

# 温度影响光纤光栅传感器性能蜕化机理及实验研究

周 丽 梁大开 曾 捷 张晓丽 金 晶

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要** 结构健康监测中, 光纤布拉格光栅(FBG)传感器性能蜕化将会严重影响整个监测系统的稳定性和准确性。而高温、高压等恶劣条件, 均可能导致 FBG 传感器性能蜕化。基于光纤光栅传感器温度传感原理, 分析了温度引起光纤光栅传感器性能蜕化的机理, 并通过软件仿真和相应温度循环实验, 分别考察了温度对不同 FBG 传感器性能蜕化的影响。实验结果表明, 温度对 FBG 传感器性能蜕化的影响与 FBG 传感器自身质量参数有关。对于普通 FBG 传感器, 随着温度循环次数增加, 反射光谱峰值逐渐降低; 而对于刻写完成后, 光纤中仍含有少量氢分子的 FBG 传感器, 随着温度循环次数增加, 反射光谱不仅峰值逐渐降低, 而且中心波长逐渐发生蓝移。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅传感器; 性能蜕化; 温度循环; 结构健康监测

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0405007

## Mechanism and Experimental Research on Performance Degeneration of Fiber Bragg Grating Affected by Temperature

Zhou Li Liang Dakai Zeng Jie Zhang Xiaoli Jin Jing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** In structural health monitoring, performance degeneration of optical fiber Bragg grating (FBG) sensor will seriously affect the whole monitoring system's stability and accuracy. High temperature, high pressure and many other bad conditions may cause FBG sensor performance degeneration. Therefore, in this paper, the theory that fiber Bragg grating sensor performance degeneration caused by temperature is analyzed. Influences of different kinds of FBG sensor on performance degeneration are analyzed quantitatively by numerical simulation and temperature cycling experiment. The experimental results show that performance degeneration of FBG is related to its own reasons. For normal FBG sensors, its peak value of reflective spectrum decreases with the increasing of the cycle numbers. For FBG sensors containing some hydrogen molecules, with the numbers of cycle increasing, its peak value of reflective spectrum decreases, and its central wavelength shifts towards short wavelength.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating sensor; performance degeneration; temperature cycling; structural health monitoring

**OCIS codes** 060.2270; 060.2430; 060.3735; 060.3738

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器由于体积小、重量轻、测量精度高、复用能力强、不受电磁干扰等优点, 在航空航天、桥梁隧道、石油勘探等健康监测领域<sup>[1,2]</sup>得到了广泛应用。在结构健康监测系统中,

传感器作为获取信息的主要工具, 往往位于整个监测系统的最前端, 被埋在结构中。由于结构健康监测系统长期工作在野外, 有可能受到高温、高压、强腐蚀等恶劣环境影响, 性能发生蜕化。FBG 传感器性能蜕化将导致系统采集的数据异常, 无法为安全

收稿日期: 2011-11-08; 收到修改稿日期: 2011-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(51161120326)和江苏省科技计划(BE2011181)资助课题。

作者简介: 周 丽(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感器与结构健康监测等方面的研究。

E-mail: lizhougj@163.com

导师简介: 梁大开(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感器技术及其在智能材料与结构健康监测领域的应用等方面的研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

评价环节提供客观、准确的原始信息,从而使监测系统对监测结果产生错误评判,甚至对结构健康状况发出误报警或是漏报警,最终威胁人民群众的生命财产安全。因此,研究 FBG 传感器性能蜕化特性及影响其性能蜕化的因素,对结构健康监测意义重大。国内外一些研究者对此进行了研究。例如,国内吴俊等<sup>[3,4]</sup>研究了温度对施加不同应变工况的 FBG 传感器性能蜕化特性的影响。国外 Andre 等<sup>[5]</sup>研究了用于实现光学谐振腔中时钟恢复的单个光纤光栅传感器性能蜕化特性。

