

## 一种双包层半径光纤布拉格光栅传感器

周倩, 宁提纲, 温晓东, 李超

(北京交通大学 全光网络与现代通信网重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 光纤布拉格光栅已经成为非常有前景的温度、应力及其它参数测量的传感元件,但其存在温度和应力的交叉敏感问题。提出了一种双包层半径光纤布拉格光栅传感器,将一个布拉格光纤光栅分成两半,各自具有不同的包层半径,其中一半保持不变,另一半包层半径从  $62.5\ \mu\text{m}$  减小到  $40\ \mu\text{m}$ 。实验结果表明,两半光纤布拉格光栅的温度灵敏度均为  $10.4\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ ,而应力灵敏度分别为  $1.12\ \text{pm}/\text{ue}$  和  $3.89\ \text{pm}/\text{ue}$ 。初始的单个布拉格反射峰分裂成两个,分别对温度和应力敏感,而两个反射峰之间的波长差只受应力的影响,随着应力的增加其波长差逐渐增加。因此,通过这一个光纤布拉格光栅即可分辨出温度和应力所引起的布拉格波长漂移。该光纤光栅传感器结构简单、体积小、成本低廉、制作方便,可以广泛应用在各个领域实现温度和应力的同时测量。

**关键词:** 光纤光栅; 光纤光栅传感器; 双包层半径; 温度-应力同时测量

**中图分类号:** TN29    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1024-04

## A fiber Bragg grating sensor for temperature-stress simultaneous measurement

Zhou Qian, Ning Tigang, Wen Xiaodong, Li Chao

(Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Fiber Bragg grating (FBG) has been widely used in many fields for temperature, stress and other parameters measurement, but it has cross-sensitivity problem with temperature and stress. A dual cladding radius fiber Bragg grating sensor was presented, the FBG was divided into two halves which have different cladding radiuses, the cladding radius of one half (FBG<sub>1</sub>) was unchanged, and the cladding radius of the other half (FBG<sub>2</sub>) was decreased from  $62.5\ \mu\text{m}$  to  $40\ \mu\text{m}$ . Experimental results show that, FBG<sub>2</sub> and FBG<sub>1</sub> have same temperature sensitivities which are  $10.4\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ , but FBG<sub>2</sub> and FBG<sub>1</sub> have different stress sensitivities which are  $1.12\ \text{pm}/\text{ue}$  and  $3.89\ \text{pm}/\text{ue}$  respectively, the stress sensitivity of FBG<sub>2</sub> is higher than FBG<sub>1</sub> nearly 3.24 times. The initial single Bragg reflection peak split into two reflection peaks which respectively sensitive to temperature and stress, the wavelength difference between these two peaks only impact on stress. Through this sensor, it can distinguish center reflection wavelength shift caused by temperature and stress. The sensor has simple structure, small size, low-cost, and simple fabrication, and it be can widely used in various fields to achieve simultaneous measurement of temperature and stress.

**Key words:** fiber Bragg grating; fiber Bragg grating sensor; dual cladding radius; temperature-stress simultaneous measurement

收稿日期: 2014-07-15; 修订日期: 2014-08-13

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2011YJS219)

作者简介: 周倩(1986-), 女, 博士生, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: zhouqian0825@126.com

导师简介: 宁提纲(1968-), 男, 教授, 博士, 主要从事光器件、光通信、光纤传感和 ROF 等方向的研究。Email: tgning@bjtu.edu.cn

### 0 引 言

光纤布拉格光栅已经成为非常有前景的应变、温度及其它参数测量的传感元件。但在实际测量中很难将应力和温度变化所引起的光纤 Bragg 光栅的中心反射波长漂移量分辨出来, 必须采取某些措施进行区分或补偿。为了克服这个局限性, 提出了许多方法<sup>[1-7]</sup>。例如双波长光栅, 混合布拉格光栅, 两种材料的光纤光栅, 光纤光栅法布里珀罗腔, 长周期光栅方法, 双直径光纤光栅熔接法等。大多数方法都是基于结合两个光纤光栅或者一个光纤光栅和另一个其他的光纤器件。然而使用超过一个的光纤器件将会增加系统成本, 并会使探测器的探测变复杂。长周期光栅方法则由于光谱带宽范围大, 很难准确测量出波长的微小偏移。双直径光纤光栅熔接法, 对光纤光栅的熔接和制作的工艺要求很高。

