

铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究*

詹亚歌 蔡海文 耿建新 瞿荣辉 向世清 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

摘要 提出了一种光纤布喇格光栅的铝槽封装工艺, 并对铝槽封装光纤光栅传感器的应变与温度传感特性进行了实验研究和理论分析. 与裸光纤光栅的测试结果比较表明, 铝槽封装工艺基本不改变光纤光栅应变传感的灵敏性, 但是温度灵敏度系数提高了3.5倍. 经过该工艺封装的光纤光栅可以探测识别0.2 $\mu\epsilon$ 的应变与0.02 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化.

关键词 传感器; 光纤光栅; 应变传感; 温度传感

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

光纤传感器种类很多, 能够测量许多物理参量并具有一些明显的优势. 传统的光纤传感器绝大部分属于“光强型”或“干涉型”, 相对于机电类传感器, 光纤传感器具有一些明显的优势, 包括抗电磁干扰、耐高温、体积小、灵活方便等. 以光纤布喇格光栅(FBG)为主的光纤光栅传感器除了具有普通光纤传感器的优势之外, 还有一些特别的优势, 最主要是传感信号为波长调制以及复用能力强, 更容易实现准分布式测量, 所以说光纤光栅传感器是最理想的灵敏元件^[1].

但是, 由于裸光纤特别纤细, 其外径约为125 μm , 主要成分是 SiO_2 , 因此特别脆弱, 尤其其它的抗剪能力很差, 直接将光纤光栅作为传感器在工程实际中遇到了布设工艺的大难题^[2]. 另外, 普通光纤布喇格光栅因受限于光纤石英材料的温度特性, 一般在温度变化100 $^{\circ}\text{C}$ 时, 波长漂移为1 nm左右, 所以限制了光纤光栅温度传感器的分辨率, 要达到较高的分辨率, 通常需使用代价较大的高分辨率波长解调系统, 例如高分辨率光谱仪或干涉仪等. 目前国内外对光纤光栅的封装工艺研究报道的不多, 有美国的 Stutapum 等用钼膜封装光纤光栅, 利用钼吸氢后改变光栅中心波长的能力制作了氢传感器^[3]; 新加坡 Murukeshan 等将光纤光栅埋入智能复合材料监测其固化过程^[4]. 因此, 针对上述两方面需要解决的问题研究实用的光纤光栅的封装工艺, 以提高其抗剪能力和温度灵敏度, 其意义重大.

针对土木工程粗放式施工的特点, 本文将研究光纤布喇格光栅的铝槽封装工艺, 并通过实验和理

论分析研究封装后光栅的应变和温度传感特性.

1 原理

1.1 光纤光栅的应变和温度传感模型

光纤布喇格光栅(FBG)中心波长 λ 可表达为

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中, n 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期. 不考虑应变与温度的耦合作用, 光纤光栅的波长随其温度和所受应变的变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 + \kappa)\Delta\epsilon \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为波长变化, α 为热膨胀系数, ξ 为热光系数, κ 为与光纤材料的光弹系数有关的光纤应变系数, 即

$$\kappa = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (3)$$

其中, p_{11} 和 p_{12} 为光弹常数, ν 为泊松比, 对于光纤为纯石英的情况, 通常有^[5]: $\kappa = -0.22$, $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\xi = 6.67 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 但是, 由于采用的光纤不同、写入光栅的工艺以及退火工艺的差别, 不同光纤光栅的传感灵敏度会有差异, 尤其光纤光栅经过封装后, 封装材料会极大地改变光纤光栅的传感特性, 因此封装后的光纤光栅必须经过标定才能用作实际测量.

1.2 铝槽封装光栅增敏特性试验的解调原理

在长周期光栅的透射谱中, 特定谐振损耗谱的强度下降边(或上升边)所包含的波长范围内其光强度为近似线性(线性误差在 10^{-4} 量级)的减小(或增大)^[6], 利用这一点可实现长周期光栅对宽带光源的调制, 产生一个在特定波长范围内强度为线性变化(下降或上升)的光源. 选择具有合适布喇格反射波长的两个布喇格光栅, 使其中心波长 λ_B 均处于长周期光栅透射谱的线性区范围内, 并靠近线性区的中间位置. 当传感光栅的波长被传感信号调

*上海市科技委员会专项基金资助项目(项目编号: 011661081)

Tel: 021-69918692 Email: zhanygdove@163.com

收稿日期: 2003-07-16

制时,其反射峰在线性区的位置发生变化,但其谱型不随被测信号改变,反射的绝对光功率将线性变化,因此光电探测器(PD)的输出电压将线性变化. 根据光电探测器的输出电压可解调出传感光栅的波长. 这一原理与线性滤波器相似,但长周期光栅相对于线性滤波器有两点明显优势,即速度快和代价小. 图1为实验所用布喇格光栅反射谱和长周期光栅透射谱的示意图.

