

# 光纤布拉格光栅温度和应变交叉灵敏度的实验研究<sup>\* \*</sup>

张晓晶<sup>\*</sup>, 武湛君, 张博明, 吴春涛, 杜善义

(哈尔滨工业大学复合材料研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 测量了光纤布拉格光栅(FBG)在-150~550℃范围内中心反射波长对应变的依赖关系, 得到了光栅的温度和应变交叉灵敏度系数。结果表明, 不论是在低温环境还是高温环境, 当光纤所受张力小于6000μ $\epsilon$ 时, 波长变化与应变大小呈线性关系; 光栅的应变灵敏度系数和交叉灵敏度系数是温度的函数, 温度越低, 应变灵敏度系数越大, 交叉影响越显著。

**关键词:** 光纤布拉格光栅(FBG); 应变灵敏度系数; 交叉灵敏度系数

中图分类号: T P253 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2005)05-0566-04

## Experimental Study on Cross sensitivity of Temperature and Strain of Fiber Optic Bragg Gratings

ZHANG Xiao-jing<sup>\*</sup>, WU Zhan-jun, ZHANG Bo-ming, WU Chun-tao, DU Shan-yi

(Center for Composites, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The strain response of fiber Bragg grating sensors was measured at a constant temperature. Strain sensitivity coefficient and cross-sensitivity coefficient were obtained at temperatures from -150℃ to 550℃. It was found that the two kinds of strains are the functions of temperature. The strain coefficient will slowly decrease with temperature increasing at higher temperature, and the cross coupling effect is not obvious; the one will increase with temperature decreasing at lower temperature, and the cross coupling effect becomes obvious. In addition, the wavelength shift of fiber Bragg gratings changes linearly with applied tensile strain within 6000μ $\epsilon$  at a constant temperature.

**Key words:** fiber Bragg gratings(FBG); strain sensitivity coefficient; cross sensitivity coefficient

## 1 前言

光纤布拉格光栅(FBG)是一种性能优良的传感元件, 具有体积小、易于安装、分布式传感和固有的抗电磁干扰等特点, 它在光纤通讯和光纤传感领域的潜在应用性已引起了人们的关注。FBG对温度和应变敏感, 但是当温度和应变同时发生变化时, 波长漂移并不是应变和温度单独作用时产生的波长漂移的简单迭加, 还存在着力学量和热学量的相互作用, 这个作用体现为交叉灵敏度, 其大小反映了这种相互作用的程度<sup>[1~5]</sup>。Xu等人<sup>[6]</sup>得到中心波长为1300nm和850nm的交叉影响变化量分别为 $2.31 \times 10^{-6}$  pm/

(℃·μ $\epsilon$ )和 $0.62 \times 10^{-6}$  pm/(℃·μ $\epsilon$ ), Farahi等人<sup>[7]</sup>用偏振F-P光纤干涉仪测得的交叉影响变化量分别为-2.042 rad/(℃·μ $\epsilon$ )和-1.986 rad/(℃·μ $\epsilon$ )。但对于FBG在低温环境(-150℃)和高温环境(550℃)下交叉敏感系数的测定, 尚未见报道。为此, 本文测量了FBG中心反射波长在不同恒定温度下对应变的依赖关系, 发现了-150~550℃范围内FBG应变灵敏度和交叉灵敏度的变化规律。

## 2 理论分析

### 2.1 应变灵敏度

FBG的布拉格反射波长为

\* 收稿日期: 2004-05-17 修订日期: 2004-08-18

\* E-mail: zhangxj.hit@sina.com

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

由式(1)可知, 反射波长  $\lambda_B$  是随有效折射率  $n_{eff}$  和光栅周期  $\Lambda$  而变的, 而应变会引起光栅周期的伸缩以及由于弹光效应使有效折射率发生变化, 因此将式(1)对应变进行求导, 可得反射波长的变化量为

$$d\lambda_B/d\varepsilon = 2(n_{eff}d\Lambda/d\varepsilon + \Lambda dn_{eff}/d\varepsilon) \quad (2)$$

