

液氮温度光纤 Bragg 光栅的应变传感特性<sup>\* \*</sup>黄国君<sup>1 \* \*</sup>, 邵进益<sup>1,3</sup>, 王秋良<sup>2</sup>, 邓凡平<sup>2,3</sup>, 戴 锋<sup>1,3</sup>, 冯遵安<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**对光纤 Bragg 光栅(FBG)液氮(77 K)下的应变传感技术及应变特性进行了研究。实验和分析表明:常温下 FBG 反射谱中的单个中心峰在低温下会劈裂为多峰,它产生于光纤、粘贴胶和金属基底热膨胀系数间的差异引起的强烈非均匀热弹性应变,使常温下均匀的光栅变啁啾化。建立了多种技术手段,成功消除了低温多峰现象,并测得了 FBG 低温和常温下的应变传感特性。实验结果表明:FBG 的应变灵敏系数与温度无关。

**关键词:**光纤 Bragg 光栅(FBG); 应变传感器; 液氮

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2007)07-0773-03

## Strain Response of FBG at Liquid Nitrogen Temperature

HUANG Guo-jun<sup>1 \* \*</sup>, SHAO Jir-yi<sup>1,3</sup>, WANG Qiu-liang<sup>2</sup>, DENG Fan-ping<sup>2,3</sup>, DAI Feng<sup>1,3</sup>, FENG Zuan-an<sup>2,3</sup>

(1. Division of Engineering Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. Division of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The strain sensing properties based on fiber Bragg gratings(FBGs) at the liquid nitrogen temperature (77 K) were investigated. It was found that the single central peak in the reflection spectrum of FBGs at the ambient temperature is split into multiple peaks at the cryogenic temperature. This abnormality is attributed to the severely inhomogeneous thermo-elastic strain over the grating of FBGs due to the mismatch of the coefficients of thermal expansion between the glass fiber core, epoxy adhesive and metal substrate, which transforms the original uniform grating into a chirped one. Some technologies were developed to eliminate the multi-peak phenomenon and, eventually, the strain responses of FBGs at the ambient and liquid nitrogen temperatures were measured. The experimental results show that the strain sensibility of FBGs is independent of temperature, which demonstrates that FBGs are excellent cryogenic strain sensors.

**Key words:** fiber Bragg gratings(FBGs); strain sensor; cryogenic temperature

## 1 引言

光纤 Bragg 光栅(FBG)是近年发展最为迅速的光纤无源器件之一,它具有耐久性好、抗电磁干扰、单端输入、体积小、重量轻、准分布测量、抗潮湿及与强度信息无关等优点,已在光纤通信、光纤传感中广泛应用<sup>[1~4]</sup>。目前,对 FBG 传感特性的研究多在常温下,然而高温超导磁体、航空航天结构等要求高精度的低温应变测量<sup>[5,6]</sup>。美国宇航局(NASA)研究发现,在低温下,FBG 的反射谱会出现多峰现象,并将这一反常现象归因于低温下光纤微结构及光学性质的变化,这导致常规的 FBG 应变测量原理不能适用<sup>[7]</sup>。与此同时,我们从 2003 年开始了 FBG 低温应变传感特性的研究,目前已成功解决了多峰问题,本文将介绍我们的实验研究工作及主要结果。

## 2 FBG 应变传感原理

FBG 是利用光纤材料的光敏性在纤芯内形成空间相位光栅,其作用实质是在纤芯内形成窄带的滤光器或反射镜,利用这一特性可构成许多独特性能的光纤无源器件。对于 FBG,满足

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

的入射光波将被反射<sup>[8,9]</sup>。其中: $\Lambda_B$ 为 FBG 中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为纤芯有效折射率; $\Lambda$ 为纤芯折射率的调制周期。当 FBG 外界环境温度发生变化  $T$  或经受一均匀应变  $\epsilon$  时,不仅会产生  $\Lambda$  的变化,而且通过弹光效应和热光效应会引起  $n_{\text{eff}}$  的变化,从而引起反射光波长的平移,这时式(1)变为

$$\Lambda_B = 2(n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\epsilon) \quad (2)$$

\* 收稿日期:2006-08-14 修订日期:2006-11-29

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(10532070,50577063);中国科学院知识创新重要方向性资助项目(KJ CX2-SW-L03-01)