但目前的研究一般只涉及温度影响 FBG 传感器性能蜕化现象,而未探索温度引起 FBG 传感器性能蜕化的根本原因。因此,本文在前人研究的基础上,首先通过理论分析温度对 FBG 传感器性能蜕化的影响,然后采用 OptiGrating4.2 仿真软件仿真分析了折射率调制深度、纤芯折射率和光栅周期变化对 FBG 传感器反射光谱的影响,最后进行高低温交替循环实验验证,研究 FBG 传感器中氢分子含量对其性能蜕化的影响。

## 2 理论分析及仿真

FBG 传感器是利用光纤材料的紫外光敏性在纤芯形成空间相位光栅,其实质是在纤芯内形成一个窄带的滤波器或反射镜,使得一定波长的光波在该区域发生模式耦合,且传播方式发生改变。其传感原理是环境温度或应力变化引起传感器的中心波长漂移,通过测量中心波长的漂移量,便可相应测得温度或应力的变化量。

### 2.1 FBG 传感器温度传感原理

光纤光栅是光纤纤芯折射率周期性变化而形成

的一种全光纤无源器件。光纤光栅折射率沿轴线分布可表示为<sup>[6]</sup>

$$n(z) = n_{\text{core}} + \delta n(n) \{1 + v \cos[2\pi z / \Lambda(z)]\}, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{core}}$  为光纤纤芯折射率,  $\delta n(n)$  为光纤纤芯折射率变化幅值,  $\Lambda(z)$  为光栅折射率变化周期,  $v$  为调制深度。光栅有效折射率可表示为<sup>[7]</sup>

$$n_{\text{eff}} \approx n_{\text{core}} + \delta n. \quad (2)$$

由耦合模理论, FBG 传感器反射回的中心波长  $\lambda_B$  与光栅周期  $\Lambda$  和有效折射率  $n_{\text{eff}}$  满足关系<sup>[8]</sup>

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \cdot \Lambda. \quad (3)$$

实际生产中,为了提高光纤材料的紫外光敏性,通常在刻栅前要将光纤置于高浓度氢气环境中。由于渗透作用,将有大量氢分子渗入光纤中,使光纤材料的电极化率发生改变,从而引起光纤纤芯折射率变化,达到提高光纤材料紫外光敏性的目的。在光栅刻写完成后,考虑 FBG 传感器的稳定性,需将光纤光栅传感器置于高温条件下退火一定时间,即将光纤中氢分子排出。如果退火时间不够,则仍会有少量氢分子残留在光纤光栅内。当退火不完全的 FBG 传感器工作在高温环境下时,残留在光纤光栅中的氢分子将溢出,引起光纤纤芯折射率降低。根据(2),(3)式知,当光纤纤芯折射率发生变化时,光栅有效折射率发生相应变化,而光栅周期不变时, FBG 传感器反射光谱发生变化。又由(3)式知,当光栅周期变化,而光栅有效折射率保持不变时, FBG 传感器反射光谱也发生变化。

根据耦合模方程得 FBG 反射光谱

$$R(\lambda) = \left\{ \left[ \frac{\pi}{\lambda} \Delta n \left( -\frac{1}{V^2} \right) \right]^2 \cdot \sinh^2(\pi L) \sqrt{\left[ \frac{1}{\lambda} \Delta n \left( 1 - \frac{1}{V^2} \right) \right]^2 - \left( \frac{2n}{\lambda} - \frac{2n}{\lambda_B} \right)^2} \right\} / \left\{ \left( \frac{2n\pi}{\lambda} - \frac{2n\pi}{\lambda_B} \right)^2 \sinh^2(\pi L) \sqrt{\left[ \frac{1}{\lambda} \Delta n \left( 1 - \frac{1}{V^2} \right) \right]^2 - \left( \frac{2n}{\lambda} - \frac{2n}{\lambda_B} \right)^2} + \left[ \frac{\pi}{\lambda} \Delta n \left( 1 - \frac{1}{V^2} \right) \right]^2 - \left( \frac{2n\pi}{\lambda} - \frac{2n\pi}{\lambda_B} \right)^2 \right\} \cosh^2(\pi L) \sqrt{\left[ \frac{1}{\lambda} \Delta n \left( 1 - \frac{1}{V^2} \right) \right]^2 - \left( \frac{2n}{\lambda} - \frac{2n}{\lambda_B} \right)^2}, \quad (4)$$