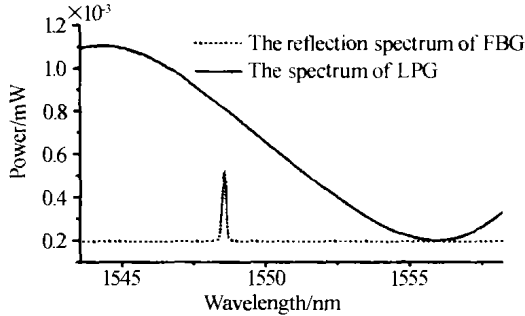


图1 长周期光栅的部分透射谱与布喇格反射光栅的反射谱示意图
Fig. 1 The transmission spectrums of LPG and the reflection spectrums of FBG

2 光纤光栅铝槽封装工艺

光纤光栅的铝槽封装工艺如图2所示,即将光纤光栅用环氧树脂封装在一个刻有细槽的铝板内,铝质为铸造铝合金. 封装时,力图保证光纤光栅平直并位于铝槽的底面中轴线上. 注入环氧树脂时,要适当加热,以增加环氧树脂的流动性,保证槽内充满密实,并减小形成气泡的可能性,还要保证树脂不溢出槽外,以便于加盖保护铝片. 在铝板上加四个螺孔,如图1所示,左边的两个螺孔用来把铝板固定到被测物体上,而右边的两个螺孔兼有把铝板固定到被测物体和把保护铝盖片固定到铝板上的双重作用,盖片和铝板的长度分别为5 cm和4 cm,铝槽宽和深分别为1.5 mm和1.2 mm.

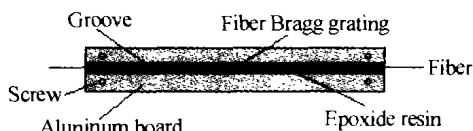
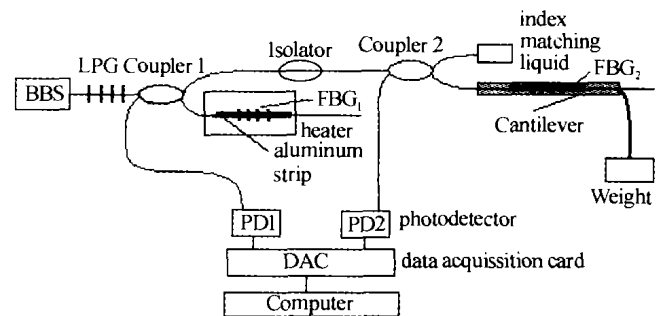


图2 光纤光栅铝槽封装示意图
Fig. 2 Sketch of aluminum groove encapsulation for FBG

上述铝槽封装光纤光栅很容易被固定到被测物体,并且铝盖片不影响被测物体把应变和温度传递到光栅,这给测量使用带来了很大的便利. 例如,飞机机翼的疲劳状态应变测量时,更适合于铝板封装的光纤光栅. 另外,例如对于建筑物的健康状态检测,文献[2]中提到的毛细钢管封装工艺便于在建筑物被建造的过程中嵌入其中,而铝槽封装的光纤光栅无论是在建筑物被建造过程中还是竣工以后的使用过程中都很容易被固定到被测物体上进行测量.

3 铝槽封装光纤光栅的温度与应变传感特性实验及结果

图3为实验装置示意图. FBG₁被放入温度控制箱内作为温度传感光栅,温控箱的温度灵敏度为0.01℃. FBG₂被环氧树脂完全粘于悬臂梁的中心作为应变传感光栅,这样悬臂梁所受的应变能够完全传递给光栅. 实验中两个传感光栅反射的光信号分别被两个PD接收,PD输出的模拟电压信号由数据采集卡采集变为数字信号,被计算机处理,直接由LabView程序显示出来. 程序中加入了平均和Savitzky-Golay滤波器处理,以消除部分噪声,提高信噪比.



