

# 一种新颖封装的耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器\*

禹大宽 乔学光 贾振安 孙安 王敏\*\*

(西安石油大学光纤传感重点实验室, 西安 710065)

**摘要** 分析了光纤 Bragg 光栅的传感原理, 将光纤光栅置于细钢管通过一种耐高温胶粘结细钢管两端使光纤光栅在高温下不脱落, 并通过细钢管上的中间螺纹给光纤光栅施加预应力, 使光纤光栅在温度变化过程中一直保持张紧状态, 保证传感器有很好的重复性和良好的线性. 实验结果表明: 该 FBG 光纤光栅温度传感器灵敏度为 0.0252 nm/°C, 有良好的重复性和线性, 温度测量范围达 200°C 以上, 可应用在高温环境测量温度的变化.

**关键词** 光纤 Bragg 光栅; 温度传感器; 耐高温

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

自 1989 年 Morey 首次报道将光纤光栅用于传感以来, 国内外许多研究者对其传感机理和应用进行了深入的研究, 使光纤光栅传感技术在现代社会传感领域有了飞速的发展<sup>[1,2]</sup>, 光纤光栅已成为目前最具有挑战性和最有发展前途的光无源器件. 光纤光栅传感器具有抗电磁干扰能力强、尺寸小、耐高温性好、复用能力强、传输距离远等特点, 已成为国内外研究的热点和学科前沿问题. 光纤光栅的中心反射波长会随外界温度的变化而产生波长漂移, 特别是光纤 Bragg 光栅由于具有温度特性稳定、线性度好的特点, 是理想的温度传感材料, 因此, 可以把光纤光栅作为温度传感器. 由于光纤 Bragg 光栅本身很纤细, 温度灵敏度较低, 特别是传感器的使用环境比较恶劣(如高温、高压等), 所以需要对外观进行特殊的结构设计和封装<sup>[3~6]</sup>. 因而使此类光纤光栅传感器既有一定的响应灵敏度, 又满足大范围温度测量的要求就显得尤为重要.

本文提出了一种改进的预应变可调的耐高温光纤 Bragg 光栅温度传感器, 对其温度的传感机理进行了分析和实验研究. 实验表明: 此种结构的温度传感器具有温度测量范围宽, 实验温度范围是 0~220°C, 重复性好, 光纤光栅的温度灵敏度是 0.0252 nm/°C, 性能稳定, 测量 200°C 甚至更高的温度, 可

以满足实际应用中许多高温环境诸如油气井下等工程的需要.

## 1 光纤 Bragg 光栅温度传感原理

由耦合模理论可知, 光纤 Bragg 光栅(FBG)的中心波长为

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

式中,  $n_{\text{eff}}$  是光纤纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  是光栅周期(栅距). 改变纤芯折射率和光栅周期时, Bragg 耦合波长的改变为

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

由文献[7]可知, 当外界温度和应力发生变化时, 相应的波长改变为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right] \Delta\epsilon + [\alpha + \xi] \Delta T \right\} \quad (3)$$

式中,  $\Delta\epsilon$  和  $\Delta T$  分别为应变变化和温度变化,  $P_{ij}$  是光纤材料的弹光张量分量,  $\alpha$  是光纤材料的热膨胀系数,  $\xi$  为光纤材料的热光系数,  $\nu$  为光纤材料泊松(Poisson)比系数.

对于硅基质掺锗光纤材料,  $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-7} \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ,  $\xi \approx 6.3 \times 10^{-6} \text{ nm/}^\circ\text{C}$ ,  $\frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \approx 0.22$ , 温度恒定应变变化和应变恒定温度变化的波长响应(工作波长为  $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ )  $\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\epsilon} = 1.20 \times 10^{-3} \text{ nm/}\mu\epsilon$ ,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 10.3 \times 10^{-3} \text{ nm/}^\circ\text{C}$$

由式(2)(3)看到, 当外界温度变化和光纤 Bragg 光栅受到应力作用时, 会使  $\Lambda$  和  $n_{\text{eff}}$  发生变化, 从而引起光纤 Bragg 光栅中心波长的漂移, 通过测量 Bragg 光栅中心波长的漂移量, 可实现对外界温度和应力的测量.