文中提出了一种双包层半径光纤布拉格光栅传感器, 将一个布拉格光纤光栅分成两半, 其中一半保持不变, 另一半包层半径变小。实验结果表明, 两半 FBG 具有相同的温度灵敏度和不同的灵敏度, 初始的单个布拉格反射峰被分裂成两个, 分别对温度和应力敏感, 两个反射峰之间的波长差只受所施加的应力的影响。通过测量波长的相对偏移量可以获得应力的变化, 进而考虑绝对偏移量则可以获得温度的变化。该传感器可以实现对温度和应力的同时测量。

### 1 理论分析

双包层半径光纤布拉格光栅的结构如图 1 所示。

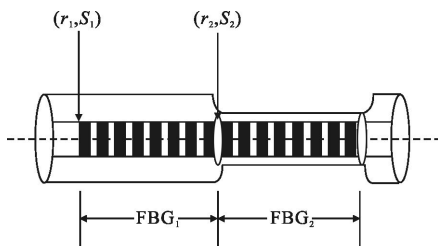


图 1 双包层半径光纤布拉格光栅

Fig.1 Dual cladding radius fiber Bragg grating

将光纤布拉格光栅(FBG)分成两半, 一半(FBG<sub>1</sub>)保持原样不变, 另一半(FBG<sub>2</sub>)用浓度为 40% 的氢氟酸溶液进行腐蚀, 使其包层半径变细。经过化学处理

后, FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 具有了不同的截面积。

根据耦合模理论, 布拉格波长的漂移量表示为:

$$\Delta\lambda_B = [(1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T]\lambda_B \quad (1)$$

式中:  $\Delta\lambda_B$  为布拉格波长漂移量;  $P_e$  为 FBG 的弹光系数;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $\xi$  为热光系数;  $\lambda_B$  为布拉格波长;  $\Delta\varepsilon$  为施加的应变变化;  $\Delta T$  为施加的温度变化。

当应力施加在 FBG 上时, FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 所产生的应变为:

$$\varepsilon_i = \frac{F}{ES_i} \quad i=1, 2 \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{S_1}{S_2} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为施加应力时 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的应变;  $F$  为施加的应力;  $E$  为杨氏模量;  $S_1$  和  $S_2$  为 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的截面积。

根据公式(2), 由于 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 具有不同的截面积, 因此 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的应变也不同。

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (5)$$

式中:  $\Delta l_1$  和  $\Delta l_2$  分别为 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的伸长量;  $l_1$  和  $l_2$  分别为 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的长度。

整个 FBG 的平均应变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{l_1 + l_2} \quad (6)$$

可以得到:

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 + l_2}{l_1 \left( 1 + \frac{S_1 l_2}{S_2 l_1} \right)} \varepsilon \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{l_1 + l_2}{l_2 \left( 1 + \frac{S_2 l_1}{S_1 l_2} \right)} \varepsilon \quad (8)$$

将公式(2)带入公式(1), 在同时施加应力和温度的情况下, FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的布拉格波长漂移量为:

$$\Delta\lambda_{B_i} = \left[ (1 - P_e) \frac{F}{ES_i} + (\alpha + \xi)\Delta T \right] \lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon_i + K_T \Delta T \quad i=1, 2 \quad (9)$$

式中:  $K_\varepsilon$  和  $K_T$  分别为 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的应力灵敏度和温度灵敏度; 由于材料相同, 初始 FBG 的周期相同, 因此对于 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 来说, 温度灵敏度是相同的。

因此, 有:

$$\Delta\lambda_{B_1} = K_\varepsilon \frac{l_1 + l_2}{l_1 \left( 1 + \frac{S_1 l_2}{S_2 l_1} \right)} \varepsilon + K_T \Delta T \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{B_2} = K_\varepsilon \frac{l_1+l_2}{l_2 \left(1 + \frac{S_2 l_1}{S_1 l_2}\right)} \varepsilon + K_T \Delta T \quad (11)$$

波长差为:

$$\Delta\lambda_{B_{12}} = \Delta\lambda_{B_2} - \Delta\lambda_{B_1} = K_\varepsilon \left( \frac{l_1+l_2}{l_2 \left(1 + \frac{S_2 l_1}{S_1 l_2}\right)} - \frac{l_1+l_2}{l_1 \left(1 + \frac{S_1 l_2}{S_2 l_1}\right)} \right) \varepsilon \quad (12)$$