式中  $L$  为光栅长度,  $n$  为纤芯折射率,  $\Delta n$  为折射率调制深度,  $V$  为光栅结构常数。

根据(4)式得 FBG 峰值反射率<sup>[6,9]</sup>为

$$R_{\text{max}} = \tanh^2 \left\{ \pi L \sqrt{\left[ \frac{1}{\lambda} \Delta n \left( 1 - \frac{1}{V^2} \right) \right]^2} \right\}. \quad (5)$$

分析(5)式, FBG 峰值反射率与光栅长度  $L$ 、折

射率调制深度  $\Delta n$  有关。在光栅刻制完成后,通常认为其栅区长度固定不变,因此 FBG 峰值反射率只与折射率调制深度  $\Delta n$  有关,而能量阱中阳离子总数决定光纤光栅折射率的调制深度。FBG 传感器在刻栅时,由于紫外光作用,光纤光栅中阳离子被激发到呈连续分布的能量阱式能态中,并形成相对应

的阱式能态分布。当 FBG 传感器处于高温条件下时,阳离子吸收能量,当阳离子获得能量足以克服相应的能量壁垒时,阳离子被释放并回到原来位置,导致能量阱中阳离子总数减少,使光纤光栅折射率调制深度变小,而光纤光栅折射率调制深度变化时,FBG 传感器反射谱的峰值反射率将相应发生变化,进而导致 FBG 传感器反射光谱发生变化。

## 2.2 模拟仿真

采用基于光纤光栅耦合模理论的仿真软件 OptiGrating4.2 分别对不同纤芯折射率、不同折射率调制深度和不同光栅周期下的 FBG 传感器反射光谱进行仿真分析。仿真过程所选 FBG 传感器栅区长度均为 10 mm,中心波长均为 1550 nm。当折射率调制深度和光栅周期保持不变,而纤芯折射率改变时的 FBG 传感器反射光谱如图 1 所示。从图中可看出,随着纤芯折射率减小,FBG 峰值反射率降低,中心波长往波长减小方向漂移。

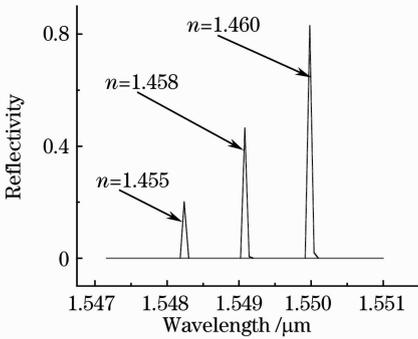


图 1 不同纤芯折射率下 FBG 传感器光谱图  
Fig. 1 Spectral widths under different fiber core index refractives

当纤芯折射率和光栅周期保持不变,而折射率调制深度改变时的 FBG 传感器反射光谱如图 2 所示。从图中可以看出,随着折射率调制深度减小,FBG 峰值反射率降低,光谱谱宽变窄,中心波长基本不变。

当纤芯折射率和折射率调制深度保持不变,而光栅周期改变时,FBG 传感器反射光谱如图 3 所示。从图中可以看出,随着光栅周期减小,FBG 中心波长往波长减小方向漂移,峰值反射率和光谱谱宽基本不变。

## 3 实验研究

### 3.1 实验装置

实验中采用标准单模光纤光栅,在光栅刻写前将光纤先进行载氢预处理后备用。紫外曝光条件为曝光脉冲频率为 35 Hz,每个脉冲的能量密度为

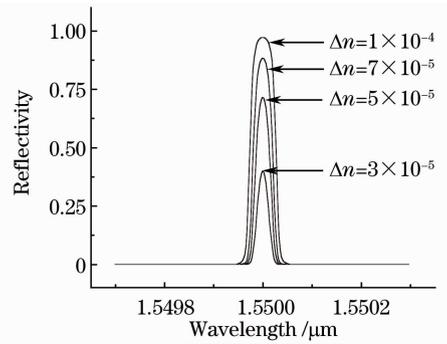


图 2 不同调制深度下 FBG 传感器光谱图  
Fig. 2 Spectral widths under different refractive index modulation depths

