

文章编号: 0253-2239(2004)10-1316-4

# 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器 及其低温特性\*

何 伟 徐先东 姜德生

(武汉理工大学光纤传感技术研究中心, 武汉 430070)

**摘要:** 介绍了一种新型的光纤光栅温度传感器。这种光纤光栅温度传感器使用了特殊的工艺将光纤布拉格光栅封装于一种热膨胀系数较大的有机聚合物基底中,使得传感器的温度灵敏性比裸光纤光栅提高了 12.3 倍,其温度灵敏度系数  $K_T$  达到  $82.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。在  $-80 \sim 0$   $^\circ\text{C}$  的低温度范围内,对这种新型光纤光栅温度传感器的反射谱进行了测量。研究了这种新型光纤光栅温度传感器的低温特性,并与裸光纤光栅和铝基封装的光纤光栅进行了比较,结果表明这种新型的光纤光栅温度传感器具有很好的低温响应特性。

**关键词:** 光纤光学; 光纤传感; 光纤光栅; 传感器; 温度; 封装

中图分类号: TP212.14; TN253 文献标识码: A

## High-Sensitivity Fiber Bragg Grating Temperature Sensor with Polymer Jacket and Its Low-Temperature Characteristic

He Wei Xu Xiandong Jiang Desheng

(Fiber Optic Sensing Technology Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

(Received 2 June 2003; revised 6 January 2004)

**Abstract:** A new fiber Bragg grating temperature sensor has been presented, which was made by fixing a fiber Bragg grating on a polymer substrate that has a large thermal expansion coefficient. The temperature sensitivity of this new fiber Bragg grating temperature sensor is about  $82.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , which is 12.3 times of that of a nude fiber Bragg grating. The wavelengths of the light reflected from the fiber Bragg gratings were measured in the temperature range from  $-80$  to  $0$   $^\circ\text{C}$ . The low temperature characteristic of this new fiber Bragg grating temperature sensor was experimentally studied, and compared with that of a nude fiber Bragg grating and an Al substrate fiber Bragg grating. The temperature response characteristic of this new fiber Bragg grating temperature sensor is good.

**Key words:** fiber optics; fiber optic sensing; fiber Bragg grating; sensors; temperature; encapsulation

## 1 引 言

光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为一种新型的光纤内无源器件,因其具有抗干扰性强、耐腐蚀、体积小、重量轻、寿命长、无连接损耗、可实现多

点分布式测量等优良特性,在光传感领域具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>。光纤光栅可用于温度传感<sup>[3~5]</sup>,在现代工业生产中具有重要的应用价值,但裸光纤光栅对温度的敏感性较差,波长 1550 nm 裸光纤光栅的温度敏感性约为  $0.0082 \sim 0.012$  nm/ $^\circ\text{C}$ <sup>[6]</sup>,温度灵敏度系数  $K_T$  为  $6.72 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>,因此需要设法提高光纤光栅的温度灵敏度。1995 年,Inoue 等<sup>[8]</sup>首先将光纤光栅粘贴在铝片上进行温敏实验,增敏效果不显著。在我国北方,冬季外界气温一般都在

\* 国家自然科学基金(50179029)、国家 863 计划(2002AA313140)资助课题。

E-mail: weihe@mail.whut.edu.cn

收稿日期:2003-06-02;收到修改稿日期:2004-01-06

0 °C 以下,东北地区可能会达到 -30 °C 以下,在强磁场作用的超导装置和宇宙飞船低温液态氢-氧燃料的控制领域,都对低温光纤光栅温度传感器提出了潜在的需求。目前对低温下光纤光栅的温敏性的研究较少,一般研究温度范围为 20~100 °C,据我们所知,文献报道的最低研究温度为 -20 °C<sup>[9]</sup>。

本文采用一种新颖的封装技术,将光纤光栅封装于一种有机聚合物基底中,利用基底的带动作用,将光纤光栅温度传感器的温度灵敏性提高了 12.3 倍,温度灵敏度系数  $K_T$  达到  $82.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。在 -80 ~ 0 °C 的温度范围内,光纤光栅的布拉格波长随环境温度的变化呈良好的线形关系。

## 2 原 理

由耦合模理论可知,均匀周期光纤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,反射峰中心波长(布拉格波长)满足<sup>[1]</sup>

