

在 $-50^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ 大温度范围下用 FBG 测材料的三维热膨胀系数*

彭保进^{1,2} 张 敏² 廖廷彪² 赖淑蓉² 匡 武² 贺晓霞³

(1 浙江师范大学信息光学研究所, 浙江金华 321004)

(2 清华大学电子工程系, 北京 100084)

(3 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘 要 报导了用光纤布喇格光栅(FBG)传感器测量军工用的一新型材料的新方法. 实验结果表明, 此方法可在恶劣环境下可靠检测热膨胀系数, FBG 在低至 -50°C 和高至 $+150^{\circ}\text{C}$ 大范围下仍能正常工作. 文中给出了相应理论及实验结果.

关键词 光纤布喇格光栅; 应变; 三维热膨胀系数; 光电检测

中图分类号 TN929 **文献标识码** A

0 引言

目前对物体膨胀系数检测的报导中^[1~3], 多常规的电阻应变片、CCD、钢弦等. 这些常规技术对于非恶劣环境下且具有较大膨胀系数的物体一维检测具有重要的作用, 但测量易受环境影响, 不适合在恶劣环境下(如环境温度在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 或具有强腐蚀性的环境等)的检测, 否则会严重影响其测量精度及安全性. 而光纤光栅具有本质安全、电绝缘、灵敏度高、抗腐蚀、耐高低温、防爆性好、抗电磁干扰、光路可挠曲等一系列优点, 将光纤光栅应用于高精度的应变传感测量, 具有其它传感技术无法企及的优点. 另外, 由于光纤光栅体积小, 可方便地附贴在各向表面进行物体的多维膨胀系数的检测. 本文报导了在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$ 环境条件下, 利用光纤布喇格光栅(FBG)检测三维材料膨胀系数的检测原理和技术, 并给出了实验结果. 结果表明, 此方法可在恶劣环境下可靠检测, FBG 在低至 -50°C 和高至 $+150^{\circ}\text{C}$ 大范围下仍能正常工作.

1 光纤布喇格光栅测量材料热膨胀系数的原理

研究表明, 温度和应变引起光纤光栅 Bragg 波长的线性移动, 可表示为^[4~6]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T \quad (1)$$

式中, K_ϵ 为布喇格光栅反射波长的应变灵敏度系数; K_T 为温度灵敏度系数. 对于由石英材料制成的光纤, $K_\epsilon \approx 0.78$, $K_T \approx 6.67 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

用光栅测量热膨胀系统时, 光栅处于温度与应变同时改变的环境中, 而由于测量温度、应变二者之一时不可避免地会受到另一个参量的影响, 即存在交叉敏感问题, 所以在测量应变时, 必须对传感器采取温度补偿措施.

方法是在被测材料的附近位置放置一参考光栅, 使其只受温度影响, 这样在测量贴在材料表面的光栅的波长漂移中, 扣除参考光栅的波长漂移, 就可达到温度补偿的目的.

设粘贴在材料表面光栅的中心波长为 λ_{B1} , 由于它同时受应变和温度影响, 由式(1)得

$$\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

设用于温度补偿的参考光栅的中心波长 λ_{B2} , 由于它只受温度影响, 所以

$$\Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} = K_T \Delta T \quad (3)$$

由式(2)、(3)得

$$\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} = K_\epsilon \epsilon \quad (4)$$

由于采用了适合高精度应变测量的专用于光栅的 M-Bond 600 型粘贴剂, 在材料变形时能及时、几乎全部地把变形传递给光栅, 所以材料的热膨胀系数 α 即为 $\epsilon/\Delta T + \alpha_s$ (α_s 为光纤纤芯的热膨胀系数). 另外, 由于所用的光栅纤芯是石英材料的, $K_\epsilon \approx 0.78$, $\alpha_s \approx 0.55 \times 10^{-6}$, 所以

$$\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} \approx 0.78 \cdot (\alpha - 0.55 \times 10^{-6}) \Delta T \quad (5)$$

可见, $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 与 ΔT 成线性关系, 只要求出 $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 与温度 T 的直线斜率 k 即可求得膨胀系数 α

$$\alpha = k/0.78 + 0.55 \times 10^{-6} \quad (6)$$

2 波长解调系统原理

光纤光栅解调方法很多^[7,8], 图 1 给出自制的分

* 海洋 863 重大项目(编号: 2001AA602011-11)和浙江省科技计划项目(编号: 2005C31011)资助
Tel: 0579-2298863 Email: jhpbj@zjnu.cn
收稿日期: 2004-10-20

