

改善波形并增敏的光纤光栅温度传感技术*

尉 婷^{1,2} 乔学光^{1,2} 贾振安² 王宏亮² 付海威²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 西安石油大学 光纤传感重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘 要 选用热膨胀系数较大的聚合物和某种偶联材料, 采用特殊工艺用其对裸光纤光栅进行封装, 消除了封装过程中所带来的光纤光栅啁啾现象, 极大地改善了光纤光栅反射波的波形, 提高了封装测试过程的重复性, 为波长解调解决了一大难题. 在 30.6℃~120℃ 范围内, 测量过程中波形很好并几乎不变, 温度灵敏度为 0.1173 nm/℃, 温度分辨率为 <0.43℃, 比裸光纤光栅增加了 11 倍; 平均灵敏度增敏倍数 $\gamma' = 10.34$, 与理论计算灵敏度增敏倍数 $\gamma = 10.76$ 符合得比较好. 聚合物封装光纤光栅的温度响应曲线具有很好的线性.

关键词 光纤传感; 光纤光栅; 封装工艺; 温度传感; 温度增敏

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

光纤传感技术是伴随着光导纤维及光纤通信技术的发展而发展起来的一种崭新的传感技术. 近年来人们把目光关注于一种新颖的具有光纤本征特性的无源光纤传感器——光纤光栅传感器. 这种传感器除有一般光纤传感器的优点之外, 还具有本征自相干能力强和在一根光纤上实现多点复用、多参量分布式测量的独特优势, 可实现对温度、压力等物理量的实时在线检测^[1~5].

温度是能直接引起光栅 Bragg 反射波长 λ_B 漂移的物理量之一, 但是由于光纤材料的热光系数和热膨胀系数都较小, 所以光纤光栅的温度灵敏性很低, 直接用裸光纤光栅做温度传感元件, 需要复杂的波长解调技术, 限制了光纤光栅在温度传感方面的应用. 现有的光纤光栅温度封装技术, 虽然在一定程度上提高了温度响应灵敏度, 但由于选用热膨胀系数大的材料, 固化过程中会产生收缩率不均匀, 引起光纤光栅啁啾化从而使得光纤光栅反射波形啁啾, 增加了解调的难度. 因此, 研究光纤光栅的温度增敏技术, 改善光纤光栅反射波谱的温度敏感稳定性, 是光纤光栅温度传感器走向实用化的关键, 近年来对此进行了大量研究^[6~10]. 我们在光纤光栅温度增敏的研究中, 选用一种耐高温热膨胀系数较大的聚合物材料和收缩率均匀的偶联材料, 用特殊的封装工艺将光纤光栅镶嵌于聚合物中. 该工艺不仅有效地改善了反射波的波形, 为波长解调技术铺平

了道路, 还提高了光纤光栅的温度灵敏度, 推进了光纤光栅传感技术实用化的进程.

本文报道了一种新颖的改善反射波波谱并实现温度增敏的光纤光栅传感器及其测试结果.

1 光纤光栅温度增敏技术

1.1 光纤光栅温度传感原理

本文在保证应力不变时研究温度对光纤光栅的影响. 在光纤中写入光栅后, 当温度发生变化时, 引起光栅的周期和光栅反向耦合模的有效折射率调制而发生变化, 从而导致光纤光栅响应波长的移动, 通过检测波长移动量就可以得到被测温度.

