

纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性

丁旭东¹, 张钰民¹, 宋言明¹, 杨润涛¹, 祝连庆^{1,2,3}

¹北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

²北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192;

³北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192

摘要 针对高温条件下应变测量受限问题,对飞秒脉冲激光刻写的 II 型纯石英芯光纤光栅(FBG)的温度及应变特性进行了研究。实验结果表明,纯石英芯 FBG 在 20~1000 °C 温度范围内表现出良好的线性度,相关系数为 0.9996,温度灵敏度为 14.07 pm/°C;纯石英芯 FBG 在 400 °C 及以下的高温环境中加载均匀应变时表现出良好的波长稳定性,温度超过 500 °C 时的应变加载导致光纤伸长,引起中心波长的红移。

关键词 光纤光栅; 纯石英芯光纤光栅; 应变加载; 高温

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1106003

Response Characteristics of Pure-Quartz-Core Fiber Bragg Grating Under High Temperature Strain

Ding Xudong¹, Zhang Yumin¹, Song Yanming¹, Yang Runtao¹, Zhu Lianqing^{1,2,3}

¹Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

²Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

³Beijing Key Laboratory of Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract In order to solve problem of the strain measurement limitation under high temperature, the temperature and strain characteristics of the type II pure-quartz-core fiber Bragg grating (FBG) written by femtosecond pulse laser are studied. Experimental results show that when the temperature is ranging from 20 °C to 1000 °C, the pure-quartz-core FBG exhibits good linearity with the correlation coefficient of 0.9996 and the temperature sensitivity of 14.07 pm/°C. When the temperature is under 400 °C, the pure-quartz-core FBG exhibits good wavelength stability under the uniform strain. When the temperature is above 500 °C, the strain loading leads to fiber elongation and the red shift of the center wavelength.

Key words fiber Bragg grating; pure-quartz-core fiber; strain loading; high temperature

OCIS codes 060.2270; 060.2370; 060.2430; 060.2400

1 引言

光纤光栅(FBG)传感器以其高灵敏度和高稳定性,成为结构健康监测的理想传感元件,在健康监测领域备受青睐^[1-3]。光纤传感器具有抗电磁干扰、体积小、重量轻、可多路复用等诸多优点^[4-6],因此非常适用于在

收稿日期: 2017-05-16; 收到修改稿日期: 2017-06-26

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT1212)、北京市教委 2015 年度创新能力提升计划(TJSHG201510772016)

作者简介: 丁旭东(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感及封装技术方面的研究。

E-mail: xudong2011@163.com

导师简介: 祝连庆(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、光纤激光器及光电精密测试技术等方面的研究。E-mail: zhulianqing@sina.com(通信联系人)

恶劣环境中对温度、应变、压力、振动等多种物理量的实时监测。

在军事领域以及航空航天领域,需要在高温条件下进行应变或者温度监控,如飞机发动机、热保护材料等^[7-9]。紫外光刻写的 I 型 FBG 传感器的折射率调制强度低,在高温情况下会发生衰退,当温度过高(大于 350 °C)时,FBG 的永久性折射率变化会被完全擦除^[10-11],无法在更高温度条件下正常工作,具有一定局限性。目前国内外对于高温环境中测量应变的 FBG 传感器的研究相对较少,主要有蓝宝石 FBG 传感器^[12-13]、热再生 FBG 传感器^[14]以及 II 型 FBG 传感器^[15]。蓝宝石光纤自身的生长方式使其不支持单模传输,且纤芯外没有包层,反射光谱质量较差,难以实现波分复用^[16];热再生 FBG 需要在刻写后进行高温退火,且退火之后光纤非常脆弱,反射率低^[17-18],这对高温恶劣环境下的测量精度造成了严重的影响,制约了其实际应用。飞秒脉冲激光刻写的 II 型 FBG 传感器具有较大的折射率调制深度,反射率较高,在 1000 °C 温度下长期稳定,成为国内外高温传感领域的研究热点^[19-22],但多数情况下用于温度传感,关于其在高温环境下的应变特性研究较少。