BBS: Broadband source, LPG: Long period grating
图3 实验装置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the temperature and strain sensing characteristics of the embedded FBG experimental setup

为了验证光栅被封装后其应变响应是否为线性,先对铝槽封装光栅做应变-电压响应试验,结果如图4(a)所示,结果标明封装后仍为线性响应.

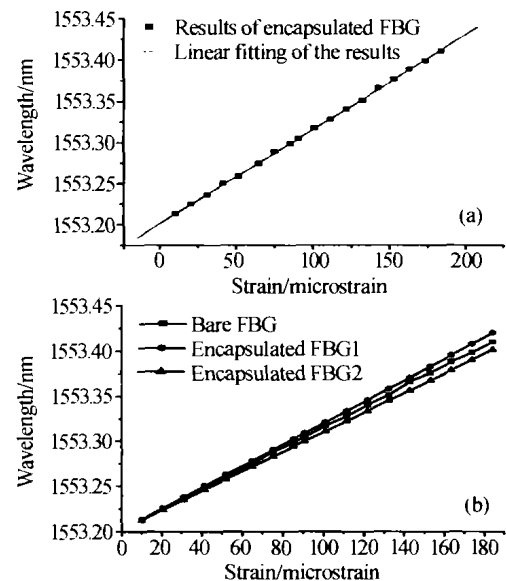


图4 裸光栅和铝槽封装光栅的应变-波长响应特性实验结果

Fig. 4 Results of the strain sensing property experiments
在应变特性试验中,取三个波长近似的光栅,其中两个按相同的工艺封装到两个具有相同的铝槽中.

为了准确验证光栅的应变特性,改用光谱仪做解调元件,并在试验装置中去掉长周期光栅以消除其对光源的解调.三者波长随应变的响应如图 4(b)所示.根据梁的物理尺寸和材料,理论计算表明悬臂梁在受到 1000 g 的砝码所施加的拉力时,将产生 1300 $\mu\epsilon$ 的应变.因此,由图可知,三者的波长响应分别为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B(\text{bare})}} = 0.778\mu\epsilon^{-1}, \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B(1)}} = 0.776\mu\epsilon^{-1},$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B(2)}} = 0.779\mu\epsilon^{-1}$$

封装光纤光栅应变灵敏度系数取两个平均值,其标定值为

$$H_e = (0.776 - 0.779)/2\mu\epsilon^{-1} = 0.778\mu\epsilon^{-1} \quad (4)$$

与裸光纤光栅的灵敏度系数吻合很好,从而说明铝槽光纤光栅封装工艺基本没有改变光纤光栅的应变传感特性.

在温度传感特性的试验中,温控箱的温度变化为 $-10 \sim 60^\circ\text{C}$,图 5 为温度特性的试验结果,图中两组数据线性拟合的斜率之比为 3.52:1,即光栅经铝槽封装后其温度灵敏系数提高了近 3.52 倍.裸光栅的温度灵敏系数经计算为 11.2 $\text{pm}/^\circ\text{C}$,封装后传感器的温度灵敏系数为 39.4 $\text{pm}/^\circ\text{C}$.

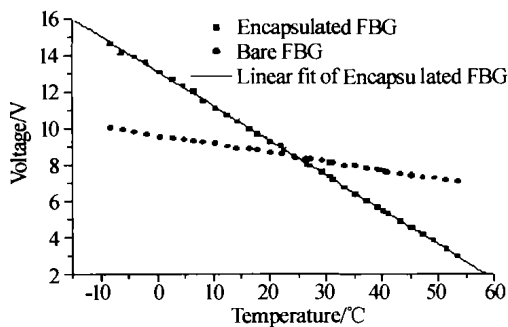


图 5 裸光栅和铝槽封装光栅的温度-电压响应特性实验结果

Fig. 5 Results of the temperature sensing property experiment
根据整个系统的噪声情况和实验中可以解调的最小应变与温度变化量,得知实验中应变和温度的分辨率分别达到 0.2 $\mu\epsilon$ 和 0.02 $^\circ\text{C}$,并且上述每个试验都经过多次,其结果具有重复性.

