

文章编号: 1002-2082(2006)03-0228-04

一种测量温度和流速的光纤光栅传感器

禹大宽, 乔学光, 贾振安, 王 敏

(西安石油大学 光纤传感实验室, 西安 710065)

摘 要: 提出一种基于铝片的测量温度和流速的光纤布喇格光栅(FBG)传感器。采用一种耐高温胶将光纤布喇格光栅封装在一小铝片上, 经过高温固化处理, 可保持光纤光栅传感器的稳定性。通过 $-20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度实验, 得到该传感器的温度灵敏度系数为 $0.0392 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, 是封装前的 3.5 倍, 且传感器温度响应保持了很好的线性和重复性。从水温 14.5°C 时的流速实验中得到水流速在 $0 \sim 20 \text{ m/s}$ 范围变化时, FBG 峰值波长漂移了 0.13 nm , 验证了此光纤光栅传感器测量流速的可行性。试验结果表明, 该传感器既可以作为温度传感器, 又可以作为流量传感器, 并且制作简单, 成本较低。

关键词: 光纤布喇格光栅; 传感器; 铝封装; 温度传感; 流速传感

中图分类号: TN253; TP212.11

文献标志码: A

Fiber Bragg grating sensor for detecting temperature and flow-velocity

YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, WANG Min

(Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: A novel aluminum plate based fiber Bragg grating (FBG) sensor is proposed to detect temperature and flow-velocity. Fiber Bragg grating (FBG) was sealed on an aluminum plate by a high-temperature-resistant glue, then placed in a thermostat for solidification so as to retain the stability of FBG. The temperature and flow-velocity sensing characteristics of the encapsulated FBG sensor were theoretically and experimentally studied. Encapsulated FBG sensor was placed in a digital thermostat to detect its temperature characteristics. In the temperature range of $-20^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$, the experiment result indicates that the temperature sensing sensitivity coefficient of encapsulated FBG sensor is $0.0392 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ and is 3.5 times as much as that of bare FBG. The temperature response curve of the encapsulated FBG sensor keeps very good linearity and repetition. In the flow-velocity experiment, the reflection peak-wavelength of the encapsulated FBG sensor moved 0.13 nm when the flow-velocity changed from 0 to 20 m/s with constant water temperature at 14.5°C . So it is feasible to use the encapsulated FBG sensor to detect the flow-velocity. The result proves that the aluminum plate encapsulated FBG sensor can detect temperature and flow-velocity. The encapsulated FBG sensor is easy to make, cost effective and practical.

Key words: fiber Bragg grating; sensor; aluminum encapsulation; temperature sensing; flow-velocity sensing

收稿日期: 2005-09-03; 修回日期: 2005-11-24

基金项目: 国家高技术 863 研究发展计划项目(2002AA313150); 国家自然科学基金资助项目(60177028); 陕西省科技攻关项目(2003K05-G23); 陕西省教育厅项目(02JK158)

作者简介: 禹大宽(1980—), 男, 河南驻马店人, 西安石油大学电子工程学院硕士研究生, 主要从事光纤传感及光纤通信技术研究。E-mail: yudakuan04@163.com

引言

光纤光栅作为一种新型光纤无源器件,因其具有抗电磁干扰性强,耐腐蚀,重量轻,无连接损耗,可实现多点准分布式测量^[1]等优点,国内外的研究者对其进行了深入地研究,使光纤光栅在光传感领域的应用越来越广泛。由于光纤布喇格光栅(FBG)同时对温度和应变敏感,因此利用FBG可以对温度、应变进行单独测量或同时测量^[2-4]。近几年来,随着对光纤光栅的进一步深入研究,国内外已出现利用光纤光栅实现对液位、位移、变形、流速等物理量的测量^[5-7],使光纤光栅的实际应用领域越来越广泛。

本文提出一种基于铝片封装的光纤布喇格光栅温度和流速的测量方案。原理是将光纤光栅用胶粘贴在长方形的薄铝片上,然后高温固化。首先把封装好的FBG传感器放在数字温控箱里做温度实验,然后将封装的FBG传感器安装在水管上做流速实验,这样可对温度和流速分别进行测量。通过实验可发现,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,铝封装的光纤光栅传感器温度灵敏度系数为 $0.0392\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,且保持较好的线性和重复性;在水温 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,利用该传感器对水速进行测量,当水速从0变化到最大流速 20 m/s 时传感器波长漂移了 0.13 nm ,实现了温度和流速的单独测量。

