同性的。将光纤光栅嵌入一弹性基体材料圆柱中,且让其位于圆柱形弹性体的中心,取如图1所示圆柱坐标。

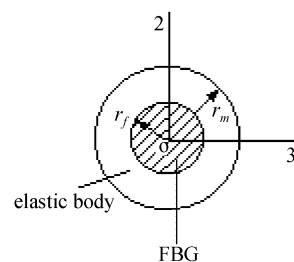


图1 光纤光栅应力增敏模型示意图

Fig. 1 Schematic illustration of in-fiber Bragg grating stress enhancement model

设光纤光栅和弹性基体在对称轴方向加载以后所产生的应变是一样的,即加载前后垂直于轴的截面保持为平面。同心圆柱显然属于横观各向同性体, $o23$ 为各向同性面,根据弹性力学知道其独立弹性常数共有5个。在柱坐标系 (z, r, ϕ) 中, z 方向的应力在同心圆柱端面上的分布,使得在该方向上产生应变 ϵ_z 。由弹性力学和材料力学知,弹性体弹性模量和光纤光栅弹性模量以及两者的体积份额之间的关系为

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (5)$$

E_1 为弹性体和光纤光栅复合体的弹性模量, E_f , V_f ; E_m , V_m 分别为光纤光栅和弹性基体的弹性模量和各自所占的体积份额。可见,如图1所示的复合材料,其弹性模量取决于光纤光栅和弹性基体的弹性模量以及两种材料的体积份额等因素^[12]。

该模型的轴向应力、中心波长相对偏移量之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{1 - p_e}{E_1}\sigma \quad (6)$$

对于用作传感的光纤布拉格光栅来讲,提高应力灵敏度的方法就是设法降低复合材料的弹性模量,其途径有二,一是尽可能降低弹性基底的弹性模量,二是增大基底材料的份额。

4 光纤光栅压强传感器

波纹管是纵向可以形变,侧向基本不形变的弹性元件。利用波纹管可以将外界压强变化转换成纵向力的变化,转换过来的力的大小不仅取决于外界压强的变化大小,同时也取决于波纹管有效面积的大小。如图 2 所示,将弹性材料增敏后的光纤光栅密封在波纹管中,利用波纹管纵向力与外界压强变化和其有效面积之间的关系,对光纤光栅应力响应进一步增敏。波纹管为常压,当外界压强变化时波纹管会受到力的作用而发生伸缩,从而引起光纤光栅栅距变化和弹光效应导致光纤光栅布拉格波长发生偏移。通过测量光纤光栅波长偏移量,就可以测得外界压强的变化。假设增敏后的光纤光栅横截面的面积为 S_0 ,波纹管的有效面积为 S ,弹性系数为 k ,则当外界压强变化为 p 时,在波纹管上所产生的力为

$$F = pS \quad (7)$$

该力将引起波纹管和光纤光栅的形变,假设波纹管的长度为 L ,压缩量为 x ,则

$$F = kx + F_0 \quad (8)$$

$$F_0 = \sigma S_0 \quad (9)$$

所以

$$pS = (kx + \sigma S_0) = \left(\frac{kL}{E_1} + S_0 \right) \sigma \quad (10)$$

$$\sigma = pS \times \left[\frac{kL}{E_1} + S_0 \right]^{-1} \quad (11)$$

由于是压力作用,所以有

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -\frac{1-p_e}{E_1} pS \times \left[\frac{kL}{E_1} + S_0 \right]^{-1} = - (1-p_e) \frac{S}{kL + S_0 E_1} p = \eta p \quad (12)$$

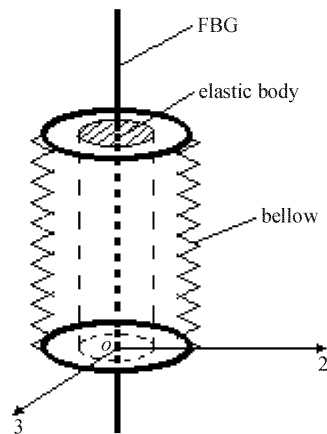


图 2 压强传感器示意图

Fig. 2 Schematic illustration of pressure sensor

其中

$$\eta = - (1-p_e) \frac{S}{kL + S_0 E_1} \quad (13)$$

为压强灵敏度系数,该系数完全取决于光纤材料、增敏弹性材料以及波纹管的力学性质。适当选择弹性体的参数,比如减小 E_1, S_0, k, L 的大小或增大 S 的大小都可以提高压强灵敏度系数。

当波纹管的有效面积 S 较小时,该传感器的压强灵敏度的增敏效果取决于弹性体材料,当 S 变大时,波纹管的增敏作用就会变大。在这种传感器中,弹性材料封装可以降低光纤光栅的弹性模量,也就起到应力增敏的效果;将封装后的光纤光栅装入波纹管,通过改变波纹管的有效面积和弹性系数,就可以进一步对应力增敏,这种传感器的设计实际上是一种弹性体和波纹管双增敏结构。同时波纹管还起到了屏蔽横向压强的作用,将轴向压强转换成光栅轴向应力;弹性体封装也可以起到保护光栅的作用。该传感器的结构简单,性能稳定,且灵敏度可调。