4 分析

实验证明铝槽封装光栅的温度灵敏度系数比裸光栅提高了 3.52 倍.光栅经铝槽封装后,光栅材料的热光系数没有改变,但光栅随铝槽热胀冷缩,即光栅的热膨胀性质将发生改变,封装后的波长变化与温度变化之间的关系应表示为^[7]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [\alpha_0 + \beta_0 + (1 - P_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha_0)] \Delta T \quad (5)$$

式中, α_{sub} 为母体或基底材料的热膨胀系数,实验中铝的热膨胀系数为 $\alpha_{\text{sub}} = 23 \times 10^{-6}$,则铝槽封装后光栅的温度灵敏系数为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [\alpha_0 + \beta_0 + (1 - P_e)(\alpha_{\text{sub}} - \alpha_0)] \Delta T = 38.6 \text{ pm} \cdot \text{K}^{-1}$$

而封装前光栅的温度灵敏系数为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha_0 + \beta_0) \Delta T = 11.2 \times 10^{-6} \text{ pm} \cdot \text{K}^{-1}$$

因此理论分析表明,封装后光栅的温度灵敏系数比原来提高了 3.45 倍,而实验值为 3.52,误差为 2%,这说明实验与理论分析一致.

5 结论

1) 实验证明铝槽封装基本没有改变光栅的应变传感特性.但是铝槽封装光栅可使其温度灵敏系数提高 3.5 倍,同样用其他热膨胀系数较大的材料作基底封装光栅也可提高布喇格光栅的温度灵敏性,封装后光纤光栅温度传感器的灵敏度会得到提高.

2) 在温度传感实验中,在解调用的长周期光栅一定的情况下,温度灵敏度系数的扩大将减小可测量的温度范围.

参考文献

- 1 Rao Y J. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors. *Optics and Laser in Engineering*, 1999, **31**: 297 ~ 324
- 2 Zhou Z, Zhao X F, Wu Z J, et al. Study on FBG sensor's steel capillary encapsulating technique and sensing properties. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(12): 1090 ~ 1092
- 3 Stupum B, Azor M T, Kazemi A. Pd-coated elastoplastic fiber Bragg grating sensors for multiplexed hydrogen sensing. *Sensors and Actuators*, 1999, **B60**: 27 ~ 34
- 4 Murukeshan V M, Chan P Y, Ong K S, et al. Cure monitoring of smart composites using fiber Bragg grating based embedded sensors. *Sensors and Actuators*, 2000, **A79**: 153 ~ 161
- 5 Jung J, Nam H, Lee B. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity. *Applied Optics*, 1999, **38**(13): 2752 ~ 2754
- 6 Sergei A, Vasiliev, Medvedkov O I. Long-period refractive index fiber gratings: properties, application, and fabrication techniques. *SPIE*, 2000, **4083**: 212 ~ 223
- 7 Liu Y Q, Guo Z Y, Zhang Y. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating. *Electronics Letters*, 2000, **36**(6): 564 ~ 566

Study on Aluminum Groove Encapsulating Technique and Sensing Characteristics of FBG Sensor

Zhan Yage, Cai Haiwen, Geng Jianxin, Qu Ronghui, Xiang Shiqing, Wang Xiangzhao
Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2003-07-16

Abstract In consideration of bare optical fiber being fragility, the aluminum groove encapsulating technique for fiber Bragg grating (FBG) sensor was developed, and then the strain and temperature sensing characteristics of the encapsulated FBG sensor were experimentally and theoretically studied. The comparison of results between encapsulated FBG sensor and bare FBG sensor indicated that the strain sensing property of the FBG sensor are nearly same as that of bare FBG, however the temperature sensing ability of encapsulated FBG sensor is improved and the sensitivity coefficient is 3.5 times as much as that of bare FBG. The strain and temperature sensing resolution of the encapsulated FBG sensor are $0.2 \mu\epsilon$ and 0.02°C , respectively. The encapsulated FBG is proper for application in civil engineering.

Keywords Sensor; Fiber Bragg grating; Strain sensing; Temperature sensing



Zhan Yage was born in 1978, in China. She received the B. S. degree in physics from the Henan University in 2000, and the M. S. degree in optical engineering from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, in 2002 respectively. She is now working for her Ph. D. and her research interests include fiber Bragg grating embedded and distributed sensors for strain and temperature sensing.