本文针对高温条件下纯石英芯 FBG 的应变测量受限问题,对高温条件下纯石英芯 FBG 的温度及应变特性进行了研究。在 20~1000 °C 温度范围内,对未封装的纯石英芯 FBG 进行了温度标定实验及结果分析,II 型 FBG 在大温度范围内表现出了良好的温度稳定性及线性度,其相关系数为 0.9996。当温度高于 300 °C 时,对 II 型 FBG 的应变响应特性进行了实验研究,对其施加 1000 $\mu\epsilon$ 应变,研究不同温度下中心波长的稳定性。实验结果表明,施加 1000 $\mu\epsilon$ 应变时,未封装的纯石英芯 FBG 适用于 400 °C 及以下的高温环境,且在高温环境下具有良好的波长稳定性。

2 FBG 传感原理

根据 FBG 的耦合模理论^[23],一定周期的 FBG 可以将导模耦合到相反方向的导模中^[24]。FBG 的反射峰值波长满足

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

式中 n_{eff} 为纤芯折射率, Λ 为光栅的调制周期。不考虑应变与温度的耦合作用,FBG 的波长随温度和所受应变的变化关系为

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 + k)\Delta\epsilon, \quad (2)$$

式中 $d\lambda_B$ 为波长变化, $\alpha = d\Lambda/(\Lambda dT)$ 为热膨胀系数, $\xi = dn_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}} dT)$ 为热光系数, k 为与光纤材料的光弹系数有关的光纤应变系数,即

$$k = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (3)$$

式中 p_{11} 和 p_{12} 为光弹常数, ν 为光纤的泊松比。对于纯石英光纤, $\alpha \approx 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\xi \approx 8.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$, $\nu = 0.17$, $n_{\text{eff}} = 1.456$ 。当 FBG 的中心波长为 1538 nm 时,FBG 的温度灵敏度约为 13.62 pm/°C,应变灵敏度为 1.20 pm/ $\mu\epsilon$ 。但是由于光纤、刻写光纤的方式及退火方式的不同,FBG 的传感灵敏度性能也会不同^[25]。

3 实验设备及技术方案

为了测试纯石英芯 FBG 传感器在高温时的应变传感特性,搭建了如图 1 所示的实验系统,宽带光源产生的宽带光经环行器及 3 dB 耦合器入射到传感光纤中。FBG 传感器的反射光再经过 3 dB 耦合器分别进入解调仪和光谱分析仪,对中心波长进行监测。纯石英芯 FBG 的两端通过夹具固定并保持水平,将其置于高温箱内。实验中采用 BaySpec 解调仪,其解调范围为 1525~1565 nm,分辨率为 1 pm;光谱分析仪(型号 AQ6370D, YOKOGAWA 公司,日本)的分辨率为 0.02 nm;高温实验箱型号为 TMX-12L-12,其额定温度为 1100 °C,精度为 $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

首先,选取 800 nm 红外飞秒激光刻写的 FBG,所采用的光纤为纯石英芯单模光纤(型号 SM1500SC(7/125)P, Fibercore 公司,英国),其涂覆层为聚酰亚胺,对中心波长为 1540 nm 的 FBG 进行无应变时的温度耐