对 FBG 上施加的应力为  $F$  和温度变化量为  $\Delta T$  时, 可以用矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon_1} & K_{T_1} \\ K_{\varepsilon_2} & K_{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (13)$$

因此, 通过矩阵变化可以得到:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{\varepsilon_1} K_{T_2} - K_{\varepsilon_2} K_{T_1}} * \begin{bmatrix} K_{T_2} & -K_{T_1} \\ -K_{\varepsilon_2} & K_{\varepsilon_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

可以简化成:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T (K_{\varepsilon_1} - K_{\varepsilon_2})} * \begin{bmatrix} K_T & -K_T \\ -K_{\varepsilon_2} & K_{\varepsilon_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中的系数均可以由实验数据测试得到, 通过矩阵运算, 可以得到变化的温度和应力值, 实现温度-应力的同时测量。

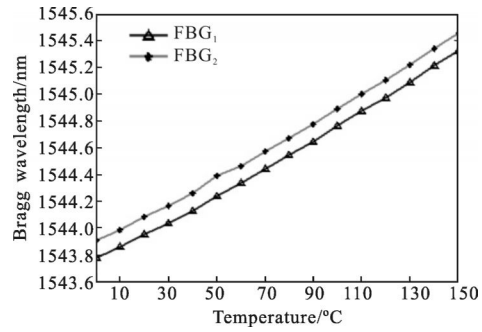
## 2 实验与结果

实验中用 Corning SMF-28 标准单模光纤, 在 248 nm 的紫外光照射下, 采用相位模板法写入光纤布拉格光栅。在 120 °C 恒温箱中进行退火处理 24 h。经过退火处理的光纤布拉格光栅, 其带宽和反射率将不再随温度和时间改变。室温下, 制作好的光纤布拉格光栅中心波长为 1543.951 nm, 反射率为 90%。将制作好的光纤布拉格光栅分成两半, 其中一半保持不变, 另一半浸入浓度为 40% 的 HF 酸溶液中进行腐蚀处理。腐蚀时间为 25 min, 其包层半径从 62.5 μm 减小到 40 μm。

将这两部分 FBG 放入恒温箱进行温度测量, 在 0~150 °C 范围内, 每隔 10 °C 分别观察一次。FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的反射波长随温度升高而增加。测量的 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的温度实验结果如图 2(a) 所示, 实验结果表明, 腐蚀后的 FBG<sub>2</sub> 和保持原样的 FBG<sub>1</sub> 具有相同的温度灵敏度, 均为 10.4 pm/°C。

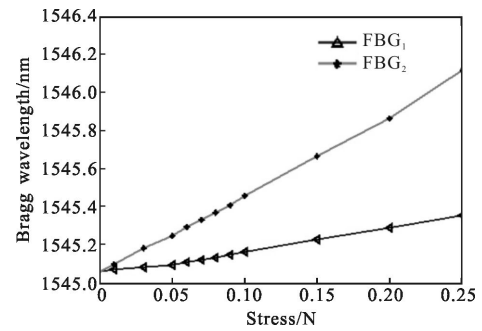
对这两部分 FBG 施加应力, 初始的单个布拉格反射峰分裂成两个, 随着施加应力的增大, 分裂后的反射峰波长也随之增大。测量的 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的应

力实验结果如图 2(b) 所示, 实验结果表明, 腐蚀后的 FBG<sub>2</sub> 和保持原样的 FBG<sub>1</sub> 具有不相同的应力灵敏度, 分别为 3.89 pm/ue 和 1.12 pm/ue, FBG<sub>2</sub> 的应力灵敏度比 FBG<sub>1</sub> 提高了近 3.24 倍。



(a) 温度

(a) Temperature



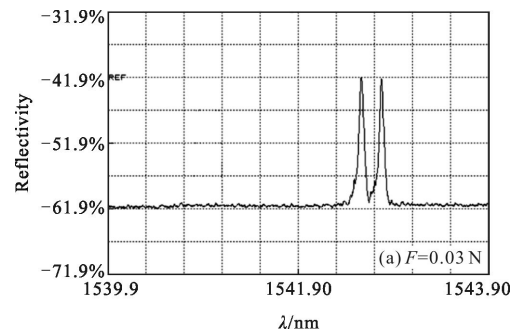
(b) 应力

(b) Stress

图 2 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的温度和应力实验

Fig.2 FBG<sub>1</sub> and FBG<sub>2</sub> temperature and stress experiment

图 3 分别给出了施加应力分别为 0.03 N 和 0.05 N 时, 整个 FBG 的反射谱。可以看出, 初始的布拉格波长反射峰分裂成两个峰, 当施加的应力增大时, 两个反射峰之间的波长差增加。从图 3(a) 看出,  $F=0.03$  N 时, 波长差为 0.2 nm; 从图 3(b) 看出,  $F=0.05$  N 时, 波长差为 0.58 nm。