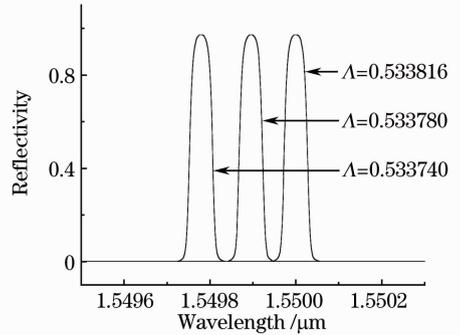


图 3 不同光栅周期下 FBG 传感器光谱图  
Fig. 3 Spectral widths under different grating periods

220 mJ/cm<sup>2</sup>左右,脉冲间隔 18 ns,曝光时间为 22 s,曝光结束后,将光纤光栅置于高温条件下退火,其中 FBG1、FBG2 退火时间为 24 h,FBG3 退火时间为 18 h,FBG4 退火时间为 12 h。FBG1、FBG2、FBG3、FBG4 对应中心波长分别为 1536.090、1538.970、1535.250、1544.915 nm。所选 FBG 传感器栅区长度均为 10 mm。首先将光纤光栅两端用 AB 胶粘贴固定于热膨胀系数远大于光纤光栅的基座上(确保光纤光栅保持水平伸直),然后将粘贴有 FBG 传感器的基座放入烘箱,以 30 °C ~ 130 °C 为一循环周期交替升温 and 降温,记录每次升温到 130 °C 时的光谱图。实验原理如图 4 所示。宽带光源(安捷伦 83437 A)产生,通过 Y 型耦合器(3 dB)一端进入到光纤光栅传感器,入射光线在到达光纤光栅传感器后,经过光

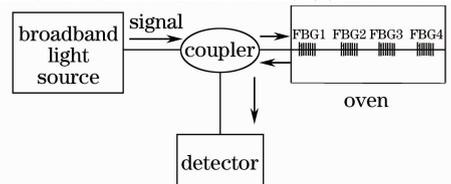


图 4 FBG 传感器传感原理  
Fig. 4 Schematic diagram of FBG sensor setup

栅区的全反射镜作用后形成反射光线,通过 Y 型光纤耦合器另一端进入波长分辨率为 0.05 nm 的 AQ6317C 型光谱仪。实验装置如图 5 所示。

### 3.2 实验结果及分析

退火时间为 24 h 的掺锗 FBG 传感器经过 40 次、50 次、60 次、70 次、80 次、90 次温度循环实验后得到的反射光谱如图 6 所示。由图可看出,随着循环次数增多,FBG 传感器的中心波长基本不变,而反射光谱峰值逐渐降低,带宽逐渐变宽。

图 7 为退火时间为 18 和 12 h 的掺锗 FBG 传感器分别经过 40 次、50 次、60 次、70 次、80 次、90 次温度循环实验后对应的光谱图。由图可看出,随着循环