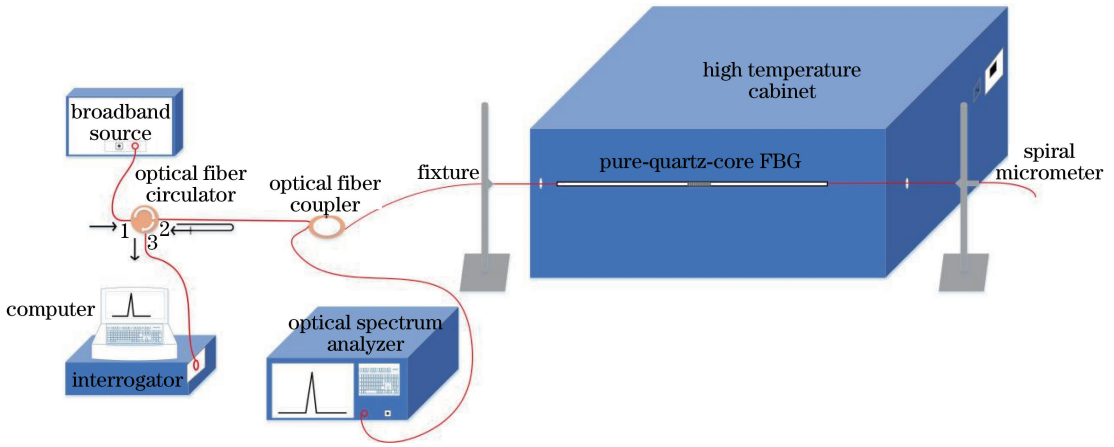


图 1 FBG 传感器高温应变特性的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for high temperature strain characteristics of FBG sensor

受性实验,将光纤的一端固定,另一端处于松弛状态,利用光谱仪和解调仪分别记录中心波长。将高温箱初始温度设定为 100 °C,每隔 5 min 记录一次中心波长并连续采集 65 min;以 100 °C 的温度间隔逐步将温度提升至 1000 °C 并记录数据。

取中心波长为 1538 nm 的 FBG 并使其处于松弛状态,利用光谱仪和解调仪分别记录中心波长。利用夹具将光纤两端夹紧,确保 FBG 位于高温箱的中心位置,并微调螺旋微分头使光纤处于预拉紧状态,应变加载值为 1000 $\mu\epsilon$ 。设定高温箱初始温度为 300 °C,温度稳定后利用光谱仪和解调仪分别记录该温度下的中心波长值,随后每隔 5 min 记录一次中心波长并连续采集 65 min。以 100 °C 的升温间隔步进设定温度值,用同样的方法在设定值处进行中心波长等时间间隔采集,最高温度设定值为 800 °C。

4 实验结果与分析

4.1 高温条件下温度响应特性分析

不考虑应变时,选取 1000 °C 时的数据,绘制中心波长随时间变化的光谱图,如图 2 所示,当温度保持在 1000 °C 时,由图 2(a)可知,FBG 中心波长随时间的变化量较小,最大变化量仅为 8 pm,光谱没有出现退化和啁啾现象;由图 2(b)可知,随着时间的推移,3 dB 带宽和边模抑制比(SMSR)变化量较小,保持在动态平衡范围内,这说明未对该纯石英芯 FBG 施加应变时,FBG 可在超高温条件下正常工作。

根据实验数据,绘制不同温度条件下未施加应变时 FBG 中心波长随温度变化的曲线图,如图 3 所示。

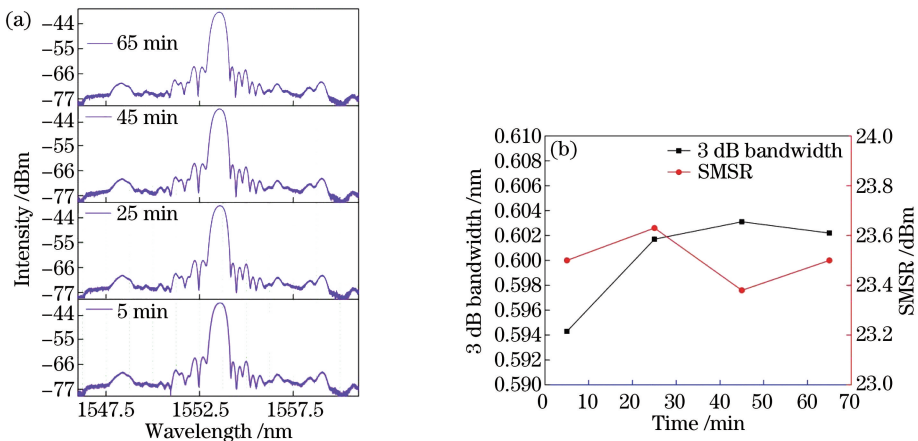


图 2 (a) 1000 °C 时 FBG 中心波长随时间的变化;(b) 3 dB 带宽与 SMSR 随时间的变化

Fig. 2 (a) Variation in central wavelength of FBG with time at 1000 °C ;