\*国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2002AA313150); 国家自然科学基金资助项目(69877025, 60177028); 国家教育部科学技术重点项目(02190); 陕西省自然科学基金项目(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)

\*\* Tel: 029-88382745 Email: yudakuan04@163.com

收稿日期: 2004-12-24

在进行耐高温温度传感器设计时,开始考虑用聚合物封装在细钢管中,结构如图 1,由于钢管很细,很难将胶均匀的密封在细钢管中.且由于无法给光纤光栅施加预应力,光纤光栅在封装后,处于相对自由状态,可能弯曲,且弯曲方向不固定.所以,细钢管和光纤光栅之间是一种不确定的关系,在温度升高时,波长漂移的线性度不好,重复性不好.如果选用聚合物胶,由于聚合物在固化<sup>[8]</sup>过程中,发生收缩,会产生光纤光栅的啁啾化.因此,必须对此方案进行改进,使之封装后的光纤光栅保持张紧状态,在外界温度变化时,使传感器有良好的稳定性、重复性.

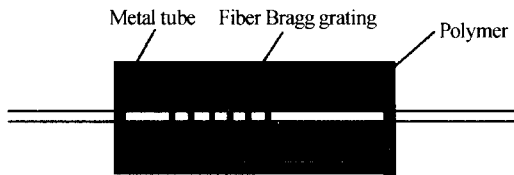


图 1 聚合物封装光纤光栅温度传感结构  
Fig. 1 Diagram of polymer packaged FBG for temperature sensing

改进的光纤光栅温度传感器结构图如 2. 选用的密封胶采用两端密封的办法,避免了聚合物固化过程中对光纤光栅的影响而产生的啁啾现象.这种结构的温度传感器中间有螺纹,在封装过程中,用于给光纤光栅施加一定的预应力,而且可以调节施加的光纤光栅预应力的.这样,在封装好光纤光栅后,光纤光栅一直处于张紧状态,光纤光栅和细钢管之间会保持良好的受力关系.

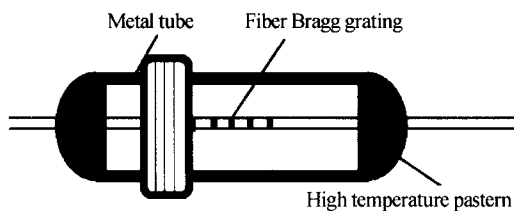


图 2 改进的封装光纤光栅温度传感器结构  
Fig. 2 Improved structure of pastern packaged FBG temperature sensor

## 2 实验及结果分析

封装光纤光栅的温度传感测试装置如图 3. 将封装好的光纤光栅传感器放入数字温控箱中.从宽带光源(BBS)发出的光经过 3 dB 耦合器入射到单模光纤,进而入射到加热箱内封装的光纤光栅,经光纤光栅反射的光又经 3 dB 耦合器进入光谱分析仪(OA),通过光谱分析仪观察光纤光栅反射峰中心波长的变化.掺铒光源的工作电流为 15 mA,中心波长为 1545.1 nm,带宽为 40 nm.光纤光栅是通过准分子激光器的紫外光在掺铈单模光纤上采用相位掩模板技术紫外写入的,加热箱的温度由电子加热

炉控制,温度大小由箱面上的数字表读取.与耦合器连接的光谱仪(AnritsuMS9710C)的分辨率为 0.05 nm,用以监测光纤光栅反射峰值中心波长  $\lambda_c$  和带宽  $\Delta\lambda_{3dB}$ .

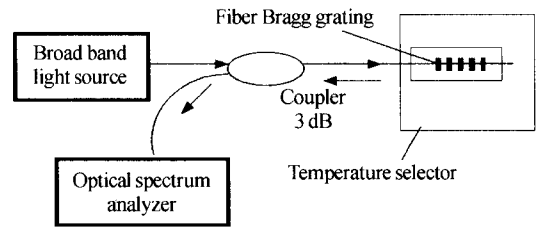


图 3 FBG 温度传感实验装置  
Fig. 3 Schematic diagram of FBG temperature sensing

采用图 3 的装置进行了多次实验.实验中,温度变化范围为 25.2~207.7℃,温度每变化 10℃记录一个  $\lambda_c$ ,在该温度变化范围内,中心波长的  $\lambda_c$  总漂移量为 4.550 nm.实验中的光纤光栅中心反射波长随温度变化的响应曲线如图 4.