1 基本原理

1.1 FBG 温度、应变响应原理

由耦合模理论可知,光纤光栅(FBG)的中心波长为

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

式中, n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率; Λ 是光栅周期(栅距)。当光纤光栅受到外力作用或环境温度变化时,弹光效应、热光效应、热膨胀、形变等作用可引起光栅波长变化。应变和外界温度引起的光栅波长漂移为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1-P_e)\epsilon + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (2)$$

式中, ϵ 为光纤光栅的轴向应变; ΔT 为温度变化量; P_e 为有效弹光系数; ξ 和 α 分别为光纤光栅的热光系数和热膨胀系数。对于纯石英光纤,通常有 $P_e = 0.22$, $\alpha = 0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $\xi = 6.67 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ^[8]。当FBG粘贴在基底材料上时,基底材料的变形和热膨胀都会传递到FBG上,使Bragg波长发生漂移。若用 α_{sub} 表示基底材料的热膨胀系

数,则Bragg波长的偏移量与温度和应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_e)\epsilon + [(\xi + \alpha) + (1-P_e) \times (\alpha_{\text{sub}} - \alpha)]\Delta T \quad (3)$$

1.2 光纤光栅传感器的封装结构

光纤Bragg光栅的封装结构如图1所示。用耐 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度的胶将光纤光栅粘贴在长 15 mm ,宽 4.2 mm ,厚 0.5 mm 的长方形铝片上。粘贴光栅时,使光栅平直并处在长方形铝片的中轴线上。粘贴之前,先使胶预热并在真空阀中抽真空,保证胶的流动性,并减少固化过程中形成气泡的可能性,使粘贴后的光栅反射谱与裸光栅的反射谱波形保持一致,可避免光栅封装过程中胶涂敷不均匀造成的光栅反射谱波形(近似高斯分布)失真产生啁啾化。啁啾是由于光栅的栅距间隔不等形成的。把经过预热并抽真空处理的胶均匀涂敷在光栅和铝片上,然后将光纤光栅传感器放入数字温度控制箱内高温固化,保证光纤光栅与铝片粘接紧密。

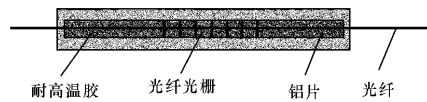


图1 光纤Bragg光栅铝片传感器封装示意图

Fig.1 Sketch of aluminum plate encapsulation for FBG sensor

1.3 温度、流速测量装置

图2为温度实验装置示意图。铝片封装的光纤光栅传感器放入灵敏度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数字温控箱中,从宽带光源发出的光(图2中箭头所示)经过 3 dB 耦合器入射到数字温控箱中的光纤光栅传感器上。光纤光栅反射的光则经过 3 dB 耦合器进入

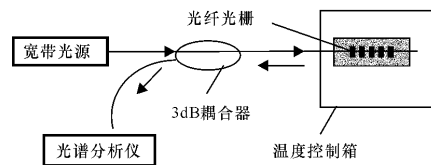


图2 温度传感实验原理图

Fig.2 Schematic diagram of FBG temperature sensing experiment

光谱分析仪,通过光谱分析仪可观察光纤光栅反射峰峰值、中心波长等随温度的变化。光纤光栅是使用准分子激光器的紫外光在掺锗单模石英光纤上采用相位掩模板写入的。宽带光源使用C波段掺铒光源,带宽 40 nm 左右。光谱仪的分辨率为 0.05

nm,可直接读取不同温度下的FBG峰值波长。

图3为流量测量装置示意图。铝封装的光纤光栅传感器安装在管径为20 mm的水管中。管道中不同流速的水作用在传感器上引起铝片发生形变,铝片的形变又带动光纤光栅波长变化,最后通过光谱仪可检测出波长的变化。由于裸光栅的应变灵敏度很低,约为 $0.00012\text{ nm}/\mu\epsilon$,测量流速时就要使传感器的尺寸变薄,而且必须使光纤光栅同时对温度和应变敏感^[9],所以要有一定的温度补偿措施。本文使用2个光栅:一个测量流速不同时水的冲击力引起的光纤光栅应变漂移,另一个测量温度引起的波长漂移;或者是在测出封装的铝传感器温度波长响应曲线的基础上,先测量出液体的温度,然后在测量流速时,对流速引起的应变进行补偿。