(b) variations in 3 dB bandwidth and SMSR with time

从图中可以看出,随着温度的增加,FBG 传感器的中心波长向波长增大的方向漂移,中心波长与温度呈现良好的线性关系,并且具有良好的温度灵敏度,其相关系数为 0.9996,温度灵敏度为 14.07 pm/°C。可以看出,在 100~1000 °C 范围内,FBG 的温度灵敏度系数为常数,能够实现 1000 °C 以下的温度测量。

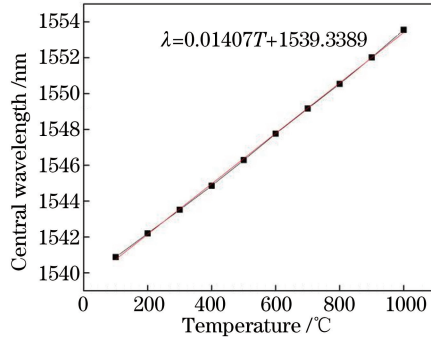


图 3 中心波长随温度的变化

Fig. 3 Variation in central wavelength with temperature

4.2 高温条件下应变响应特性分析

根据实验数据,在 300 °C 时施加 1000 $\mu\epsilon$ 后,绘制不同温度条件下中心波长随时间的变化曲线。图 4 为 300 °C 与 400 °C 时中心波长改变量 $\Delta\lambda$ 随时间的变化。由图 4 可知,300 °C 时施加 1000 $\mu\epsilon$ 应变后,当温度从 300 °C 升高至 400 °C 时,纯石英芯 FBG 长时间表现出良好的温度稳定性,中心波长变化量较小,最大变化量为 12 pm,这是由高温箱内的温度波动及光谱仪 0.02 nm 的分辨率引起的。

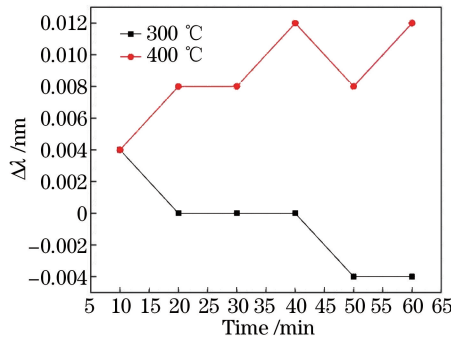


图 4 300 °C 与 400 °C 时 $\Delta\lambda$ 随时间变化

Fig. 4 Variation in $\Delta\lambda$ at 300 °C and 400 °C with time

在 500~800 °C 温度范围内, $\Delta\lambda$ 随时间的变化如图 5 所示,当温度升高并保持在 500 °C 时,随着时间的推移,中心波长变化量较大,最大变化量为 24 pm,并且中心波长先向短波方向漂移再向长波方向漂移。当温度超过 500 °C 时,FBG 的中心波长一直缓慢增大,当温度升高并保持在 800 °C 时,在 60 min 内中心波长的最大变化量为 1004 pm,并且中心波长随着时间的推移仍向长波方向漂移,其波长稳定性较差。