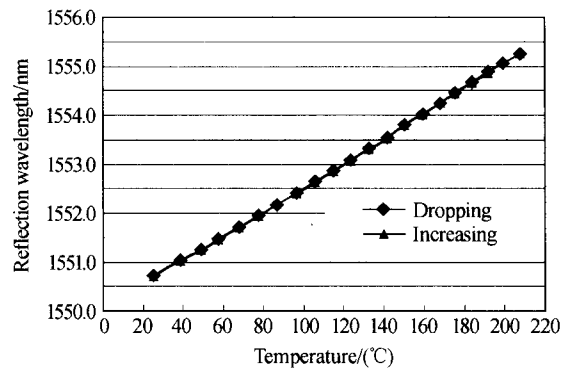


图 4 升温与降温过程反射波长漂移曲线  
Fig. 4 Reflection wavelength shift versus temperature of increasing and dropping process

对图 4 中的实验数据进行线性拟合,升温 and 降温的曲线都是  $Y=0.0252X+1550$ ,且线性拟合度分别为 0.9994 和 0.9995,温度的线性度很好.在 0~220℃ 范围内,光纤光栅温度响应灵敏度为 0.0252 nm/℃,约为裸光纤光栅的 2 倍,且响应特性较好,重复实验,温度响应趋势基本保持不变.由于温箱的自身限制,温度最多能加至 220℃.此种结构封装的光纤 Bragg 光栅温度传感器,增敏的原因在于钢管的线性热膨胀系数(为  $10.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )远大于光纤的热膨胀系数(为  $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ ).在温度升高的过程中,光纤光栅同时受到钢管的轴向拉力,因此,其波长的漂移是温度和轴向拉力共同作用的结果,从而提高了光纤 Bragg 光栅的温度灵敏度.

## 3 结论

本文提出了一种新的光纤光栅温度传感器的封装结构,这种结构有以下优点:1)由于光纤光栅封装

在细钢管内,可以对光纤光栅进行有效保护;2)可以在封装过程中调节光纤光栅波长,通过钢管上的调节螺纹,可以使光纤光栅始终保持张紧状态,避免封装过程中由于光纤光栅自由状态的不确定而在温度变化中波长温度特性的不稳定,保证了光纤光栅的线性和重复性;3)实现了光纤光栅的增敏效果,试验结果表明,光纤光栅的温度灵敏度为  $0.0252 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,约为裸光纤光栅的 2 倍;4)可以实现光纤光栅对大范围温度的测量,温度范围可达  $200^\circ\text{C}$  以上,能用于油气井下高温高压等恶劣环境中温度的实时测量.

#### 参考文献

- 1 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57~79
- 2 詹亚歌, 向世清, 方祖捷, 等. 光纤光栅传感器的应用. 物理, 2004, **33**(1): 58~61  
Zhan Y G, Xiang S Q, Fang Z J, et al. *Physics*, 2004, **33**(1): 58~61
- 3 詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏技术研究. 光子学报, 2004, **33**(8): 952~954  
Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952~954
- 4 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. 中国激光, 2002, **12**(9): 1089~1092  
Zhou Z, Zhao X F, Wu Z J, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **12**(9): 1089~1092
- 5 傅海威, 乔学光, 傅君眉. 基于平面膜片的光纤光栅传感研究. 光子学报, 2004, **33**(9): 1119~1122  
Fu H W, Qiao X G, Fu J M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1119~1122
- 6 董兴法, 付圣贵, 姜莉, 等. 用于结构损伤诊断的实用光纤光栅传感器研究. 光子学报, 2004, **33**(1): 28~30  
Dong X F, Fu S G, Jiang L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 28~30
- 7 廖延彪. 光纤光学. 北京: 清华大学出版社, 2000  
Liao Y B. *Fiber Optics*. Beijing: Qinghua University Press, 2000
- 8 孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 耐高压光纤 Bragg 光栅压力传感技术研究. 光子学报, 2004, **33**(7): 823~825  
Sun A, Qiao X G, Jia Z A, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 823~825

## A Novel Packaged Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with High Temperature-resistance

Yu Dakuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Sun An, Wang Min

Optical Fiber Sensing Key Laboratory, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065

Received date: 2004-12-24

**Abstract** The principle of fiber Bragg grating sensing is analyzed. Fiber Bragg grating(FBG) is placed in a thin metal tube and a special kind of high temperature-resistance pastern felts with two ends of the metal tube to make FBG not to fall off. Tensile force is put on the FBG by the screw thread in the process of encapsulation, which ensures the FBG tightening in changeable temperatures out of environment. It is found that the structure of FBG temperature sensor has good repeatability and linearity. The experimental results show that the temperature response sensitivity is  $0.0252 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , and the response curve is linear, and the whole measuring range is over  $200^\circ\text{C}$  at least. The FBG temperature sensor can be used in high temperature environment.

**Keywords** Fiber Bragg grating(FBG); Temperature sensor; High temperature-resistance



**Yu Dakuan** was born on December 17, 1980, in Henan Province. He earned the degree of B. S. in Electric Engineering Department from Xi'an Shiyu University in 2003. At present, he is studying for his M. S. degree at Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyu University. His main research fields include optical fiber sensing and optical fiber communication.