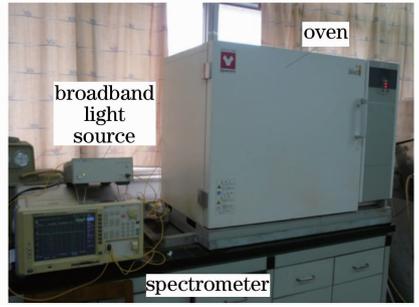


图 5 实验装置图

次数增多,FBG 传感器的反射光谱峰值呈递减趋势,中心波长向波长减小方向漂移,而带宽基本不变。

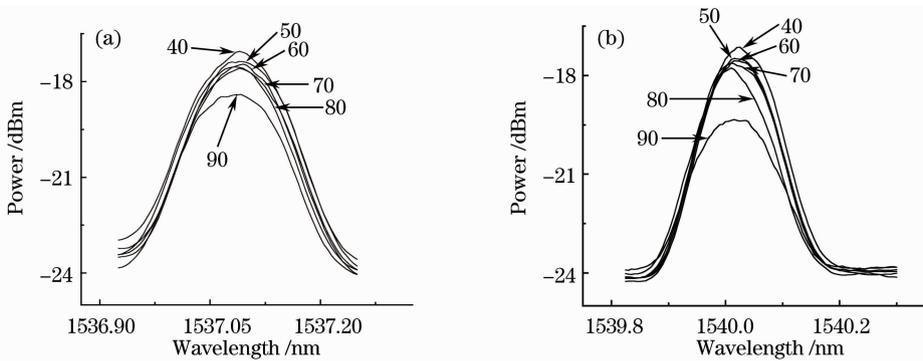


图 6 FBG1 (a)、FBG2 (b) 传感器经过高低温循环实验后的光谱图

Fig. 6 Spectra of FBG1 (a) and FBG2 (b) after cycles

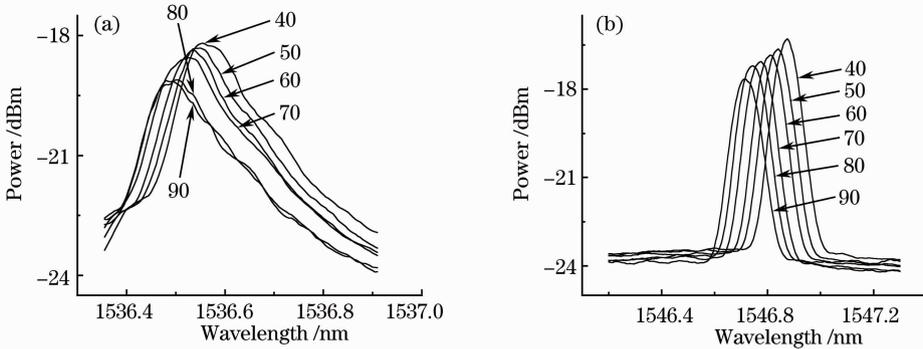


图 7 FBG3 (a)、FBG4 (b) 传感器经过高低温循环实验后的光谱图

Fig. 7 Spectra of FBG3 (a) and FBG4 (b) after cycles

为了更直观地表示温度对 FBG 传感器性能蜕化的影响,表 1 给出了四根 FBG 传感器经过不同温度循环后对应的中心波长值和光功率值。

由表 1 可看出,随着循环次数增多,FBG1、FBG2 传感器中心波长在小范围内左右波动,变化范围约为 10 pm。考虑 FBG 传感器本身工作波长不稳定因素及仪器测量误差原因,可近似认为中心波长保持不变。对照理论分析,认为高温条件没有引起 FBG1、FBG2 传感器纤芯折射率和光栅周期的

改变,否则 FBG1、FBG2 传感器的中心波长将发生漂移。

由表 1 给出的数据画出 FBG1、FBG2 的光功率值与循环次数关系图,如图 8 所示。由图 8 可以看出。FBG1、FBG2 传感器的反射光谱光功率值随循环次数增多呈递减趋势。究其原因,是因为 FBG1、FBG2 传感器同为普通掺锗光纤光栅传感器,高温条件下,其内部阳离子吸收能量逃逸并回到原来位置,导致光纤光栅折射率调制深度降低,引起 FBG

传感器反射光谱的光功率值降低。随循环次数的增加,FBG1、FBG2 传感器的反射光谱光功率变化趋势一致,这进一步证明了 FBG1、FBG2 传感器的反

射光谱的光功率值降低完全是由于光栅折射率调制深度降低引起的。

表 1 FBG 的中心波长值和反射光谱峰值光功率值  
Table 1 Central wavelength and optical power of FBG

Cycles	FBG1		FBG2		FBG3		FBG4	
	Central wavelength /nm	Optical power /dBm						
40	1537.090	-16.992	1540.023	-17.108	1536.556	-18.186	1546.872	-16.248
50	1537.088	-17.369	1540.020	-17.480	1536.544	-18.317	1546.835	-16.595
60	1537.095	-17.452	1540.020	-17.546	1536.534	-18.384	1546.810	-16.852
70	1537.085	-17.513	1540.010	-17.625	1536.527	-18.551	1546.772	-17.023
80	1537.090	-17.624	1540.010	-17.791	1536.511	-19.137	1546.746	-17.178
90	1537.084	-18.404	1540.017	-19.356	1536.496	-19.140	1546.717	-17.598