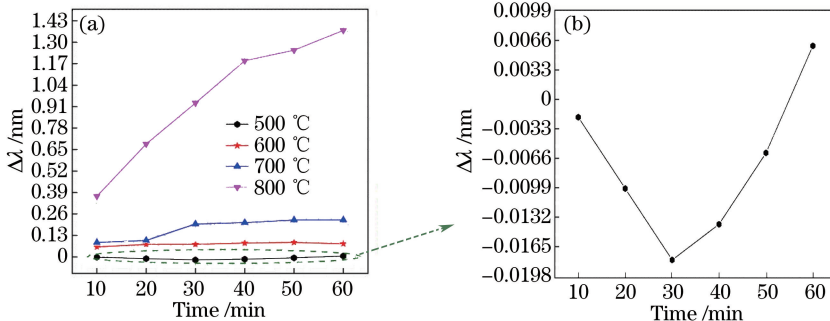


图 5 (a) 500 °C~800 °C 范围内 $\Delta\lambda$ 随时间的变化;(b)图 5(a)的部分放大图

Fig. 5 (a) Variation in $\Delta\lambda$ with time in 500-800 °C; (b) partial enlarged view of Fig. 5(a)

分别选取温度为 300, 400, 500 °C 时的数据, 绘制中心波长随时间变化的光谱图。如图 6(a)、(b) 所示, 当温度保持在 300 °C 和 400 °C 时, FBG 中心波长随时间的变化量较小, 最大变化量仅为 12 pm。如图 6(c) 所示, 当温度保持在 500 °C 时, FBG 中心波长随时间的变化量增大, 最大变化量为 24 pm。纯石英芯 FBG 在高温条件下的光谱图一致性较好, 光谱没有出现退化和啁啾现象。

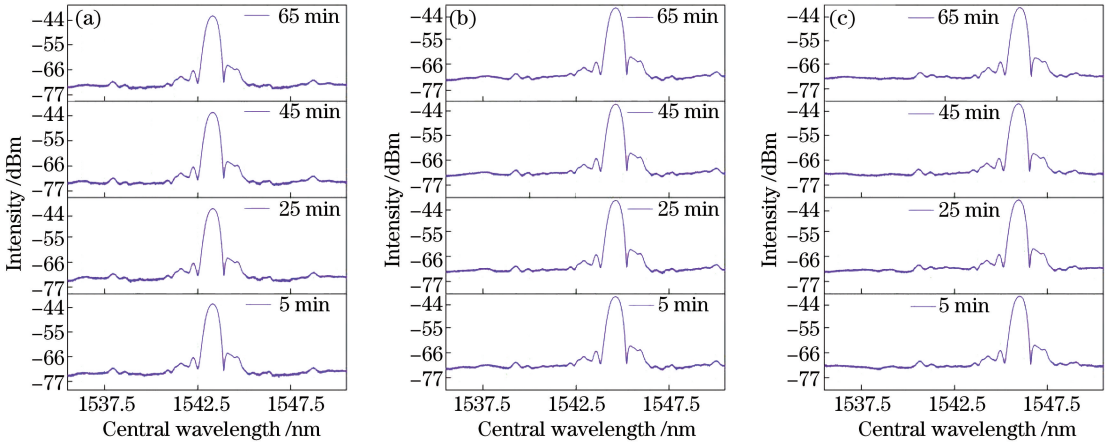


图 6 不同温度下 FBG 中心波长随时间的变化。(a) 300 °C ;(b) 400 °C ;(c) 500 °C

Fig. 6 Variation in central wavelength of FBG with time at different temperatures. (a) 300 °C ; (b) 400 °C ; (c) 500 °C

图 7 为不同温度条件下 FBG 的 3 dB 带宽与 SMSR 随时间变化的曲线图。如图 7(a)、(b) 所示, 随着时间的推移, 3 dB 带宽和 SMSR 的变化量较小, 保持在动态平衡范围内。由图 7(c) 可知, 随着时间的推移, 500 °C 时 3 dB 带宽和 SMSR 比 400 °C 时变化大, 3 dB 带宽的变化量为 9.4 pm, SMSR 的变化量为 0.62 dBm。