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

(1) 式中  $n_{\text{eff}}$  为导模的有效折射率, $\Lambda$  为光栅条纹周期。峰值反射率为

$$R_B(L) = \tanh^2(KL), \quad (2)$$

(2) 式中  $L$  为光纤光栅的长度, $K$  为基模横向耦合系数。

由(1)式可知,布拉格波长是随  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  而改变的。当光栅所处的外界环境温度发生变化时,可导致光纤光栅本身的温度发生变化。由于光纤材料的热光效应,光纤的折射率会发生变化;由于光纤材料的热胀冷缩效应,光栅的条纹周期也会发生变化,从而引起  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  的变化,最终导致光栅布拉格波长  $\lambda_B$  的漂移。漂移的幅度与温度的改变量呈线性关系:

$$\Delta\lambda_T = (\alpha + \zeta)\Delta T\lambda_B, \quad (3)$$

(3) 式中, $\Delta\lambda_T$  表示温度变化引起的  $\lambda_B$  的漂移幅度, $\alpha = (1/\Lambda)(\Delta\Lambda/T)$  为光纤材料的热膨胀系数, $\zeta = (1/n_{\text{eff}})(\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$  为光纤材料的热光系数, $\Delta T$  为温度的变化量。对于石英光纤, $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , $\zeta \approx 6.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

当光纤光栅被粘贴于基底材料中时,基底材料的形变和热膨胀通过应力对光纤光栅作用,使其布拉格波长发生移动。若用  $\alpha_s$  表示基底材料的热膨胀系数,则此时光纤光栅的温度响应可表示为<sup>[10]</sup>

$$K_T = \frac{d\lambda_B/dT}{\lambda_B} = \alpha + \zeta + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha), \quad (4)$$

(4) 式中  $K_T$  为温度灵敏度系数,一般情况下裸光纤光栅的  $K_T = 6.72 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ;  $P_e = (n_{\text{eff}}^2/2)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$  为光纤的有效弹光系数,其中  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光纤弹光系数, $\nu$  为泊松比,对于一般石英光纤, $P_e \approx 0.22$ 。本文所选有机聚合物基底材料的热膨胀系数远大于光纤材料本身的热膨胀系数,即满足  $\alpha_s \gg \alpha$ ,因此(4)式可简化为

$$K_T = \zeta + (1 - P_e)\alpha_s, \quad (5)$$

则温度灵敏系数  $K_T$  是一个仅与基底材料热膨胀特性有关的常数。我们选用新型有机聚合物作基底材料,热膨胀系数为  $100 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,理论计算得  $K_T = 84.81 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,是裸光纤光栅的 12.6 倍。

## 3 实 验

采用德国 Lambda 的 COMPEX 150T 准分子激光器所发的波长 248 nm 紫外光,通过相位掩膜板在普通掺锗单模光纤中写入布拉格光栅。为提高光纤的光敏性,将光纤置于 120 atm 的氢气高压容器中,在常温下渗氢(载氢)一周。光纤光栅的反射带宽约为 0.4 nm,光栅长度约 8 mm。

目前光纤光栅普通封装所用材料主份为环氧树脂,它是由环氧树脂、固化剂、填充剂及其助剂混配的高分子材料,热稳定性、密着性好,粘合力高,但收缩力、热膨胀系数小,对光栅只能起到保护的作用,没有改性的作用,不能满足光纤光栅温度传感器高灵敏性的要求。

所选用的封装材料为一种有机聚合物,其热膨胀系数较大, $\alpha = 100 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,热稳定性高。用此有机聚合物封装后,光纤光栅布拉格波长向短波方向漂移了 0.425 nm。实验表明,在封装过程中,对光纤光栅施加适当的预应力,可使因封装产生的波长漂移进一步减少。温敏光纤光栅封装结构如图 1 所示。用 353ND 双组分环氧树脂,将光纤光栅粘贴在单层和双层有机聚合物做的基底上,结构尺寸 40 mm × 12 mm × 3.5 mm (×2)。为增加粘贴强度,用砂纸将聚合物粘贴表面打磨粗糙,粘贴前用化学试剂进行表面处理。为进行对比,我们也用铝基底对光纤光栅进行了封装,封装元件结构的尺寸和有机聚合物封装相同。

图 2 为光纤光栅温敏性试验装置原理图。光源为 1310 nm 的发光二极管(LED);光纤光栅敏感元件置于温控箱中,其布拉格波长漂移用日本安藤公司的 AQ6317B 型光纤光谱仪进行测量,光谱仪的

波长分辨力为0.01 nm, 波长精确度为±0.05 nm; 3 dB耦合器一端将 LED 发出的光耦合进入光纤光栅, 另一端将光纤光栅反射回来的光耦合进光谱仪以便检测。采用美国 Harris 公司的 38257H01 型低温控制设备进行温度控制, 工作电压220 V, 电流