\* \* E-mail: ghuang@imech.ac.cn

不难推导出  $\lambda_B$  与  $\epsilon$  和  $T$  间的关系为

$$\lambda_B = K \epsilon + K_T T \quad (3)$$

式中,  $K$  和  $K_T$  分别为应变和温度灵敏系数, 可由理论推导或实验标定得到<sup>[10]</sup>。当温度恒定时, 可通过测得 FBG 反射中心波长的平移求出光纤上的应变变量, 即光纤所粘贴表面处的结构应变变量。

需要强调的是, 式(3)给出的 FBG 应变和温度传感原理是有适用范围的, 即要求光栅的调制周期均匀, 栅区上的应变和温度变化也是均匀的。这时, FBG 的反射谱是正常的, 即具有对称的尖峰, 峰值波长就是  $\lambda_B$ , 并且反射谱的变化只有整体平移, 没有波形的变化, 因而只需记录  $\lambda_B$  而不用记录全谱就可获得  $\epsilon$  或  $T$  的信息, 这使得 FBG 高速动态测量成为可能。然而, 当 FBG 上的应变或温度变化非均匀性使得光栅啁啾化时, 不仅会出现波峰平移, 而且存在波峰展宽、高度降低, 测量精度大大降低, 严重时甚至会出现波峰劈裂, 导致多峰现象, 此时 FBG 传感失败。一般来说, 对于弱非均匀性, FBG 传感原理仍可适用, 能够给出栅区长度范围内应变和温度的平均变化。因此, 在 FBG 的传感应用和传感器的制作中, 应对波形是否存在明显变化加以特别注意。

### 3 实验

标定  $K$  的试验装置如图 1 所示, 其中加载装置为悬臂梁, 浸没在杜瓦罐内的液氮中。悬臂梁为长 145 mm、宽 35 mm 和厚 2 mm 的 Al 梁。FBG 由深圳太辰光通信有限公司提供, 分别是栅长为 10 mm 的裸栅和 15 mm 的涂覆栅, 标称波长为 1535 ~ 1555 nm。常温下将 FBG 粘贴于悬臂梁表面上, 胶水为上海合成树脂研究所的 DW-3G 型低温胶。加载点位于悬臂梁自由端附近, 与光栅相距 70 mm, 载荷范围为 0 ~ 2 kg 力。使用美国 Micron Optics Inc 的 FBG-SL1 解调仪, 其有 4 个通道, 光源为扫频激光, 波长范围为 1520 ~ 1560 nm, 分辨率为 1 pm。

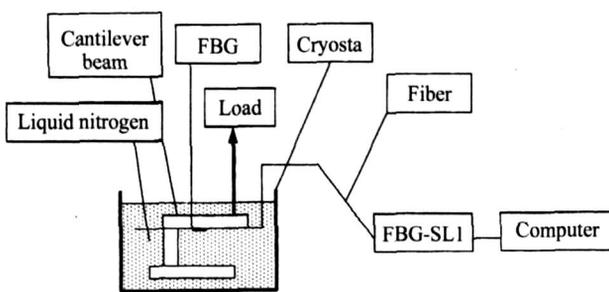


图 1 实验装置示意图

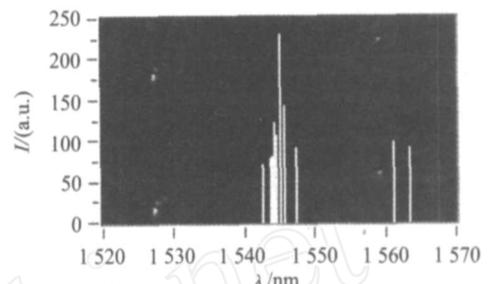
Fig.1 Schematic of experimental set-up

改变载荷大小, 利用解调仪测量 FBG 中心波长的变化, 得到波长-载荷关系曲线, 并由悬臂梁理论获得波长-应变关系曲线。实验分别在常温下和液氮中进行, 以考察温度对 FBG 应变传感特性的影响。