当光纤仅受轴向应力作用时, 应变张量矩阵  $\xi$  可用轴向应变来表示为

$$\xi = [-v\varepsilon - v\varepsilon\varepsilon_000]^T \quad (3)$$

轴向应变引起光栅周期的变化为

$$d\Lambda = \Lambda d\varepsilon \quad (4)$$

对各向同性的纤芯材料, 应变引起的折射率的变化为

$$\frac{dn_{eff}}{d\varepsilon} = -P_e n_{eff} \quad (5)$$

式中,  $P_e$  是有效弹光系数, 为

$$P_e = \frac{n_c^2}{2}[P_{12} - v(P_{11} + P_{12})] \quad (6)$$

式中:  $P_{11}$ 、 $P_{12}$  是弹光系数;  $v$  是泊松比。那么, 应变灵敏度系数为

$$K_\varepsilon = \frac{1}{\lambda_B} \frac{d\lambda_B}{d\varepsilon} = \Lambda \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} + n \frac{dn}{d\varepsilon} = 1 - P_e \quad (7)$$

应变灵敏度系数反映了波长相对漂移量  $\Delta\lambda/\lambda_B$  与  $\Delta\varepsilon$  之间的变化关系。当材料确定后,  $K_\varepsilon$  是与材料系数相关的常数。对掺 Ge 石英光纤,  $P_e \approx 0.22$ , 因此  $K_\varepsilon \approx 0.78$ , 波长变化与应变变化量是线形关系。那么, 对于 1535 nm 的 FBG, 每个微应变将引起  $1.197 \times 10^{-3}$  nm 波长的变化。

### 2.2 交叉灵敏度

由式(1)可知, 任何使  $n_{eff}$  和  $\Lambda$  改变的物理量都会引起 FBG 反射波长的漂移。对于 FBG 温度-应变的传感测量, 反射波长是两者的函数。对式(1)进行 Taylor 展开, 可得

$$\begin{aligned} \lambda_B = & n(\varepsilon_0, T_0) \Lambda(\varepsilon_0, T_0) + [\Lambda \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} + \\ & n \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon}]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} \Delta\varepsilon + [\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T}]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} \Delta T + \\ & [\Lambda \frac{\partial^2 n}{\partial \varepsilon \partial T} + n \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \varepsilon \partial T} + \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \frac{\partial n}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \frac{\partial n}{\partial T}]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} \Delta\varepsilon \Delta T + \\ & [\Lambda \frac{\partial^2 n}{\partial \varepsilon^2} + n \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \varepsilon^2}]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} (\Delta\varepsilon)^2 + [\Lambda \frac{\partial^2 n}{\partial T^2} + n \\ & \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial T^2}]_{T=T_0, \varepsilon=\varepsilon_0} (\Delta T)^2 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知,  $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$  及它们的交叉项和高阶项都会引起波长的漂移  $\Delta\lambda_B$ 。高阶项对波长改变的贡献

随  $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$  的增大而增大。当  $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$  很大时, 波长随  $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$  的变化是非线性的; 当  $\Delta\varepsilon$ 、 $\Delta T$  变化范围不是很大时,  $(\Delta\varepsilon)^2$  和  $(\Delta T)^2$  的高阶项与前面 3 项相比可以忽略, 则式(8)可简化为

$$\Delta\lambda_B(\xi, T) = k_\varepsilon \Delta\varepsilon + k_T \Delta T + k_{\varepsilon T} \Delta T \Delta\varepsilon \quad (9)$$

式中:  $k_\varepsilon$  为应变灵敏度;  $k_T$  为温度灵敏度;  $k_{\varepsilon T}$  为交叉灵敏度。 $k_{\varepsilon T}$  是与温度、应力都有关的量, 它实际上反映了在不同的应变(或温度)时, 温度灵敏度(或应变灵敏度)不是常数, 而是随着应变(或温度)的变化而变化, 其大小描述了温度灵敏度(或应变灵敏度)偏离常数的程度<sup>[1]</sup>。

### 3 实验测量

测量 FBG 在 -150~550 °C 时中心反射波长对应变的依赖关系。所用光纤为商业掺 Ge 单模光纤, 中心波长在 1500 nm 左右。采用美国 Micron Optics 公司生产的集成解调系统 FBG-IS 测量布拉格中心反射波长, 波长检测的分辨率为 0.001 nm, 精度为 0.005 nm, 扫描频率为 50 Hz。采用高低温箱提供温度环境, 通过电子加热炉得到高温, 液氮冷却得到低温, 试验箱内部温度在 -150~+1000 °C 连续可调, 由箱内的温度计和面板上的数字表读取温度值, 精度为 1 °C。在温度箱顶部和底部分别开有孔道, 通过微进给装置对 FBG 施加纵向拉伸应力, 由千分表读出光纤的位移, 精度为 0.001 mm。保持恒定温度时, 对光纤施加应力, 每增加 500  $\mu\varepsilon$  时记录 1 次数据, 最大应变略小于 6000  $\mu\varepsilon$ 。