7.5 A, 频率50 Hz。改变温控箱的温度, 得到光纤光栅敏感元件的布拉格波长变化与温度变化之间的关系曲线。同时, 还测量了裸光纤光栅、铝基封装光纤光栅的温度响应曲线, 并与有机聚合物封装光纤光栅敏感元件的温度相应进行比较。

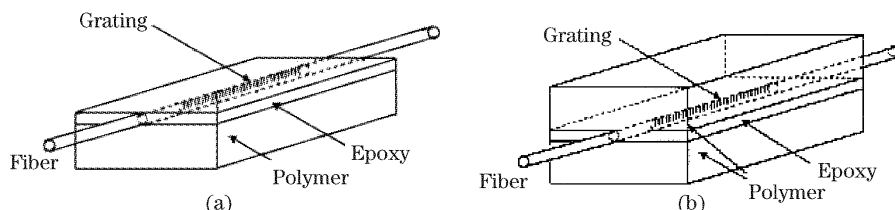


Fig. 1 Structure of the sensing elements of the FBG temperature sensors. (a) Single substrate, (b) double substrates

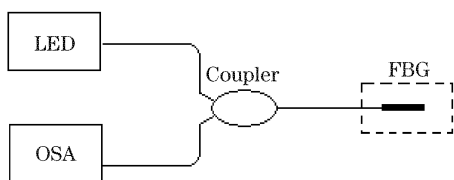


Fig. 2 Schematic diagram of measurement temperature sensitivity

实验中, 将0 °C作为温度起点, 控制恒温箱的温度, 使箱内温度逐渐降低, 温度每降低5 °C, 使其保持恒定, 通过光谱分析仪对光栅反射谱进行测量, 温度变化范围从0~ -80 °C, 再从-80~0 °C的。经多次测试, 封装元件没有出现老化开裂、封装

裂纹、空洞、离层等缺陷。结果表明, 该聚合物具有良好的温度稳定性及变化重复性, 与光纤相容性较好。图3为聚合物封装的光纤光栅温度传感器在0 °C [图3(a)]和-80 °C [图3(b)]时的反射谱。在0 °C时, 光纤光栅布拉格波长为1303.964 nm, 在-80 °C时, 为1295.324 nm, 布拉格波长漂移了8.64 nm。在温控箱升温 and 降温过程中, 反射峰值有变化, 当温度从0 °C变化到-80 °C时, 信号电平从-50.66 dBm 降低到 -55.28 dBm, 降低了4.38 dBm, 这可能是由于在-80 °C低温下材料收缩引起的内部应变不均匀所造成的微弯损耗。

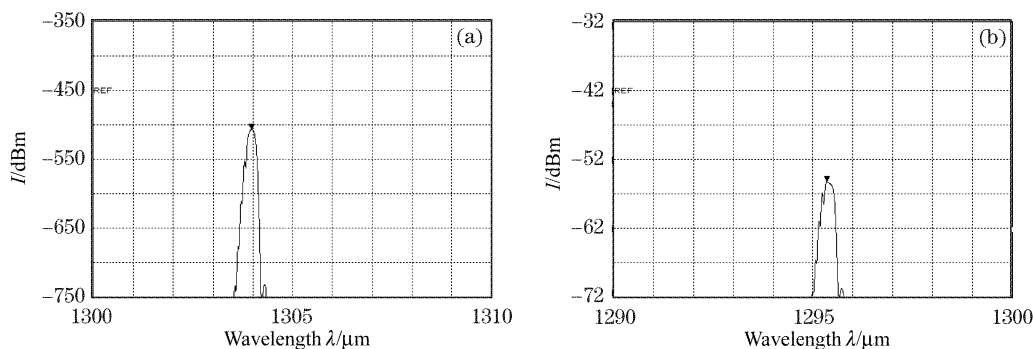


Fig. 3 Reflection spectra of the fiber-Bragg-grating with dual-layers polymer jacket temperature sensor at 0 °C (a), -80 °C (b)

在一80~0 °C的温度范围内, 测得裸光纤光栅、铝基封装光纤光栅、有机聚合物封装光纤光栅温度传感器的温度响应曲线如图4所示。由图4可知, 在一80~0 °C的温度范围内, 裸光纤光栅的布拉格波长仅变化了0.726 nm, 粘贴在铝基上光纤光栅的布拉格波长变化了2.639 nm, 而有机聚合物封装的

光纤光栅则具有较高的温敏特性, 双层聚合物封装的光纤光栅布拉格波长变化了8.64 nm, 而单层聚合物封装的光纤光栅布拉格波长变化了8.21 nm。由数据拟合得到双层聚合物封装的光纤光栅温度灵敏度为  $82.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 与理论分析结果基本相符。