布式光纤光栅测量仪的解调方法框图。该测量仪有三路输入通道,每通道都可接受 30 个串联或并联的传感光栅,因此它可当作光栅网络分布检测的总机。

实验检测时,仅用来检测 4 个光栅(贴在材料三维方向的三个光栅和一个用来温度补偿用的光栅)。

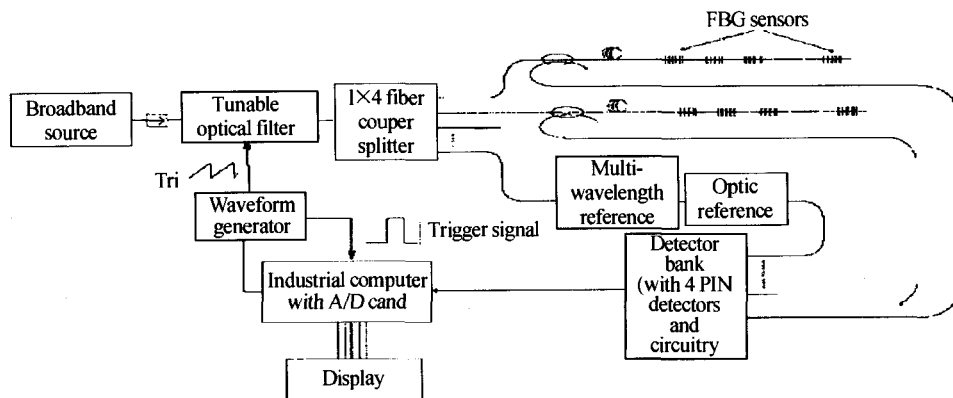


图1 波长解调系统原理

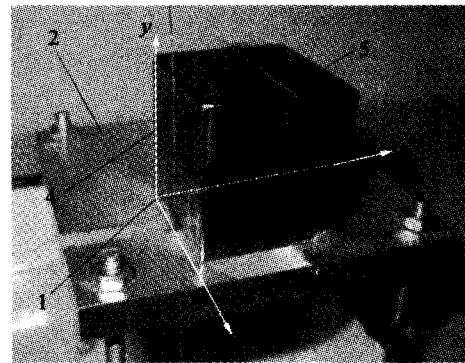
Fig.1 The principle of wavelength demodulation system

宽谱光源发出的宽谱光,经过光隔离器和可调谐滤波器(利用 F-P 滤波器,压电材料来控制 F-P 谐振腔的长短,从而达到选频的目的)后成为窄带光,然后经过耦合器将窄带光分成四路,其中一路光经过参考臂(reference)上温度补偿的光纤光栅 FBG1 反射后,用其反射谱作为参考谱;另外三路光分别通向三个通道(测量臂),各通道的测量光栅见图中的“FBG Sensors”。参考臂光栅的反射谱与另三路通道的测量谱分别经过光电转换后,从光信号变为电信号,然后经过一个放大器放大后,将测量信号与参考信号分开。参考信号直接送入到 AD 采集卡中,而测量信号则分为两路,一路送入 AD 采集卡中,另一路送入单片机,控制 PZT 的扫描电压和 F-P 滤波器的透射光波长。当外界测量光栅受应变或温度作用时,光栅的反射光波长发生变化。波长变化了的反射光被光电探测器检测后,将参考信号与测量信号送入到微机系统中处理,经适当的算法处理后可以得到测量臂上的光纤光栅反射的波长的变化量,显示相应的波长。

3 实验

3.1 装置

图 2 所示为放在恒温箱(上海产 GD8025,温度可调范围: $-80^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$)中的测量光栅与待测材料实物图,图中三个光栅分别沿参考坐标系 x, y, z 三个方向粘贴在待测立方体材料(本文称其 X 材料)的三个面上,用于感知材料三维的变化。将温度补偿用的参考光栅放在材料的附近位置。为保护光栅,可将该光栅(一般直径为 0.25 mm)装入金属小套管或装入 7 号麻醉针针管(内径为 0.37 mm)内。