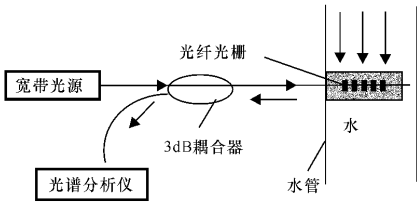


图3 流速测量实验装置图

Fig.3 Experimental set-up of detection for flow velocity

2 实验结果及分析

将封装前的裸光栅在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内进行温度实验,测出其升、降温的温度灵敏系数分别为 $0.0101\text{ nm}/\text{C}$ 和 $0.0104\text{ nm}/\text{C}$,与理论计算出的裸光栅温度灵敏系数相差很小,并且波长和温度有很好的线性关系,线性拟合度超过0.999。将铝封装的光纤光栅传感器利用图2的实验装置进行温度实验,得到在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内其峰值波长随温度的变化关系如图4所示,用回归分析法对测得的实验数据进行数据拟合,得到的升降温度灵敏度系数分别为 $0.0392\text{ nm}/\text{C}$ 和 $0.0393\text{ nm}/\text{C}$,线性拟合度达到0.999。经过多次实验,证明该温度传感器具有很好的重复性和稳定性。在温度传感实验中,由于铝的热膨胀系数为 23×10^{-6} ,比光纤光栅的热膨胀系数 0.55×10^{-6} 大许多,因此在温度变化过程中,铝的热胀冷缩作用使光纤光栅传感器的灵敏度得到提高。在应变为零时由公式(3)得到铝封装的光纤光栅的温度灵敏系数为 $0.0385\text{ nm}/\text{C}$,是理论计算封装前的3.44倍,实际测量的温度灵敏系数是封装前的3.5倍。实验证明,

理论与实验结果符合得很好。

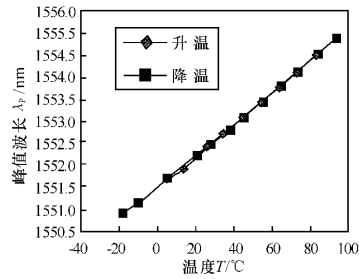


图4 光纤光栅传感器温度响应曲线

Fig.4 Temperature response curves of FBG sensor

将传感器按图3实验装置连接到水管中,流速大小由水龙头阀门开关控制。流体流动时冲击铝封装的光栅传感器,传感器受到的合力作用为^[10]

$$F = k\rho v^2 A / 2 \tag{4}$$

式中, F 为铝片受到的力; A 为铝的迎流面积; v 为铝片上的液体平均流速; ρ 为液体密度; k 为阻力系数。通过测量铝片变化引起的光栅波长漂移可反推出流速的大小。理论分析可知,水速作用在传感器上,将引起光栅波长向长波方向漂移。在水温 $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,流速为0时,光栅的峰值波长为 1552.45 nm ,如图5(a)中箭头所示。打开阀门,通过阀门控

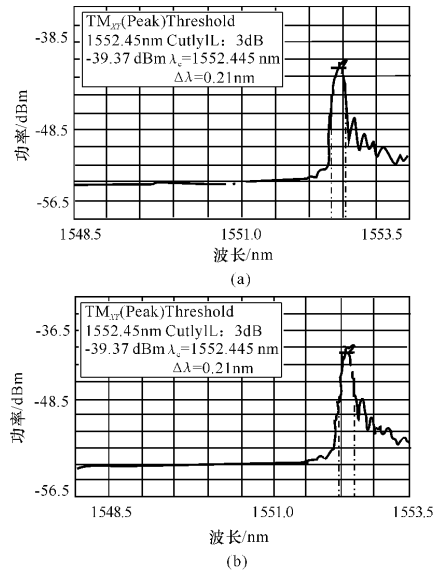


图5 封装的传感器在流速为0(a)和最大时(b)的反射谱

Fig.5 Reflection spectrum of FBG sensor encapsulated by aluminum plate when flow-velocity =0(a)and flow-velocity = max. (b)

制流速大小,当流速为 20 m/s 时峰值波长为 1 552.57 nm,光谱图如图 5(b)所示。图 5 中箭头代表此时的峰值波长。流速再增大将引起光栅反射波长展宽,影响波长的检测,所以测量时流速大小有限制,实验得到此传感器的最大流速为 20 m/s。实验证明了利用该传感器测量流量的可行性。由于此传感器的应变灵敏度较低,因此,如何提高它的应变灵敏度还有待进一步的研究。

3 结论

通过实验可以发现,我们制作的铝片封装的光纤光栅传感器既可以作为温度传感器,又可以作为流量传感器。作为温度传感器时将使光栅温度灵敏度系数提高到原来的 3.5 倍,且能满足大范围温度测量的需要。作为流速传感器时可与光纤光栅温度和压力传感器等一起构成测量装置,对多个物理参量进行测量,实现光纤光栅多参量实时准分布测量。因此,该传感器在油气管线、井下油气测量等领域有良好的应用前景。

参考文献:

[1] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, 9(2): 57-79.

