

文章编号: 0258-7025(2005)01-0083-04

高分辨率光纤光栅温度传感器的研究

詹亚歌^{1,2}, 蔡海文¹, 向世清¹, 瞿荣辉¹, 王向朝¹

(¹ 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; ² 中国科学院研究生院, 北京 100084)

摘要 报道了一种具有高分辨率和高效且价廉的解调系统的光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器。提出了光纤光栅的金属槽封装技术,以提高传感光栅的温度灵敏性。研究了金属槽封装光栅的温度灵敏性,理论分析和实验结果表明,封装光栅的温度灵敏系数比普通裸光栅提高了 3.6 倍。系统利用一长周期光栅(LPG)作为线性滤波器,宽带光源经此长周期光栅调制后入射到传感光栅,可解调布拉格传感光栅的波长位移。理论分析与实验结果一致,系统可达到的温度分辨率为 0.02℃。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;封装技术;温度传感器

中图分类号 TN 212.14 **文献标识码** A

Study on High Resolution Fiber Bragg Grating Temperature Sensor

ZHAN Ya-ge^{1,2}, CAI Hai-wen¹, XIANG Shi-qing¹, QU Rong-hui¹, WANG Xiang-zhao¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

Abstract A novel fiber Bragg grating (FBG) temperature sensor system with high resolution and low cost demodulation mechanism was proposed. The metal groove encapsulating technique for FBG sensor was developed to improve the temperature sensitivity of FBG temperature sensor. Coefficient of thermal-expansion of the encapsulated FBG sensor was studied. The comparison of results between encapsulated FBG sensor and bare FBG sensor indicted that the temperature sensitivity of encapsulated FBG sensor is improved and the sensitivity coefficient is 3.6 times as much as that of bare FBG sensor. A long period grating (LPG) was used as linear response filter to convert wavelength into intensity for interrogation. In experiment, a broadband source was modulated by the LPG and then it illuminated the sensor grating, which could interrogate the wavelength shifts of sensor system. The experimental results agreed well with the theoretical analysis. The FBG temperature sensor realized a high resolution of 0.02℃.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; encapsulating technique; temperature sensor

1 引言

光纤布拉格光栅温度传感器在温度测量领域得到了广泛的应用^[1]。但是,普通光纤布拉格光栅因受限于光纤石英材料的温度特性,一般温度总变化为 100℃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,但这些仪器不适

合实际应用。对于光纤布拉格光栅温度传感器,目前较实用和廉价的解调系统通常是基于强度到波长的解调方法,例如匹配光栅解调法。但是这种方法的灵敏度较低、解调范围较小,不能满足某些应用的要求,例如生物传感器就要求有较高的分辨率。刘云启等利用聚合物材料封装光栅的方法提高光纤布拉格光栅传感器的分辨率,使温度传感器的分辨率达到了 0.3℃^[2]。

本文介绍一种具有高分辨率、低成本解调系统

收稿日期: 2003-09-09; **收到修改稿日期**: 2003-10-28

基金项目: 上海市科技委员会专项基金(编号: 011661081)资助项目。

作者简介: 詹亚歌(1979—),女,河南省平顶山市人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光纤传感器及其解调技术的研究。E-mail: zhanygdove@163.com.

的光纤光栅温度传感器,系统主要应用了三个方面的措施来提高光纤光栅温度传感器的分辨率;并基于长周期光栅(LPG)来解调传感光栅的波长漂移。整个系统的温度分辨率达到了 0.02°C 。

2 原 理

从原理上,下述三个方面的措施可提高光纤光栅温度传感器的温度分辨率:1) 利用热膨胀系数较大的材料(例如铝槽或毛细钢管等)封装传感光栅,使光栅有较大的温度灵敏系数,即温度的微小变化可引起传感光栅波长(λ_B)有较大漂移,这是最直接和有效的方法;2) 增大传感光栅的 3 dB 带宽;3) 使用带阻率较大的长周期光栅调制宽带光源,使调制后的光源谱功率随波长线性变化较快。具体分析如下:

2.1 铝槽封装光纤光栅的温度传感模型

不考虑光纤光栅应变与温度的耦合作用,光栅波长随其温度的变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_0 + \beta_0) \cdot \Delta T, \quad (1)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为波长变化, α_0 为热膨胀系数, β_0 为热光系数,对于一般的石英光纤光栅,通常有^[3]

$$\alpha_0 = 0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}, \quad \beta_0 = 6.67 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1},$$

上述特性决定了普通光纤光栅在温度变化时波长漂移很小。例如对于中心波长在 1550 nm 波段的光栅,温度变化 100°C 时,波长漂移为 1.1 nm,这一性质使得许多温度传感器的灵敏性和分辨率较低,所以本文提出用铝槽封装光栅,以提高光栅的温度灵敏性。

光栅经铝槽封装后,将随铝槽热胀冷缩,其波长变化与温度变化之间的关系应表示为^[4]

$$\frac{\Delta\lambda'_B}{\lambda_B} = [\alpha_0 + \beta_0 + (1 - P_e) \cdot (\alpha_{\text{sub}} - \alpha_0)] \cdot \Delta T, \quad (2)$$

其中 α_{sub} 为铝(或其他基体)的热膨胀系数。上式中波长的变化一部分由温度变化本身引起,即 $(\alpha_0 + \beta_0) \cdot \Delta T$;另一部分是由于光栅与铝槽的热膨胀系数不同,两者热膨胀不同步而导致光栅产生应变,即 $[(1 - P_e) \cdot (\alpha_{\text{sub}} - \alpha_0)] \cdot \Delta T$ 。

实验中所用铝槽的热膨胀系数 $\alpha_{\text{sub}} = 23.5 \times 10^{-6}$,同样取波长为 1550 nm,则封装后光栅的温度灵敏系数

$$\Delta\lambda'_B = \lambda_B \cdot [\alpha_0 + \beta_0 + (1 - P_e) \cdot (\alpha_{\text{sub}} - \alpha_0)] \cdot \Delta T = 39.1 \text{ pm} \cdot \text{K}^{-1},$$

比原来的 $\Delta\lambda = 11.1 \text{ pm} \cdot \text{K}^{-1}$ 提高了近 3.6 倍。

2.2 系统的解调原理

在长周期光栅的透射谱中,特定谐振损耗峰的强度下降边(或上升边)所包含的某一波长范围内其光强度为线性(线性拟合误差在 10^{-4} 量级)的减小(或增大)^[5],利用这一点可实现长周期光栅对宽带光源的调制,产生一个在某波长范围内强度为线性变化(下降或上升)的光源。选择具有合适波长的光纤布拉格光栅,使其中心波长 λ_B 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,如图 1 所示。当传感光栅的波长被传感信号调制时,其反射峰在线性区的位置发生变化,但其谱形不随被测信号改变,则反射的绝对光功率将呈线性变化,因此光电探测器的光电流将呈线性变化,这样可解调光纤布拉格光栅的波长变化。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。

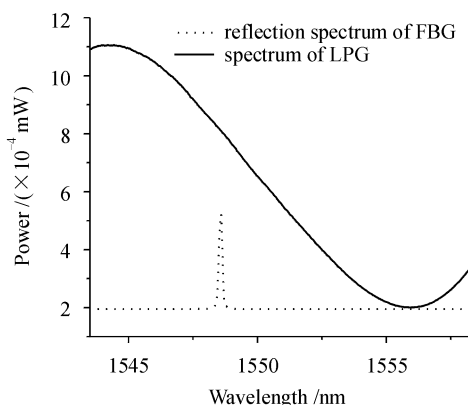


图 1 长周期光栅透射谱和光纤布拉格光栅反射谱示意图

Fig. 1 Schematic of the transmission spectrum of LPG and the reflection spectrum of FBG

3 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一细槽的铝条(其横截面为长方形)内,槽与铝条中轴线平行,铝质为铸造铝合金。封装时,尽量保证光纤光栅平直并位于槽的底面轴线上。注入环氧树脂时,要适当加热,以增加其流动性,保证槽内充满密实,并减小形成气泡的可能性,确保树脂不溢出槽外,以便于加盖保护铝片。在铝板上有四个螺孔,左边的两个螺孔用来把铝条固定到被测物体上,而右边的两个螺孔兼有把铝条固定到被测物体和把保护铝盖片固定到