1-Measuring resistor of material;2-Material desk;3-The grating of apperceiving x-direction;4-The grating of apperceiving y-direction 5-The grating of apperceiving z-direction

图2 部分实验装置——三个测量光栅与待测材料实物图
Fig.2 Part of experimental equipment——three measuring grating and measuring resistor of practicality

3.2 粘贴工艺

光栅传感器粘贴在材料上的工艺为:粘贴剂的选择(102、502 胶或美国产的光栅专用胶 M-Bond 600)→材料表面打磨→打磨处清洗(酒精棉或丙酮)→传感器粘贴(粘贴方法视选用的粘贴剂而定)→在光栅上涂一层粘结剂以防护光栅。

测量材料膨胀系数,显然要求粘结剂能把光栅牢牢粘贴在被测试件的表面上,在试件受力时粘结剂能及时、全部地把试件变形传递给敏感光栅。M-Bond 600 型粘结剂适用于高精度应变测量,使用温度范围为 $-269 \sim +370^{\circ}\text{C}$,满足测量要求。

具体粘贴工艺如下:

1)先用 CSM-1A 牌去污剂将被测表面的锈皮、油污和附着物全部除尽,露出光泽的金属表面。然后用 320 目砂纸交叉打磨至光洁度为 $\nabla 5$,磨削方向与光栅主轴方向成 45° 角。再用粘湿底材表面处理

剂的 400 目砂纸抛光后,用丙酮擦拭贴片处,再用纱布棉拭擦净,然后用划针在测点上画一十字线.

2)用大量中和液清洗测点及其附近,用纱布棉擦干,要单向缓慢擦拭,切忌来回擦拭.用牙签在光栅基底上均匀地涂刷一层薄薄的粘结剂,把光栅贴到试件上应粘贴的位置与方向后,盖上一小张聚四氟乙烯薄膜,用食指轻轻在上滚动,挤出气泡和多余的粘结剂.

3)用弹簧压板(自重块)给光栅施加 275~350 kN/m² 的固化压力,自然干燥 4 h 后,放进烘烤箱以 3~11℃/min 的速度升温至 45℃,保温 4~8 h,然后随炉冷却至室温.取下弹簧压板(自重块),再次放进烘烤箱以 3~11℃/min 的速度升温至 50℃,保温 2~4 h,然后随炉冷却至室温.粘贴完成.

3.3 实验及结果分析

3.3.1 温度补偿用的参考光栅特性检测

待测材料附近位置的温度补偿光栅特性见图 3.图 3(a)为升温过程中的特性曲线,拟合后直线斜率为 0.01071,拟合相关系数为 0.99907,标准误差为 0.01415.图 3(b)为两次升降温后所测的波形,可以看到线性度与吻合度都非常好.良好的线性关系为下一步测量热膨胀系数时将应变与温度的分离带来很大的方便.

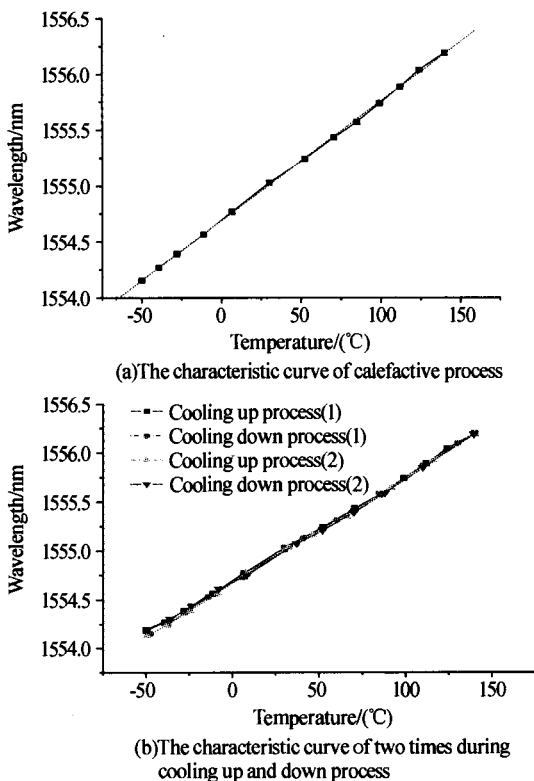


图 3 温度补偿参考光栅的温度-中心波长关系图
Fig. 3 The relationship between temperature and the center wavelength of the temperature compensated method for reference grating

3.3.2 三维方向的波形

图 4 分别贴在材料 x、y、z 三个方向上的温度-波长实验曲线图.可以看到,各方向光栅的温度-波长之间具有较好的线性关系,而且升温过程和降温过程重复性较好.另外,值得注意的是三条直线斜率不一致.对三个方向上的光栅测量数据进行线性拟合后如图 5(为清晰起见,图中仅示出 x 方向数据拟合图,另两个方向类同),直线拟合相关系数分别为 0.99958、0.99960、0.99963,直线斜率分别为 0.0221、0.01907、0.02032.