光纤光栅仅与温度有关的 Bragg 方程为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \quad (1)$$

式中 $1/n_{\text{eff}} \cdot \partial n_{\text{eff}} / \partial T$ 代表光纤光栅热光系数, 用 ξ 表示; $1/\Lambda \cdot \partial \Lambda / \partial T$ 代表光纤的热膨胀系数, 用 α 表示. 因此式(1)可以写成

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

式中 $K_T = \xi + \alpha$ 是裸光纤光栅的温度灵敏度系数, 表示每单位温度所对应的反射波长漂移值. 石英的 $\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\xi \approx 6.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ^[11], 所以 K_T 的理论值为 $K_T \approx 7.35 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

对光纤光栅温度增敏是将光纤光栅封装于热膨胀系数较大的基底材料中时, 式(2)变为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (K_T + \eta' BK_\epsilon) \Delta T \quad (3)$$

光纤光栅的增敏系数为^[12]

$$\gamma = \frac{K_T + \eta' BK_\epsilon}{K_T} \quad (4)$$

式中 $K_T \approx 7.35 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 为光纤光栅波长的温度灵敏度系数, $K_\epsilon = 0.78 / \epsilon$ ^[13] 为光纤光栅的应力灵敏度系

* 国家“863”发展计划资助项目(2002AA313150); 国家自然科学基金资助项目(69877025); 国家教育部科学技术重点项目(02190); 陕西省教育厅科学技术项目(02JK158)和西安石油大学青年创新科技基金资助项目(40)
Tel: 029-88383050 Email: yolandemm@sohu.com
收稿日期: 2003-12-18

数,是与光纤泊松比、弹光系数和纤芯有效折射率有关的常数, B 为基底材料的热膨胀系数, η' 是材料与光栅偶联质量有关的常数。

1.2 一般的光纤光栅温度传感增敏技术

常规光纤光栅温度封装是选用热膨胀系数远远大于光纤纤芯的热膨胀系数的聚合物,将光纤光栅在模具中封装起来。当将封装后的光纤光栅置于温箱中时,光栅除了本身因热光系数变化和热膨胀导致反射波长漂移外,还将因为聚合物的热膨胀而带动栅距伸长,引起反射波长漂移量进一步增大,达到温度增敏的效果。

但由于热膨胀系数大的材料,固化过程中会产生收缩率不均匀,引起光纤光栅啁啾化从而使得光纤光栅反射波形啁啾,并且在测量的过程中,反射波形的啁啾度不断变化,导致波长变化规律不稳定,引起反射波长漂移量非线性变化。如何保证封装后光纤光栅栅距均匀变化,反射波长线性增大,达到温度增敏的效果,是封装技术要解决的关键问题。

1.3 特殊工艺改善光纤光栅反射波波形的温度封装技术

针对现有热膨胀系数大的材料固化过程中热收缩率不均匀导致光纤光栅反射波形啁啾化、重复性差、不适用于批量生产等温度封装难题。我们通过在光纤光栅位置上使用某种方法预涂覆某种特殊材料,这种材料要求具有均匀的收缩率、与光纤光栅和聚合物材料都有极好的偶联性。图 1 为改良后光纤光栅聚合物封装示意图。

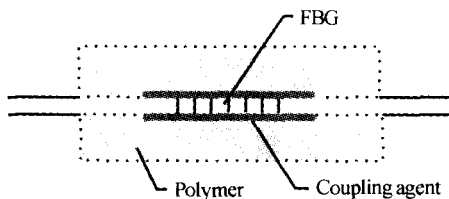


图 1 改良后光纤光栅聚合物封装结构
Fig. 1 Improved structure of polymer packaged FBG

该结构改善光纤光栅反射波波形的机理为:通过偶联剂分子一端通过化学键进入聚合物的大分子中,另一端与二氧化硅形成较强的硅氧键,在光纤光栅与基体之间形成有效界面层。起到桥接聚合物基体与光纤光栅和吸收能量的作用,有利于光纤光栅增韧增强作用。实验中使偶联剂在光纤光栅表面形成较厚层可形成柔性的缓冲区,有利于吸收聚合物材料不均匀收缩产生的应力,提高压缩和冲击性能,从而达到反射波形完全无啁啾的温度封装效果。如图 2。