铝条上的双重作用,盖片和铝条的长度分别为 5 cm 和 4 cm,铝槽宽和深分别为 1.5 mm 和 1.2 mm。封装后光纤光栅很容易被固定到被测物体上,并且铝盖片不影响被测物体把应变和温度传递到光栅,便于测量使用。文献[6]提到毛细钢管封装光栅适合在建筑物建造的过程中嵌入其中,而铝槽封装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。

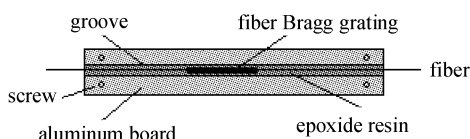


图 2 光纤光栅铝槽封装示意图

Fig. 2 Sketch of aluminum groove encapsulation for FBG

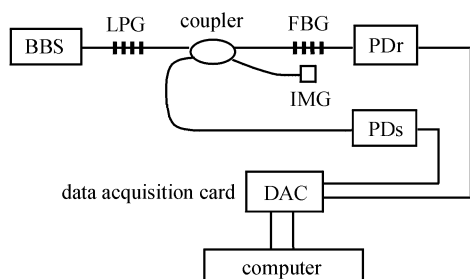


图 3 实验装置示意图

PDr: 参考光探测器; PDs: 信号光探测器; IMG: 折射率匹配凝胶;
BBS: 宽带光源; LPG: 长周期光栅

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

PDr: photo detector for reference; PDs: photo detector for signal; IMG: index matched gel; BBS: broadband source, LPG: long period grating

4 实验及结果

图 3 为光纤光栅温度传感的实验装置示意图。实验中,温度传感光栅的波长处于长周期光栅谐振损耗峰强度下降边的中间部分。FBG 被放入温度控制箱内,温控箱的导热介质为导热胶,其温度灵敏度为 0.01°C ,温度变化范围为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 。传感光栅反射的光信号被光电探测器(PD)接收,光电探测器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。

实验测量中加入了参考光以去除光源强度抖动对测量的影响,分析如下

$$P_{\text{Ds}} = I_0 K \int R_s(\lambda) T_{m(L)}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

$$P_{\text{Dr}} = I_0 K \int T_{m(L)}(\lambda) T_s(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

其中 P_{Ds} 和 P_{Dr} 分别为信号光功率和参考光功率; I_0 为光源强度, R_s 为传感光栅的反射谱函数, T_s 为传感光栅的透射谱函数, $T_{m(L)}(\lambda)$ 为在所需波长范围内长周期光栅的透射谱函数, K 为由耦合器、连接器等而引起的光路中的损耗因子。从方程(3)可以看出,光源以及损耗因子 K 的抖动将引起测量结果的误差。为有效地去除误差,采用了简单的参考测量方法,如下式方程所示

$$P' = \frac{P_{\text{Ds}}}{P_{\text{Dr}}} = \frac{\int R_s(\lambda) T_{m(L)}(\lambda) d\lambda}{\int T_{m(L)}(\lambda) T_s(\lambda) d\lambda}. \quad (5)$$

将上式的值也即两个光电探测器记录值的比值作为采集结果来解调温度将有效地消除误差。数据采集卡每秒采集 100K 次,在数据处理中取 100 个数据的平均值为一个记数点,同时加入在数据处理 Savitzky-Golay 中滤波处理,以滤掉部分噪声成分,提高信噪比。

共做了五个系列的实验,每一系列的实验都经过多次测试,具有稳定性。第一系列的实验是为了验证封装后光纤光栅的温度响应特性,结果如图 4 所示。图中两组实验结果直线拟合的斜率之比为 3.59:1,即铝槽封装提高了光栅的温度灵敏系数,其温度灵敏性扩大了约 3.6 倍,其值为 39.8。