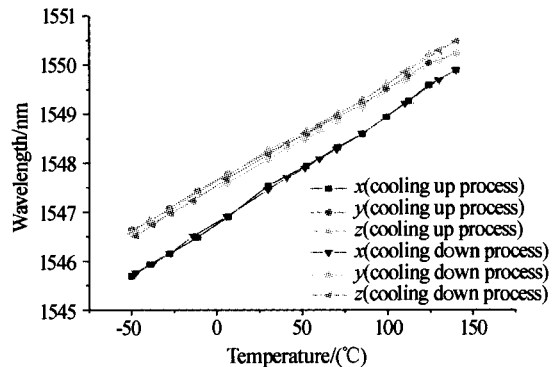


图 4 三维方向光栅升降温过程的温度-波长关系
Fig. 4 The relationship between temperature and the wavelength during cooling down process of 3-D direction grating

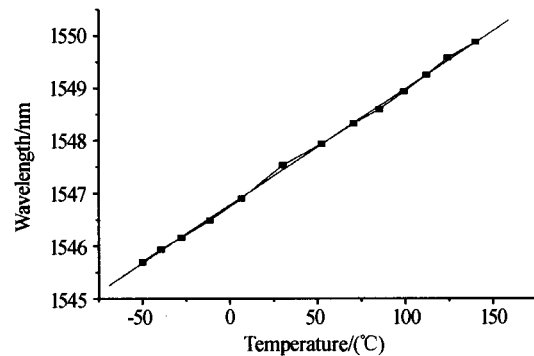


图 5 x 方向温度-波长数据拟合图
Fig. 5 The relationship of data treatment between temperature and the wavelength in x-direction

可见,三维方向斜率不一致,说明该材料的在三维方向的热膨胀系数不完全一致.由于三方向上的光栅同时受应变与温度的影响,所以这里求出的斜率不是式(5)中欲求的斜率,要定量计算出热膨胀系数,还需考虑温度补偿问题.

3.3.3 考虑温度补偿后的应变波形

由式(5)知道,为求出膨胀系数,合理的办法是先根据大量的实验数据拟合出一条以 $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 为纵坐标、以温度 T 为横坐标的一条直线,然后求其斜率 k ,由式(6)得出膨胀系数 α .

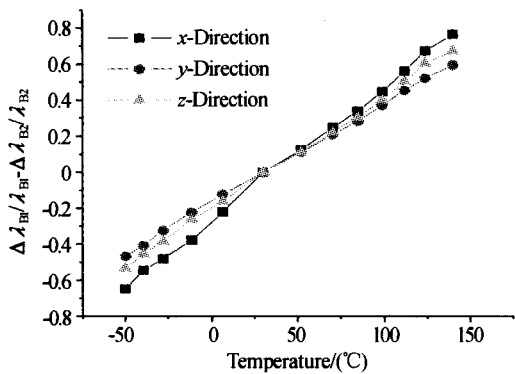
在室温 30℃、未受应变作用时,x、y、z 三方向上的实验光栅中心波长分别为:1547.535 nm、1548.

268 nm, 1548.213 nm; 温度补偿参考光栅中心波长为 1555.031 nm. 将中心波长和实验测得的各温度下的波长代入计算, 得到各温度下的 $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 值, 如表 1. 表中为升温过程中相应数据.