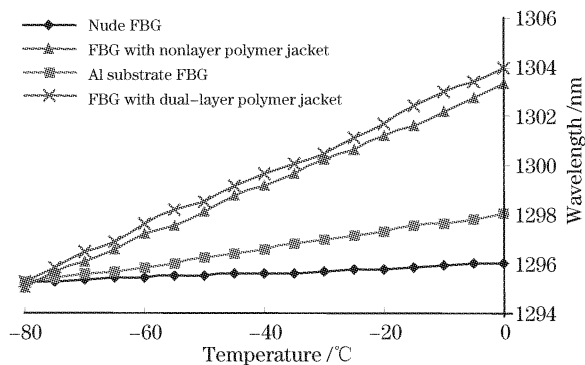


Fig. 4 Temperature response of FBG temperature sensor

## 4 讨 论

采用这种简单新颖的封装材料和技术,将光纤光栅封装于有机聚合物双层基底中,光纤光栅温度传感器温度灵敏度达到  $82.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,为相应裸光纤光栅的 12.3 倍,略低于理论分析值  $84.81 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。理论值和实验值之间的这种差异,主要原因是由于光纤光栅较聚合物质地更硬,二者之间是非刚性连接,热膨胀不同步。

用新的封装材料和封装技术制作的光纤光栅温度传感器在  $-80 \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  的温度范围内具有很好的温度响应特性。光栅的布拉格反射峰值在  $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$  低温时有大约 4.38 dB 的损耗,这可能是由于材料收缩引起的内部应变不均匀造成的微弯损耗,但由于光纤光栅的传感信号为光栅布拉格波长编码,光强的变化不会影响测量结果,因此用这种新方法制作的光纤光栅温度传感器完全可以应用于的低温的测量。

为了提高传感器温度灵敏度,可以适当扩大光纤光栅传感器的封装基底结构尺寸,用双基底封装比用单基底封装的光纤光栅传感器其灵敏度可提高 5%。然而光纤光栅温度传感器的响应时间取决于封装基底材料的热容量,基底结构尺寸越大,传感器的响应时间越长,为得到较高的传感响应速度,应适当缩小基底结构尺寸。因此在光纤光栅温度传感器的制作过程中必须针对具体的应用要求来决定封装基底地结构尺寸的大小。

在制作光纤光栅温度传感器敏感元件时,要特别注意光纤光栅、基底材料、环氧树脂粘接剂三者之间的紧密接触,否则可能出现下列情况:当光纤光栅温度传感器应用于较高温度时,光纤光栅脱离基底材料;光纤光栅仅有部分固定在基底,发生弯曲,会导致布拉格波长漂移量减小;光纤光栅粘接时与基底间有空隙,则温度灵敏度会降低,接近于裸光纤光栅。

**结论** 光纤光栅本身温敏性很差,满足不了许多温度测量应用的要求。为改变其温敏特性,我们采用一种新型有机聚合物对其进行封装处理,研制了一种高灵敏度光纤光栅温度传感器,其温度灵敏度系数为  $82.69 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,是相应裸光纤光栅的 12.3 倍。我们对此新型的温度传感器进行了低温测试实验,测试温度范围为  $-80 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,并且同裸光纤光栅和铝基封装的光纤光栅进行了实验比较,表明新型的光纤光栅温度传感器具有很好的温度响应特性。新型光纤光栅传感器的反射峰值在  $-80 \text{ } ^\circ\text{C}$  时有 4.38 dB 的衰减,这可能是由于低温下材料收缩引起的内部应变不均匀所造成的微弯损耗,但这并不影响光纤光栅传感器对温度的测量,因此这种新型的光纤光栅温度传感器完全可以用于低温测量。

## 参 考 文 献

- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2002, **13**(4): 420~430 (in Chinese)
- Tang Wei, Shi Yikai. Optical fiber Bragg grating sensing technology. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(1): 79~83 (in Chinese)
- Wang Muguang, Wei Huai, Li Tangjun *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 867~869 (in Chinese)
- Guan Baiou, Tam H Y, Ho S L *et al.*. Study on strain/temperature two parameters sensing with a single fiber Bragg grating. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(4): 372~374 (in Chinese)
- Jiang Desheng, Li Jianzhi, Mei Jiachun. Temperature sensing properties of multimode fiber grating. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(2): 175~178 (in Chinese)
- Toru Mizunami, Hiroaki Tatehata, Hideo Kawashima. High-sensitivity cryogenic fiber-Bragg-grating temperature sensors using Teflon substrates. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**: 914~917
- Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-tube housing. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2): 128~129
- Inoue A, Shigehara M, Ito M *et al.*. Fabrication and application of fiber Bragg grating—a review. *Optoelectron. Dev. Technol.*, 1995, **10**: 30~119
- Zhang Liang, Zhuo Zhongchang, Wei Zhanxiong *et al.*. Temperature-compensating Package for Fiber Bragg grating. *J. Jilin University* (吉林大学学报), 2002, (7): 294~295 (in Chinese)
- Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(6): 564~566