由实验测试得出,无特种偶联材料过渡层的温度封装其温度增敏倍数为 11.03,但啁啾现象严重、每次封装的反射波形不同并且在实验过程中反射波

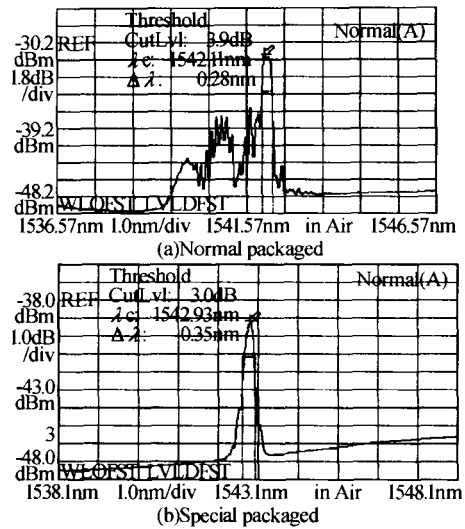


图 2 光纤光栅反射波谱
Fig. 2 Reflection spectrum of fiber Bragg grating

形不断变化,这为信号解调带来了极大的困难;经过特殊工艺封装的光纤光栅温度增敏倍数为 10.66,并且无啁啾、封装后反射波形重复性好、实验过程中反射波形几乎不变,这对光纤光栅传感器的实用化具有十分重要的意义。这一技术在目前光纤光栅温度增敏文献中尚未有报道。

2 实验

2.1 实验装置

实验装置如图 3。实验中使用的光纤光栅是用准分子激光器的紫外光在掺锗单模光纤上采用相位掩模板技术紫外侧写入的,中心波长为 1549.68 nm,带宽为 0.22 nm。用选定的 $-20^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内力学性能稳定、热膨胀系数 $B=10.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 的聚合物将光纤光栅在模具中封装起来(聚合物参数由生产厂家给出)。经过温度封装后,光纤光栅中心波长为 1542.93 nm,带宽为 0.35 nm。从宽带光源发出带宽 $\Delta\lambda=40 \text{ nm}$ 、功率 $P_0=10 \text{ mW}$ 的光通过 3 dB 耦合器入射到置于加热箱内的光纤光栅,经光纤光栅反射的光通过耦合器进入光谱分析仪(Anritsu MS9710C)。光谱仪的分辨率为 0.05 nm,域值取 3.0 dB,加热箱的温度由电子加热炉控制,温度由插在箱内紧贴着光栅的温度计读出。反射的 Bragg 波长 λ_B 随温度每变化 10°C 记录一个 λ_c 作为对反射中心波长检测。

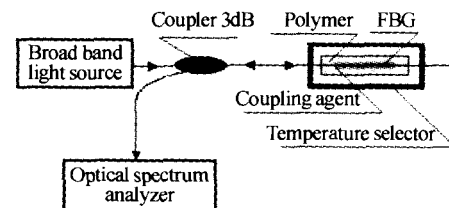


图 3 光纤光栅温度传感实验装置
Fig. 3 Schematic diagram for fiber grating temperature sensing

2.2 实验结果

实验在 30.6℃~120℃ 范围内对经过特殊工艺封装后光纤光栅反射波中心波长的温度响应进行了反复测试. 实验中, 基准温度 $T_0 = 30.6^\circ\text{C}$, 与其对应的基准反射波中心波长 $\lambda_{B_0} = 1542.93 \text{ nm}$, $\Delta T = T - T_0$, $\Delta\lambda_B = \lambda_B - \lambda_{B_0}$. 图 4 是封装后反射中心波长相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与温度改变量 ΔT 的实验曲线, 其中点线为实验值, 光滑直线为实验点的拟合曲线.