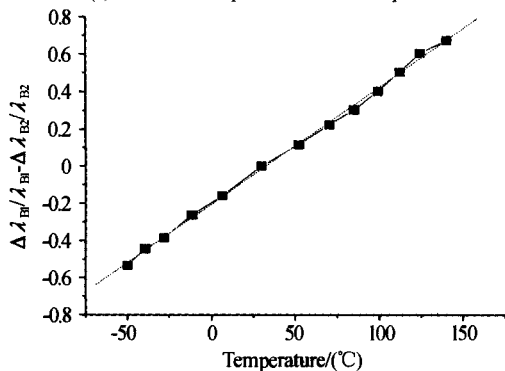
表 1 $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 与温度对应关系数据表

温度 (°C)	$\Delta\lambda_{B1}/1547.535 - \Delta\lambda_{B1}/1548.268 - \Delta\lambda_{B1}/1548.213$	$\Delta\lambda_{B2}/1555.031$	$\Delta\lambda_{B2}/1555.031$	$\Delta\lambda_{B2}/1555.031$
-50.0	-6.48178E-4	-5.34584E-4	-4.67448E-4	
-39.3	-5.44517E-4	-4.34874E-4	-4.18113E-4	
-27.9	-4.81466E-4	-3.84806E-4	-3.2412E-4	
-11.4	-3.78183E-4	-2.6354E-4	-2.02845E-4	
6.6	-2.40549E-4	-1.60266E-4	-1.12481E-4	
30.0	0	0	0	
52.2	1.24729E-4	1.13625E-4	1.10404E-4	
70.5	2.46807E-4	2.22024E-4	2.09123E-4	
85.0	3.38353E-4	3.0315E-4	2.82504E-4	
99.0	4.47426E-4	4.01788E-4	3.72106E-4	
112.0	5.60337E-4	5.02972E-4	4.53921E-4	
124.0	6.72601E-4	6.03511E-4	5.22172E-4	
140.0	7.65492E-4	6.73705E-4	5.54909E-4	

$\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 与温度 T 间的关系如图 6 (a). 可以看到, 所测 X 材料三维热膨胀系数不一致, 其中 x 方向最大, y 方向最小. 分别对三个方向上的光栅 $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 数据及温度数据进行线性拟合 (如图 6(b). 为清晰起见, 图中仅示出 z 方



(a) The relationship of the results of experimental data



(b) The relationship of data treatment in z-direction

图 6 $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$ 与温度关系图
Fig. 6 The relationship between temperature and $\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}$

向数据拟合图, 另两个方向类同), 直线拟合相关系数分别为 0.99919, 0.99953, 0.99932, 直线斜率分别为 7.414×10^{-6} , 5.560×10^{-6} , 6.310×10^{-6} . 代入式(6)得所测 X 材料三维热膨胀系数分别为 (按图 2 所示 x, y, z 顺序): 10.06×10^{-6} , 7.68×10^{-6} , 8.64×10^{-6} .

3.3.4 实验误差及原因分析

为了确定测量精度, 用上述方法对一已知热膨胀系数 (为 $23 \times 10^{-6} K^{-1}$) 的铝块进行测量, 实验结果表明, 此方法测量误差小于 1% (实验所测为 $22.8 \times 10^{-6} K^{-1}$). 测试过程中可能带来的误差有以下几方面:

1) 粘贴剂的热敏性引起误差. 粘贴光栅的胶本身随温度的变化发生的应变会对测量结果造成影响. 所采用的是专用粘贴光栅的 M-Bond 600 型粘剂, 适用于高精度应变测量, 其本身应变造成的误差应可以忽略. 当然也可通过测量一已知膨胀系数的材料倒推出其校正系数.

2) 记录的时差引起误差. 记录实验数据时机不当会引起很大误差. 在材料没有达热平衡之前, 材料本身的温度还没有达到其所处的环境温度, 此时所测应变与所测温度不是真正的对应关系, 有偏低 (升温时) 或偏高 (降温时) 的现象. 可通过观察粘于材料表面光栅的中心波长是否发生变化来判断平衡情况, 若 5 min 内几乎没有变化, 可视为平衡. 显然同一种材料体积越大达平衡时间越长. 我们所用材料尺寸是 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 记录每一温度值所对应的测量值都在恒温 2 h 后进行.

3) 温度的测量引起误差. 普通温度计误差较大, 宜采用高精度测温装置. 采用 AMETEK 的 DTI100 型高精度数字式测温仪 (测温范围为 $-200^\circ\text{C} \sim +750^\circ\text{C}$, 测温精度为 0.014°C).

4) 波长的测量引起误差. 光栅波长测量仪的精度直接影响检测结果, 检测时应选用高精度光波长测量仪. 自制的分布式光栅测量仪测量值可精确到 0.005 nm .