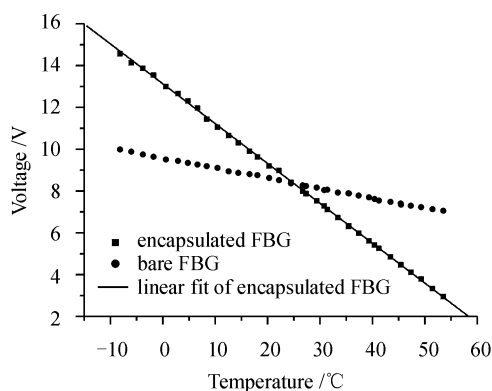


图 4 裸光栅和铝槽封装光栅的温度特性对比

Fig. 4 Comparison of the temperature sensing property for bare FBG and encapsulated FBG

其他四个系列的实验对不同条件下光纤光栅温度传感器的灵敏性作了比较。在第二系列的实验中传感光栅为没有经过封装的光纤布拉格光栅,其 3 dB 带宽为 0.21 nm(记为 FBG1),所用长周期光栅(记为 LPG1)损耗峰的强度下降边变化率为 1.1 dB/nm;第三系列的实验中同样为没有经过封装的

光纤布拉格光栅,但其 3 dB 带宽增大为 0.70 nm (记为 FBG2),长周期光栅仍为 LPG1;第四列实验的传感光栅用 FBG2,但是选用另一个长周期光栅(LPG2),其下降边强度变化为 2.8 dB/nm;在第五系列的实验中使用 FBG2 和 LPG2,但传感光栅经过铝槽封装。实验结果如图 5 所示,图中 Data2, Data3, Data4, Data5 分别为第二、三、四、五系列试验中的记录数据曲线。

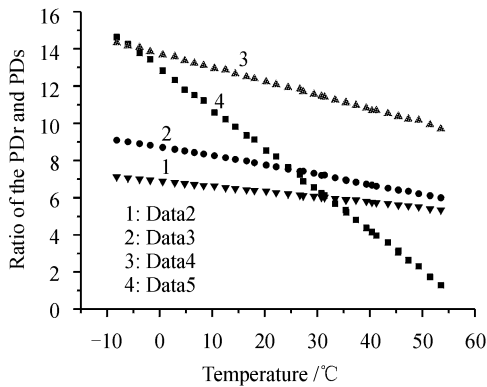


图 5 第二、三、四、五系列的实验结果

Fig. 5 Results of the second, third, fourth, fifth series of experiments

图 5 中四条直线斜率依次增大,说明实验中的三种措施(见在第 2 部分的原理)均可提高光纤光栅传感系统的温度灵敏性。第五系列实验记录结果的直线拟合具有最大的斜率,即第五系列的系统具有最高的温度灵敏性,温度的微小变化可引起传感光栅波长有较大漂移和探测器的电压值有较大的变化。系统的噪声为 10 mV,而实验中温度分辨率达到了 0.02°C。

5 结 论

实验中用铝槽封装光栅,极大地提高了光栅的温度灵敏度系数,达到了 $39.8 \text{ pm} \cdot \text{K}^{-1}$,实验结果与理论分析一致。实验中采取三种措施以提高光纤光栅传感系统的温度分辨率,系统的温度分辨率达到了 0.02°C。用热膨胀系数较大的基底材料封装光栅,可提高光栅的热灵敏系数,这将有利于提高光纤光栅传感器系统的温度分辨率。

参 考 文 献

- 1 Y. J. Rao. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors [J]. *Optics and Laser in Engineering*, 1999, **31**: 297~324
- 2 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Research on the simultaneous measurement of pressure and temperature using one fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):1002~1006
刘云启,郭转运,张颖等. 单个光纤光栅压力和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):1002~1006
- 3 J. Jung, H. Nam, B. Lee *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(13):2752~2754
- 4 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
- 5 S. A. Vasiliev, O. I. Medvedkov. Long-period refractive index fiber gratings: properties, application, and fabrication techniques [C]. *SPIE*, 2000, **4083**:212~223
- 6 Zhou Zhi, Zhao Xuefeng, Wu Zhanjun *et al.*. Study on FBG sensor's steel capillary encapsulating technique and sensing properties [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12):1090~1092
周智,赵雪峰,武湛君等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12):1090~1092