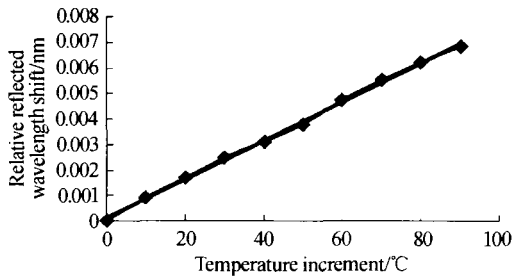


图 4 反射波长相对漂移与温度改变量实验曲线

Fig. 4 Experimental curves of relative reflected wavelength shift versus temperature increment

裸光纤光栅的温度灵敏度系数 $K_T = 7.35 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 聚合物封装光纤光栅的平均温度灵敏度系数 $K'_T = 7.6 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 增加了 10.34 倍与根据式(4)粘贴质量参数 η' 取 0.9 时计算出的理论温度灵敏度增敏倍数 10.76 符合得比较好; 裸光纤光栅温度灵敏度为 0.011 nm/°C, 聚合物封装光纤光栅温度灵敏度为 0.1173 nm/°C, 增加了 10.66 倍; 基于实验中使用光谱分析仪 0.05 nm 的分辨率, 可以确定能够测到 $< 0.43^\circ\text{C}$ 的温度变化. 温度从 30.6℃ 上升到 120℃ 时, 聚合物封装光纤光栅的温度响应曲线具有很好的线性, 线性度为 0.9983.

由实验数据得出特殊工艺温度封装与常规工艺温度封装光纤光栅增敏倍数并无大的差别, 都是以聚合物封装材料有关参数为准. 而且本工艺封装的光纤光栅无啁啾、反射波形重复性好、线性度高、实验过程中反射波形几乎不变, 如图 5.

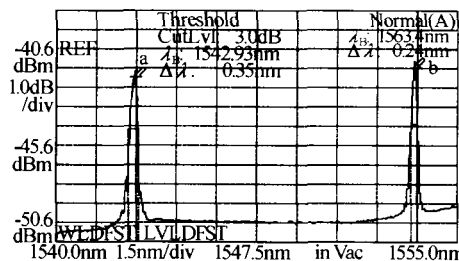


图 5 光纤光栅反射谱图: 30.6℃ (a) 和 120℃ (b)

Fig. 5 Reflection spectrum of fiber Bragg grating at 30.6°C (a) and 120°C (b)

3 结论

常规温度封装工艺由于热膨胀系数大的聚合物材料其热收缩率不均匀导致光纤光栅啁啾化, 这一

现象给波长解调带来了极大的困难. 本文介绍了一种特殊的封装工艺, 将光纤光栅用具有很好的线性温度响应特性、热膨胀系数较大聚合物和偶联材料封装光纤光栅进行封装, 完全解决了这一问题, 并使光纤光栅的温度传感封装工艺的重复性得到了很大程度上的改进. 实验得出聚合物封装光纤光栅的平均温度灵敏度系数 $K'_T = 76 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 温度灵敏度为 0.1173 nm/°C, 增加了 10.66 倍; 基于光谱分析仪 0.05 nm 的分辨率, 可以测到 $< 0.43^\circ\text{C}$ 的温度变化. 寻找热膨胀系数更大, 温变性质稳定的聚合材料, 能够与聚合物、光纤偶联紧密的过渡层材料, 是提高光纤光栅封装元件温度灵敏度和质量的关键, 而良好的封装技术则是扩大光纤光栅的使用范围, 保证其实用化的必要条件.