在测量过程中, 以上几方面的第(2)点是主要误差源. 在以上测量图中看到的少数几个数据点偏离主要就是没完全达热平衡引起的.

4 结论

本文报导了用光纤布喇格光栅传感器测量恶劣环境下材料三维热膨胀系数的新方法. 实验结果表明, 此方法可在恶劣环境下可靠检测, FBG 在低至 -50°C 和高至 $+150^\circ\text{C}$ 大范围下仍能正常工作. 鉴于光纤光栅本身的抗腐蚀、耐高低温、本质安全及灵

敏度高等系列优点,用该方法既保证了测量的安全性,又保证了检测的准确性.文章提及的测量方法,除了用于热膨胀系数检测外,还可用于与此相关或类似的恶劣环境下的其它参数的检测.

参考文献

- 1 张瑛,李尧. CCD 探测器在测量金属丝线膨胀系数中的应用. 物理实验, 2002, **22**(12): 38~39
Zhang Y, Li Y. *Physics Experimentation*, 2002, **22**(12): 38~39
- 2 花世群. 利用菲涅耳双镜测金属线膨胀系数. 光学技术, 2002, **28**(3): 280~281
Hua S Q. *Optical Technique*, 2002, **28**(3): 280~281
- 3 刘晓, 周瑛玮, 姜延玺, 等. 金属线膨胀系数的计算机检测系统的研制与应用. 中国仪器仪表, 1997, (1): 17~18
Liu X, Zhou Y W, Jiang Y X, et al. *Chinese Instrument*, 1997, (1): 17~18
- 4 郭团, 乔学光, 贾振安, 等. 基于光纤 Bragg 光栅反射波带宽展宽的压力传感研究. 光子学报, 2004, **33**(3): 288~

290

Guo T, Qiao X G, Jia Z A, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 288~290

- 5 杨石泉, 蒙红云, 董新永, 等. 一种简单的光纤光栅电调谐方法. 光子学报, 2002, **31**(7): 907~909
Yang S Q, Meng H Y, Dong X Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(7): 907~909
- 6 Meltz G. Overview of fiber bragg grating sensors. *Proceedings of SPIE*, 2000, **2838**: 2~22
- 7 靳伟, 廖延彪, 张志鹏, 等. 导波光栅传感器: 原理与技术. 北京: 科学出版社, 1998. 331~340
Jin W, Liao Y B, Zhang Z P, et al. *Guided-wave Optics Sensor: Principle and Technology*. Beijing: Science Press, 1998. 331~340
- 8 詹亚歌, 陆青, 向世清, 等. 优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究. 光子学报, 2004, **33**(6): 711~715
Zhan Y G, Lu Q, Xiang S Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 711~715

Measurement of the 3-D Thermal Expansion Coefficients of Material Used by a FBG During the Large-scale Temperature Between Negative 50°C and Positive 150°C

Peng Baojin^{1,2}, Zhang Min², Liao Yanbiao², Lai Shurong², Kuang Wu², He Xiaoxia³

¹ Zhejiang Normal University, Institute of Information Optics, Jinhua 321004

² Tsinghua University, Department of Electronic Engineering, Beijing 100084

³ Tsinghua University, Precision Instruments Department, Beijing 100084

Received date: 2004-10-20

Abstract In order to measure materials of 3-D thermal expansion coefficient under the condition of the bad environment, a novel method was proposed in this paper. The thermal expansion coefficient of the new material was measured by using a Fiber Bragg Grating sensor. The results of experiment indicate that this method could be full of credibility in examining the thermal expansion coefficient under the condition of the bad environment, at of the large-scale temperature of bellowing to negative 50°C and highing to 150°C the FBG could also be in a good working condition. The text gave the theory correspondence and the results of experiment.

Keywords Optic Fiber Bragg Grating (FBG); Strain; 3-D thermal expansion coefficient; Photoelectric detection



Peng Baojin was born in 1967, in Zhejiang Province. He works as an associate professor in College of Mathematics, Physics and Information Science, Zhejiang Normal University. His current research focuses on the development of photo-electronic technology and computer technology. He has published more than twenty papers in China and abroad. Now he is a visiting fellow in Department of Electronic Engineering, Tsinghua University (Supervised by Professor Liao Yan-biao).