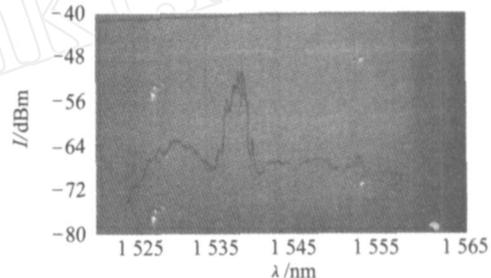
### 4 多峰现象

首先对裸 FBG 进行了实验。当悬臂梁装置浸入液氮处于热平衡后, 虽然是单个 FBG 且未加载, 却出现了多个波长值,

如图 2(a) 所示, 说明其反射谱出现了多峰现象。进一步用光谱仪对反射谱进行了观察, 如图 2(b) 所示, 出现明显的波峰展宽和分裂, 形成多个能量可比拟的波峰。



(a) Multi-value in FBG-SL1



(b) Multi-peak in the optical spectrum analyzer

图 2 低温反射谱中的异常现象

Fig.2 Abnormal phenomenon in the reflection spectrum of FBGs at the cryogenic temperature

多峰的存在, 使得 FBG 低温应变传感实验无法正常进行。为此, 必须分析其形成机理, 探寻克服多峰的办法。Wu 等人<sup>[7]</sup>在低温实验中也发现了多峰现象, 他们推测, 可能是由于低温下光纤的微缺陷水平发生了变化, 导致其光学性质发生了变化而引起多峰, 并将其列为需进一步研究的课题。按照他们的观点, 低温多峰似乎是 FBG 的内禀性质, 因而基于 FBG 的低温应变测量是不可能按常规方法实现的。

我们探索了多峰形成的力学原因。应用有限元分析表明<sup>[11]</sup>: 悬臂梁从常温冷却到低温以后, 由于光纤、粘胶和金属基底的热膨胀系数不一样, 光纤除经受均匀的收缩应变以外, 还经受由它们相互约束引起的附加热弹性应变, 并且在粘贴长度的中心段较为均匀, 而在两端具有较大的梯度, 即存在一种端部效应。这种强烈的非均匀热弹性应变使得 FBG 栅距变得非均匀出现啁啾化, 这至少是多峰产生的重要原因之一。因此, 为了减少多峰, 应当尽可能降低 FBG 栅区热弹性应变的非均匀性。

端部效应是一种外在的力学效应, 可设法控制其影响, 为此, 采取了多种措施。首先, 将 10 mm 栅长裸 FBG 的粘贴长度加长至栅区长度的 2 倍, 使得栅区落在应变均匀段内, 避开端部效应的影响, 在低温下获得了与常温一样的反射谱, 如图 3 所示; 另外, 采用 15 mm 栅长的涂敷光栅粘贴长度正常(稍大于栅长), 由于涂敷层较软起到过渡层的作用, 降低了光纤中热弹性应变的水平及其非均匀性, 同时栅长增大相对降低了端部效应的影响, 获得了与图 3 相同的正常反射谱。这不仅验证了我们对多峰形成机理的分析, 同时表明非均匀热弹性应变导致的 FBG 啁啾化是低温多峰形成的唯一原因, 从而排除了 FBG

低温光学性质变化引起多峰的可能性。

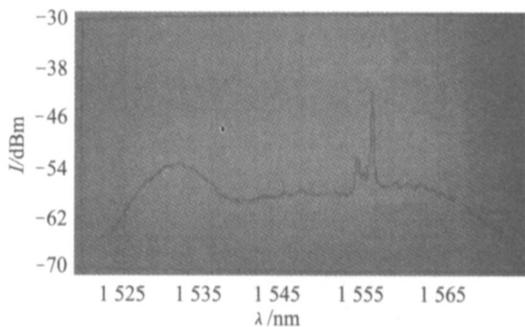


图3 低温正常反射谱

Fig.3 Renormalized reflection spectrum of FBGs at the cryogenic temperature

### 5 应变传感特性

消除了低温多峰后,进行常温和低温下 FBG 的应变传感实验。根据悬臂梁理论,光栅处的应变为

$$= \frac{FL}{EI} \times \frac{h}{2} \quad (4)$$

式中:  $F$  为载荷;  $L$  为加载点至光栅处的距离;  $E$  是梁材料的弹性模量;  $I$  为梁的截面惯性矩,对于矩形截面,  $I = bh^3 / 12$ ,  $b$  是梁宽度,  $h$  为梁的厚度。由此可得到常温和低温下应变与 FBG 中心波长变化的关系曲线如图 4 所示,两者具有良好的线性度,