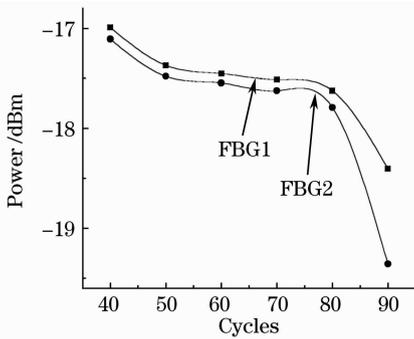


图 8 FBG1、FBG2 传感器光功率值与循环次数的关系

Fig. 8 Optical power and cycle numbers diagram

FBG3、FBG4 的中心波长变化量与循环次数的关系如图 9 所示,其光功率值与循环次数关系如图 10 所示。由图 9 可看出,随着循环次数的增多,FBG3、FBG4 传感器中心波长呈递减趋势,且变化范围较大,最大变化量分别达到 60 pm 和 160 pm。同样地,根据图 10,传感器的反射光谱光功率值随着循环次数的增多而递减。循环 90 次时,FBG 传感器反射光谱与原始反射光谱出现较大偏差,传感器性能严重蜕化。究其原因,是因为 FBG3、FBG4 为退火时间较短的掺锗光纤光栅传感器,首先,FBG3、FBG4 传感器和 FBG1、FBG2 传感器除了退火时间不同,其他生产工艺、所选光纤材料均相同,因此可认为,高温条件对 FBG3、FBG4 传感器的光栅周期没有影响;其次,FBG3、FBG4 传感器同为掺锗光纤光栅传感器,高温条件下,其内部阳离子吸收能量逃逸并回到原来位置,导致光纤光栅折射率调制深度降低,引起 FBG 传感器反射光谱的光功率值降低;最后,由于 FBG3、FBG4 传感器在后期生产过程中,退火不彻底,光纤中残留少量氢分子,在高温条件下,残留氢分子溢出,使得光纤纤芯折射率变

小,从而引起 FBG 传感器有效折射率变小,最终导致光纤光栅传感器的反射光谱发生变化。因此,结合理论分析,可认为 FBG3、FBG4 传感器在高低温循环冲击下出现的反射光谱中心波长蓝移是由于高温条件引起光栅纤芯折射率变小导致的;而光功率值降低则是由高温条件引起光栅纤芯折射率和折射率调制深度变小共同导致的。