参考文献

- 1 Aferreira L, Santos J L, Farahi F. Simultaneous measurement of strain and temperature using interferometrically interrogated fiber Bragg grating sensors. *Opt Eng*, 2000, **39**(8): 2226~2233
- 2 乔学光, 李育林. 采用 FBG/LPFG 组合传感器实现油气井下温度、压力同时区分测量. *光电子·激光*, 1999, **10**(1): 42~45
Qiao X G, Li Y L. *J Optoelectronics · Laser*, 1999, **10**(1): 42~45
- 3 孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤光栅温度和应力同时区分测量传感技术研究. *光电子·激光*, 2003, **14**(2): 210~214
Sun A, Qiao X G, Jia Z A, et al. *J Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(2): 210~214
- 4 刘云启, 郭转运, 刘治国, 等. 光纤光栅的压力传感特性研究. *光子学报*, 1999, **28**(5): 433~445
Liu Y Q, Guo Z Y, Liu Z G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 433~445
- 5 Guan Bao'ou, Guo Zhuangyun, Liu Zhiguo, et al. Temperature sensitivity enhancing experiment of fiber Bragg gratings. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(1): 65~67
- 6 Du Weichong, Tam H Y, Demokan M S, et al. A simple method to enhance temperature sensitivity of fiber grating. *Chinese J Lasers*, 1997, **24**(1): 75~77
- 7 Reid M B, Özcan M. Temperature dependence of fiber optic Bragg gratings at low temperature. *Opt Eng*, 1998, **37**(1): 237~240
- 8 Gupta S, Mizunami T, Yamao T, et al. Fiber Bragg grating gryogetic temperature sensors. *Appl Opt*, 1996, **35**(25): 5202~5205
- 9 Lin Gangchih, Wang Likarn, Yang C C, et al. Thermal performance of metal - clad fiber Bragg grating sensors. *IEEE Photon Tech Lett*, 1998, **10**(3): 406~408

- 10 Cruz J L, Dong L, Reekie L. Improved thermal sensitivity of fiber Bragg grating using a polymer overlayer. *Electron Lett*, 1996, **32**(4):386~388
- 11 廖延彪 光纤光学. 北京:清华大学出版社 2000,197~216
- Liao Y B. Fiber Optics. Beijing: Qing Hua University press,2000,197~216
- 12 杜卫冲,谭华耀,戴务勤,等. 一种简单的增强光纤 Bragg 光栅温度灵敏度的方法. 中国激光,1997, **24**(1):75~77
- Du W C, Tan H Y, Dai W Q, et al. *Chinese J of Lasers*, 1997, **24**(1):75~77
- 13 Xu M G, Reekie L, Chow Y T, et al. Optical in-fiber grating high pressure sensor. *Electron Lett*, 1993, **29**(4):398~399)

A Novel Technique of Temperature Sensitivity Enhancement and Reflection Spectrum Improvement of Fiber Bragg Gratings

Wei Ting^{1,2}, Qiao Xueguang^{1,2}, Jia Zhenan², Wang Hongliang², Fu Haiwei²

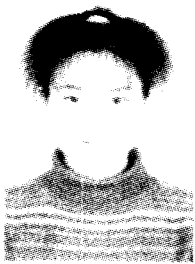
1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065

Received date:2003-12-18

Abstract A novel fiber grating temperature sensing technique and its experimental result is reported, which eliminates the chirped effects of polymer-packaged, improves the reflection spectrum of FBG and the technique of repeated packaged by using a kind of polymer-packaged with biggish thermal expansion coefficient and a special coupling agent. The experimental result indicates that, within 30.6°C~120°C, the temperature sensitivity is 0.1173 nm/°C and the resolution temperature measurement is <0.43°C, which are 11 times higher than that of the bare FBG and the most important advantage is that the reflection spectrum remains same in the whole test. The average temperature sensitivity multiple of polymer-packaged fiber Bragg gratings is $\gamma' = 10.34$, which matches the theoretical multiple $\gamma = 10.76$ well. The linearity of the temperature response curves is 0.9983.

Keywords ptic fiber sensing; Fiber Bragg gratings(FBG); Packaged technology; Temperature sensing; Temperature sensitivity enhancement



Wei Ting received bachelor degree in physics from Shaanxi Normal University in 1998 and obtained master degree in optical engineering from Xidian University in 2004. Now she is working as an instructor in Xi'an Shiyou University and studying for her doctor's degree. And she also works for Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, majoring in fiber sensors and optical communication.