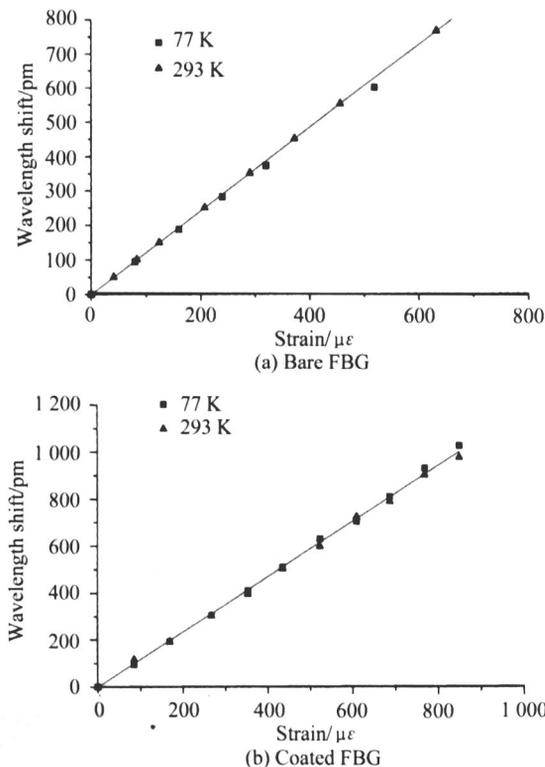


图4 常温和液氮下 FBG 的应变响应

Fig.4 Strain responses of FBGs at the ambient and liquid nitrogen temperatures

并且常温和低温结果几乎相同,表明 FBG 的应变传感特性与环境温度无关。不过,裸 FBG 的  $K$  为  $1.21 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,稍大于涂敷 FBG 的  $1.16 \text{ pm} \cdot \mu\epsilon^{-1}$ ,这是由于涂敷弹性模量较小,降低了结构到光纤的应变传递系数。

### 6 结论

对 FBG 的低温应变测量进行了可行性研究。探索了低温异常反射谱形成的机理,建立了相应的测量技术,获得了 FBG 低温应变传感特性,得到如下结论:

- 1) 低温多峰现象产生于非均匀热弹性应变引起的光栅啁啾化,是一种力学机制而非光学机制;
- 2) 适当加长裸 FBG 的粘贴长度(约栅长 2 倍)或使用栅长较大的涂敷 FBG 可消除低温多峰现象;
- 3) 常温和液氮温度下,FBG 的应变敏感系数相同。

### 参考文献:

- [1] Rao YJ. Recent progress in application of irrfiber Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, **31**:297-324.
- [2] ZHANG Shurlian, Lee S B. Irfiber grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, **32**:405-418.
- [3] YU Xirjuan, XU Yourong, ZHANG Min, et al. Strain and temperature sensing characteristics of FBG packaged by the titanium alloy slice [J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2006, **17** (5):564-567. (in Chinese)
- [4] WANG Werrhua, SONG Shir-e, WANG Xiao-xu, et al. Study on high temperature characteristics of fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser (光电子 · 激光), 2005, **16** (7):806-808. (in Chinese)
- [5] Vetter J, Ries G, Reichert T. A 4-tesla superconducting whole-body magnet for MR imaging and spectroscopy [J]. IEEE Trans Magn, 1998, **24**:1285-1287.
- [6] Prosser W H, Wu M C, Allison S G, et al. Structural health monitoring sensor development at NASA langley research center[A]. International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science 03[C]. 2003, 1-6.
- [7] Wu M C, Prosser W H. Simultaneous temperature and strain sensing for cryogenic applications using dual-wavelength fiber Bragg gratings [A]. SPIE[C]. 2003, 3-8.
- [8] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [9] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
- [10] Othonos A. Fiber Bragg grating[J]. American Institute of Physics, 1997, **68**(12):4309-4341.
- [11] DAI Feng. Research on applications of FBG[D]. Beijing: Institute of Mechanics, CAS, 2004. (in Chinese).

### 作者简介:

黄国君 (1962 - ) 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为材料与结构力学、海洋工程力学和光纤传感技术与结构安全的监测、评估。