5 实验结果及分析

实验中,先将光纤光栅封装在弹性材料中进行应力增敏,再将其安装在波纹管中就得到了压力传感器。弹性材料封装后的光纤光栅的外径为 10 mm,截面积为 $S_0 = 0.785 \text{ cm}^2$,等效弹性模量为 $E_1 = 1.24 \times 10^9 \text{ Pa}$;波纹管的弹性系数为 $k = 3.27 \times 10^3 \text{ N/m}$,有效内径为 $d = 20 \text{ mm}$,外径为 $D = 34 \text{ mm}$,有效面积为 $S = 5.7256 \text{ cm}^2$,长度为 $L = 40 \text{ mm}$ 。该传感器压强灵敏度系数的理论值由式(13)可得为 $-4.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 。

实验中所用光纤光栅反射波中心波长为 1548.58 nm,将该传感器放入压力容器中,用液压表校正仪加压,用最小分度值为 0.02 MPa 的压力表和分辨率为 0.05 nm 的 MS9710C 光谱分析仪分别测量压强和光纤光栅反射波中心波长,每隔 0.02 MPa 记录一组压强和对应的光纤光栅反射波中心波长。图 3 是实验得到的反射波中心波长相对偏移量与压强的关系。

用最小二乘法拟合出的线性方程为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -4.35 \times 10^{-9} p + 6.85 \times 10^{-6} \quad (14)$$

可见压强灵敏度系数为 $-4.35 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 。增敏后的光纤光栅压强灵敏度系数是裸栅压强灵敏度系数^[4] $-1.98 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 的 2197 倍。

(14)式两边同乘以光纤光栅的中心波长,就得

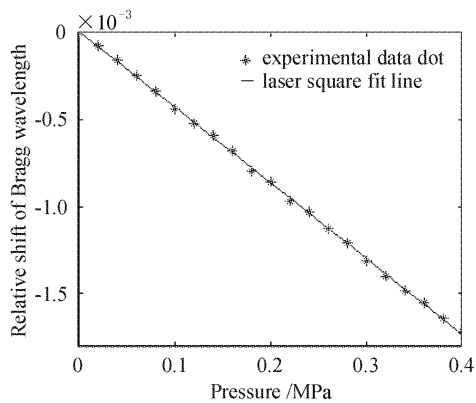


图3 压强与中心波长相对偏移量之间的关系
Fig. 3 Relation between relative shift of Bragg wavelength and pressure

到中心波长偏移量与压强的关系

$$\Delta\lambda_B = -4.35 \times 10^{-9} \lambda_B p + 6.85 \times 10^{-6} \lambda_B$$

将 $\lambda_B = 1548.58 \text{ nm}$ 代入得

$$\Delta\lambda_B = -6.74 \times 10^{-6} p + 0.01 \text{ (nm)}$$

波长偏移量的压强灵敏度系数为 6.74 nm/MPa , 拟合直线中的非零截距项较之仪器分辨率而言比较小, 可以忽略。

可以看出, 光纤光栅传感器的压力灵敏度系数的理论值和实验值吻合得很好, 误差仅为 5.4% 。引起误差的主要原因在于封装技术, 也就是弹性材料与光栅粘接的紧密程度, 光栅是否粘接在弹性体柱的中心, 弹性体是否安装在波纹管的中心等等。

6 结 论

提出了一种应力增敏的高灵敏度的光纤布拉格光栅压强传感器, 从理论上推导了该传感器的压强灵敏度系数。得到的传感器压强灵敏度系数是裸光纤光栅压强灵敏度系数的 2197 倍。对于这种基于弹性材料和波纹管增敏的光纤光栅压强传感器, 通过适当选择波纹管尺寸、弹性系数、弹性体的尺寸和

弹性模量等参数, 都可以方便地改变和调整传感器的灵敏度和量程范围, 以适用于不同的场合, 譬如输油输气管线中的压强检测、油气井下压强测试等。

参 考 文 献

- 1 R. Maaskant, T. Alavie, R. M. Measures *et al.*. Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1997, **19**(1):21~33
- 2 W. Eecke, I. Latka, R. Willsch *et al.*. Optical fiber Bragg grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring [C]. *SPIE*, 2000, **4185**:888~891
- 3 V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov *et al.*. Fiber Bragg grating for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **32**(5):497~503
- 4 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fibre grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4):398~399
- 5 A. D. Kersey, M. A. Davis, J. Heather *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *IEEE J. Lighwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 6 Yunqi Liu, Zhuanyun Guo, Ying Zhang *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer coated fibre Bragg grating [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6):564~566
- 7 M. G. Xu, H. Geiger, J. P. Dakin. Fibre grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2):128~129
- 8 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):89~91
张颖, 刘志国, 郭转运等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):89~91
- 9 Dong Xin-yong, Guan Bai-ou, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement using one fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7):621~624
董新永, 关柏鸥, 张颖等. 单个光纤光栅实现对位移和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7):621~624
- 10 Liu Yun-qi, Guo Zhuanyun, Liu Zhi-guo *et al.*. High-sensitivity fiber grating pressure sensor with polymer jacket [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(3):211~214
刘云启, 郭转运, 刘志国等. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(3):211~214
- 11 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 3
廖延彪. *光纤光学*[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 3
- 12 Shen Guan-lin. *Mechanics of Composite Materials* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996. 2
沈观林. *复合材料力学*[M]. 北京:清华大学出版社, 1996. 2