### 4 结果和讨论

不同温度下, 布拉格波长与其纵向应变的曲线如图 1 所示。可以看出, 任一个恒定温度下, 在 0~6000  $\mu\varepsilon$  的应变范围内, 光纤的布拉格反射波长与其纵向应变表现出良好的线性关系。

不同温度下, 每个微应变引起的波长变化是不同的, 结果如图 2 所示。当温度在室温时  $\Delta\lambda/\lambda_B$  为  $1.2 \times 10^3$  nm/ $\mu\varepsilon$ , 这与理论值十分吻合; 当温度升高, 在 44~550 °C 时,  $\Delta\lambda/\lambda_B$  值下降为  $1.18 \times 10^3$  nm/ $\mu\varepsilon$ ; 在低温环境下,  $\Delta\lambda/\lambda_B$  值的变化比较明显, 可近似为与温度有关的直线, 即有

$$\Delta\lambda/\lambda_B = 0.00123 - 7.7 \times 10^{-7} T \quad (10)$$

将上述变化综合起来, 用指数曲线拟合试验数据, 可以得到

$$\Delta\lambda/\lambda_B = 0.00117 + 5.8 \times 10^{-5} \exp(-T/124.4) \quad (11)$$

相应的,其应变灵敏度系数的变化情况见图3。也就是说,应变灵敏度系数并不是常数,是随着温度的变化而变化。对试验结果进行指数形式拟合,可得

$$k_{\epsilon}(T) = 0.76318 + 0.03793\exp(-T/124.3) \quad (12)$$

将式(12)对温度求一阶导数,可以得到交叉灵敏度系数为

$$k_{\epsilon T}(T) = \frac{dk_{\epsilon}}{dT} = -3.05 \times 10^{-4} \exp(-T/124.3) \quad (13)$$

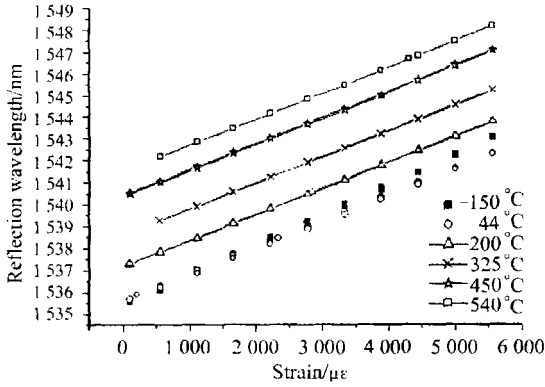


图1 不同温度下,布拉格波长与其纵向应变的关系曲线

Fig.1 Wavelength strain of FBG at different temperature

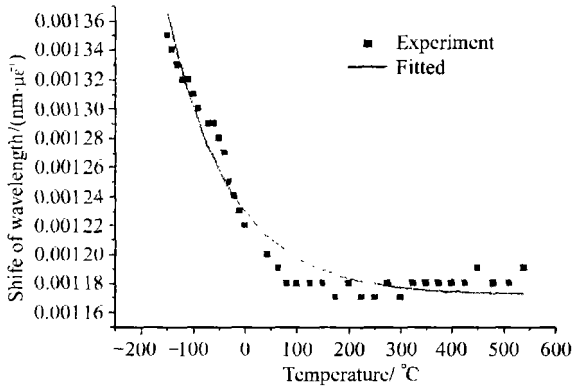


图2 不同温度下的波长位移

Fig.2 Change of Δλ/Δε with temperature

因此,交叉灵敏度也不是常数,而是与温度有关的函数。由图4可以看出,这是一条单调增加的函数,室温下(26 °C)交叉灵敏系数为 $-2.47 \times 10^{-4}$ , $-150$  °C时减小到 $-1 \times 10^{-3}$ , $550$  °C时增加为 $-3.61 \times 10^{-6}$ , $-150$  °C与 $550$  °C的交叉灵敏度相差3个数量级。也就是说,温度越低,交叉影响越显著;波长的相应变化分别为 $-150$  °C时的 $-1.575 \times 10^{-6}$  nm/(°C·με), $26$  °C的 $-3.77 \times 10^{-7}$  nm/(°C·με), $550$