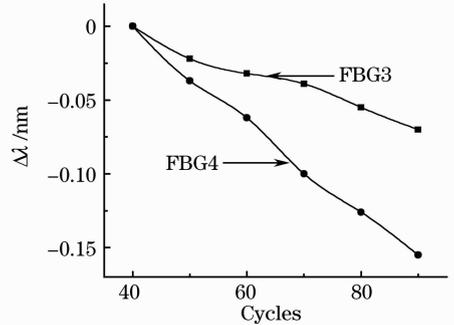


图 9 FBG3、FBG4 传感器中心波长变化量随循环次数变化的关系

Fig. 9 Changes of central wavelength against cycle numbers

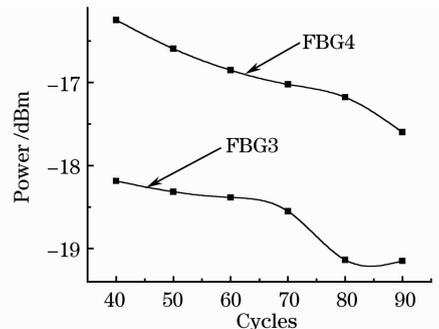


图 10 FBG3、FBG4 传感器光功率值随循环次数的关系

Fig. 10 Optical power against cycle numbers

图 9、10 中,FBG3、FBG4 的变化曲线并不平行,是由于 FBG3、FBG4 退火时间不同,光纤中氢分子含量不同而造成的,相对于 FBG4,FBG3 退火时间较长,光纤中剩余氢分子相对较少,因此,在高温条件下,氢分子逃逸速度相对较慢,纤芯有效折射率变化就相对平缓,所以 FBG3 传感器的中心波长变化和反射谱的光功率值变化相对于 FBG4 传感器较平缓。

## 4 结 论

从 FBG 传感器温度传感原理出发,分析温度影响光纤光栅性能蜕化的机理,采用 OptiGrating4.2 仿真软件对不同折射率调制深度、不同纤芯折射率和不同光栅周期下 FBG 传感器的反射光谱进行了仿真分析,并对两种不同 FBG 传感器进行高低温循环实验验证。实验结果表明,高低温循环引起光纤光栅传感器性能蜕化现象与其自身质量参数有关,对于普通掺锗光纤光栅传感器,高温条件下,光纤光栅传感器中阳离子获得能量逃逸,导致光纤光栅折射率调制深度降低,引起光纤光栅传感器反射光谱峰值降低;而对于退火时间相对较短的掺锗光纤光栅传感器,一方面,高温条件导致光栅折射率调制深度变小,引起光纤光栅传感器反射光谱峰值降低;另一方面,高温条件又导致光纤纤芯折射率变小,同时引起光纤光栅传感器反射光谱峰值降低,中心波长往波长减小方向漂移。

## 参 考 文 献

1 Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105004

- 张晓丽, 梁大开, 芦吉云等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105004
- 2 Li Kuo, Zhou Zhen'an, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249~251
- 李 阔, 周振安, 刘爱春等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 249~251
- 3 Wu Jun, Chen Weimin, Zhang Yaling *et al.*. Affect mechanism and experimental research on performance degeneration of FBG under the action of alternate temperature test[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(9): 1301~1305
- 吴 俊, 陈伟民, 张娅玲等. 交替温度对 FBG 性能蜕化的影响机理及试验研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(9): 1301~1305
- 4 Zhang Yaling, Chen Weimin, Zhang Peng. Study on the degeneration of FBG sensing system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(10): 1302~1306
- 张娅玲, 陈伟民, 章 鹏. 光纤 Bragg 光栅传感系统性能蜕化的研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(10): 1302~1306
- 5 P. S. Andre, A. L. Teixeira, M. J. N. Lima *et al.*. Single fiber Bragg grating degenerated into optical cavity resonators for clock recovery purposes [C]. *Proceeding of IEEE*, 2005, 341~342
- 6 Wang Hongbo, Pu Tao, Lu Lin *et al.*. Research on achieving arbitrary phase shifts in fiber Bragg grating by changing refractive index of fiber directly[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0606005
- 王宏博, 蒲 涛, 卢 麟等. 直接改变光纤折射率实现任意相移光栅的方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0606005
- 7 Li Jianzhi, Jiang Desheng. Hydrogen loading and photolytic index changes in germanosilicate fiber[J]. *J. Inorganic Materials*, 2006, **21**(2): 345~350
- 李剑芝, 姜德生. 载氢与掺锗石英光纤的光致折射率改变[J]. *无机材料学报*, 2006, **21**(2): 345~350
- 8 Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Zhao Jianlin *et al.*. Temperature insensitive acceleration sensing technology based on  $\pi$  phase of double fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205006
- 刘钦朋, 乔学光, 赵建林等. 双光栅  $\pi$  相位差温度不敏感加速度传感技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205006
- 9 Zhou Changzun, Chen Yang, Peter Kung. Research on thermal stability of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 434~437
- 周长尊, 陈 阳, Peter Kung. 布拉格光纤光栅热稳定性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 434~437