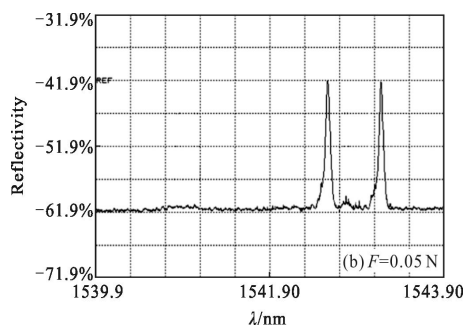


图3 不同应力下 FBG 的反射谱

Fig.3 Spectrums of FBG with different stress

图4给出了应力与两个反射峰波长差之间的关系。从图中可以看出,波长差随着应力的增加而线性增加。这个FBG传感器的应力灵敏度和腐蚀后的FBG<sub>2</sub>的截面积有关,因此可以通过将FBG<sub>2</sub>的半径腐蚀的更细来提高应力灵敏度。但是,半径被腐蚀的越小,FBG能承受的应力则越有限,因此实际测量中,应在灵敏度和应力测量范围之间做好取舍。

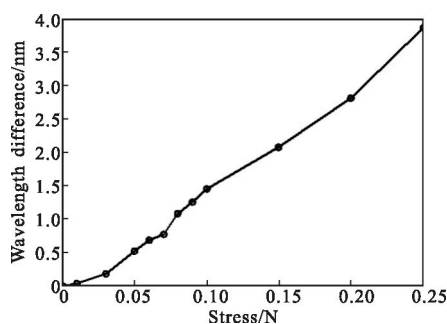


图4 应力与反射峰波长差的关系

Fig.4 Relationship between stress and reflection peak wavelength differences

将实验结果带入公式(15)可得:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{28.808} \begin{bmatrix} 10.4 & -10.4 \\ -3.89 & 1.12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix}$$

这样根据两个反射峰的波长变化量即可获得温度和应力值,实现双参数的同时测量。

### 3 结论

文中提出了一种双包层半径光纤布拉格光栅传感器,将一个布拉格光纤光栅分成两半,各自具有不同的包层半径,其中一半保持不变,另一半包层半径变小。初始的单个布拉格反射峰被分裂成两个,根据这两个反射峰的波长变化量即可获得温度和应力的测量值,即可分辨出温度和应力所引起的布拉格波长漂移,实现温度和应力的同时测量。

### 参考文献:

- [1] Guan Bai'ou, Tam Hwayaw, Ho Siulau, et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a single fiber Bragg grating[J]. *Electron Lett*, 2000, 36(12): 1018-1019.
- [2] Xu Jianbo, Liu Yange, Wang Zhi, et al. Simultaneous force and temperature measurement using long-period grating written on the joint of a microstructured optical fiber and a single mode fiber[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 492-496.
- [3] Alemohammad Hamid -R, Foroozmehr Ehsan, Cotten Bradley -S, et al. A dual-parameter optical fiber sensor for concurrent strain and temperature measurement: design, fabrication, packaging, and calibration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(8): 1198-1204.
- [4] Dong Bo, Hao Jianhong, Liaw Chinyi, et al. Simultaneous strain and temperature measurement using a compact photonic crystal fiber inter-modal interferometer and a fiber Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6232-6235.
- [5] Qiu Weiwei, Cheng Xusheng, Luo Yanhua, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain using a single Bragg grating in a few-mode polymer optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(14): 2419-2425.
- [6] Edmon Chehura, James Stephen -W, Tatam Ralph -P. Temperature and strain discrimination using a single titled fiber Bragg grating[J]. *Opt Commun*, 2007, 275(2): 344-347.
- [7] Shu Xuewen, Zhao Donghui, Zhang Lin, et al. Use of dual grating sensors formed by different types of fiber Bragg gratings for simultaneous temperature and strain measurements[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(10): 2006-2012.