°C时的 $-5.5 \times 10^{-9}$  nm/(°C·με)。

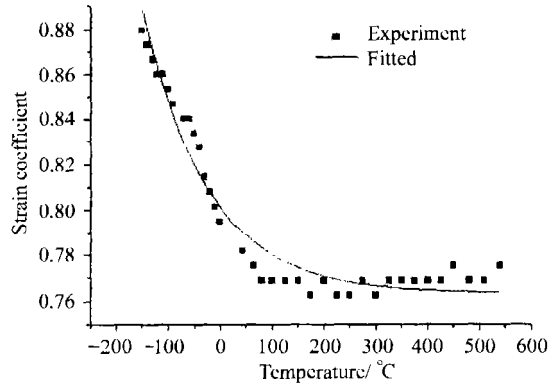


图3 应变灵敏度系数与温度的关系曲线

Fig.3 Relation of strain sensitivity and temperature

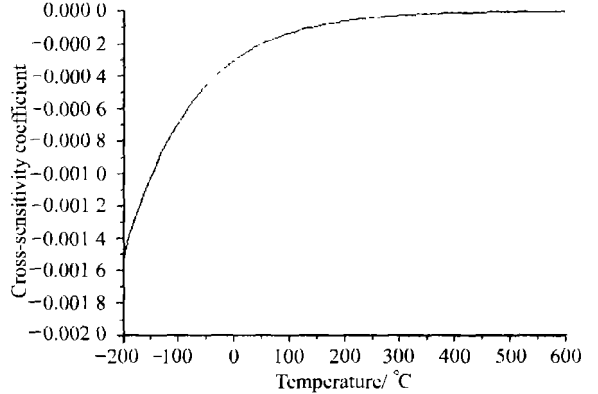


图4 交叉灵敏度系数温度的变化曲线

Fig.4 Relation of cross sensitivity and temperature

### 5 结论

通过实验发现, $-150$  °C~ $550$  °C的任一恒定温度时,在 $0 \sim 6000$  με的应变范围内,光纤的布拉格反射波长与其纵向应变表现出良好的线性关系,不同温度下,每个微应变引起的波长变化量不同,应变灵敏度和交叉灵敏度不是常数,而是温度的函数,温度越低,应变灵敏度系数越大,交叉影响越显著。因此,FBG应用在低温环境下时,需要考虑温度和应变的交叉影响。波长接近 $1500$  nm时,可以按照式(12)、(13)对波长与应变的关系及交叉影响进行估算。

### 参考文献:

[1] LÜ Qie ni, ZHANG Yf mo, LIU Tie gen, et al. Cross sensitivity of fiber grating sensor measurements[J]. Journal of Tianjin University (天津大学学报), 2002, 35(4): 425-428. (in Chinese)  
[2] JIA Hong zhi, LI Yu lin, HU Man li, et al. Analysis of sensitivity of optical fiber Bragg gratings and research on its application[J]. Laser Journal(激光杂志), 1999, 20(5):

- 12-14. (in Chinese)
- [3] WANG Ma guang, LI Tang jun, ZHUO Fong, et al. Research on cross sensitivity of fiber grating sensor about strain and temperature[J]. Study on Optical Communications (光通信研究), 2001, (6): 50-53. (in Chinese)
- [4] JIAO Ming xing, ZHAO En guo. Solutions of cross sensitivity of strain and temperature of fiber Bragg grating[J]. Applied Optics (应用光学), 2003, 24(2): 20-24. (in Chinese)
- [5] SUN Au, QIAO Xue guang, JIA Zhen an, et al. Simultaneous discriminating measurement of temperature and strain by using fibre grating sensing technology[J]. J. of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2003, 14(2): 210-214. (in Chinese)
- [6] Xu M G, Archambault J L, Reekie I, et al. Discrimination between strain and temperature effects using dual wavelength fiber grating sensors[J]. Electron Letter, 1994, 30(13): 1085-1087.
- [7] Farahi F, Webb D J, Jones D C, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain: Cross sensitivity considerations[J]. J. Lightwave Technology, 1990, 8(2): 138-142.

## 作者简介:

张晓晶 (1976-), 女, 博士, 主要从事光纤传感和结构健康监测的研究.

• 消息 •

## 《光电子·激光》英文版将于下半年正式出版发行

《光电子·激光》杂志英文版:《光电子快报(Optoelectronics Letters)》, 经国家科技部和新闻出版总署批准, 将于2005年下半年正式公开出版发行。欢迎投稿!

E-mail: oel@263.net