- [2] 胡曙阳,赵启大,张宁,等.一种高灵敏度光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. *光电子·激光*, 2004, 5(2): 147-149.
- [3] 刘丽辉,张伟刚,郭宏雷,等.光纤布拉格光栅压力增敏的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(10): 1266-1268.
- [4] 陈长勇,乔学光,贾振安,等.一种新颖的光纤光栅应变与温度双参量传感器[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(8): 787-790.
- [5] 李志全,蔡璐璐,高庆,等.基于光纤 Bragg 光栅位移测量的研究[J]. *应用光学*, 2004, 25(6): 26-30.
- [6] 钱晋武,孙流川,沈林勇,等.非开挖地下管线探测中的弯曲变形检测装置研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2): 179-184.
- [7] SHOICHI T, HIROSHI A, HIROAKI N. A water flowmeter using dual fiber Bragg grating sensors and cross-correlation technique[J]. *Sensors and Actuators A: physical*, 2004, 116(1): 66-74.
- [8] JUNG J, NAM H, LEE B. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(13): 2752-2754.
- [9] 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[J]. *光电子·激光*, 2003, 14(2): 210-214.
- [10] 于永波,张滨华,王晔.井下靶式动压流量计[J]. *传感器技术*, 2002, 21(5): 39-42.

美国计划增加 2007 年光电子技术国防预算

据美国《军事与航空电子》2006 年第 3 期报道,美国国防部计划 2007 财年将 213 亿美元预算用于通信、电子、电信和情报技术和相关装备的研发及采购,比 2006 年增长 4%。这一预算还不包括电子含量较大的装备如航空电子设备、车载电子设备和导弹制导装备的预算,若加上这些电子装备的预算,2007 年的预算接近 600 亿~650 亿美元。专家估计,整个美国国防部电子、光电子和信息技术的预算大约占整个国防部预算的 15%。美国国防部官员说,美国国防部向国会提出的 2007 年国防预算为 4 393 亿美元,比 2006 年国会国防拨款 4 108 亿美元增加 6%。美国国防部用于通信、电子、电信和情报技术和相关装备的研发及采购预算包括以下 4 个方面的预算:

空军预算 在通信、电子、情报方面的采购与研发预算为 110.6 亿美元,比 2006 年增长 18.4%,其中采购预算为 17.5 亿美元,研发预算为 93 亿美元。在采购预算中,3.34 亿美元用于基地信息基础设施建设;1.477 亿美元用于战术通信和电子设备的采购;1.204 亿美元用于信息技术。在研发预算中,8.671 亿美元用于转型通信卫星计划;2.66 亿美元用于天基雷达;1.212 亿美元用于空间态势感知系统;6.889 亿美元用于天基红外系统;20 亿美元用于联合攻击战斗机。

陆军预算 美国陆军提出用于通信、电子、电信和情报技术及其装备的采购与研发预算为 42.7 亿美元,比 2006 年增长 11.4%,其中采购预算为 39 亿美元,研发预算为 3.782 亿美元。在采购预算中,3.21 亿美元用于夜视设备;1.796 亿美元用于远程先进侦察监视系统;2.095 亿美元用于夜视热成像武器;1.601 亿美元用于 21 世纪部队旅及旅以下指挥控制系统;1.392 亿美元用于自动数据处理设备;3.402 亿美元用于过渡到未来的网络。在研发预算中,1.582 亿美元用于战术指战员信息网,其它经费用于联合战术无线电系统开发。

海军预算 海军计划将 17.5 亿美元预算用于通信、电子、电信和情报技术及其装备的采购与研发,比 2006 年减少 17.2%。

国防高级研究计划局有关电子技术研发的 2007 年预算为 32.9 亿美元,比 2006 年增长 9.6%,其中,2.429 亿美元用于信息与通信技术开发;2.201 亿美元用于感知计算机系统;1.158 亿美元用于先进航空系统;2.48 亿美元用于先进电子技术;2.32 亿美元用于指挥控制通信系统开发;1.743 亿美元用于网络中心技术;2.056 亿美元用于传感器技术开发。