在 300 °C 时给光纤施加 300 $\mu\epsilon$ 应变, 根据实验数据, 绘制 600, 700, 800 °C 时 $\Delta\lambda$ 随时间的变化曲线图, 如图 8 所示。由图 8 可知, 当温度保持在 600 °C 和 700 °C 时, 随着时间的推移, 中心波长的变化保持在动态

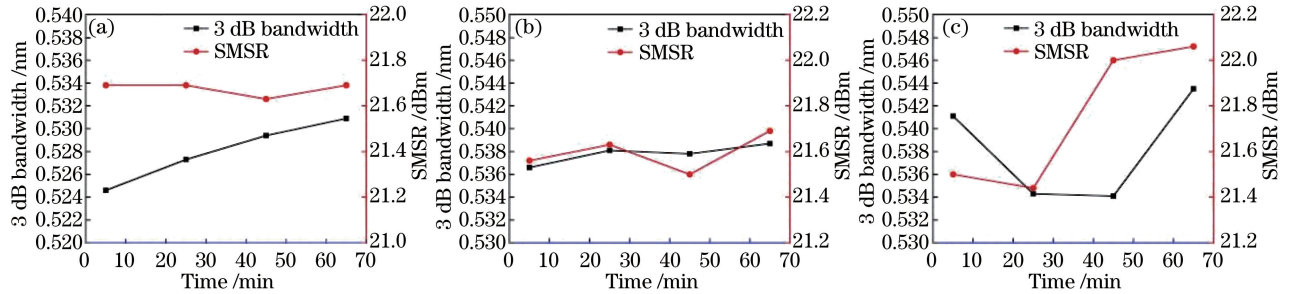


图 7 不同温度下 FBG 的 3 dB 带宽与 SMSR 随时间的变化。(a) 300 °C ;(b) 400 °C ;(c) 500 °C

Fig. 7 Variations in 3 dB bandwidth of FBG and SMSR at different temperatures. (a) 300 °C ; (b) 400 °C ; (c) 500 °C

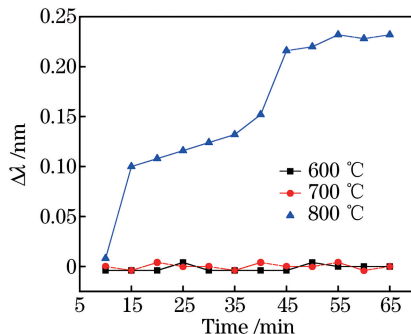


图 8 600~800 °C 时 $\Delta\lambda$ 随时间的变化

Fig. 8 Variation in $\Delta\lambda$ with time in 600-800 °C

平衡范围内,中心波长变化量较小,最大变化量为 8 pm;当温度升高并保持在 800 °C 时,在 60 min 内中心波长最大变化量为 224 pm,并且随着时间的推移,中心波长仍向长波方向漂移,其波长稳定性较差。相比于加载 300 $\mu\epsilon$ 应变,施加 1000 $\mu\epsilon$ 应变时中心波长红移更加明显。

由上述实验结果可知,当温度超过 500 °C 时未封装的纯石英芯 FBG 难以实现对应变的准确测量,且当应变撤去后,FBG 的中心波长难以恢复到初始位置。随着温度的升高,当温度稳定时,FBG 中心波长不断红移,由(1)式可得,当温度稳定时,光纤受到的应变作用导致纤芯折射率降低,因此光栅的调制周期增大是中心波长红移的主要因素。高温下的应变加载导致光纤伸长,由于在光纤制备过程中,纤芯与包层之间存在应力,纤芯受到压应力,在高温下加载应变时纤芯变软,导致纤芯中的栅距增大,进而引起中心波长红移^[26]。FBG 在 400~500 °C 时接近纯石英光纤的相变温度,使得光纤本身的物理性质发生改变^[27]。纯石英芯光纤的玻璃包层中掺杂有少量的氟元素,降低了光纤在高温条件下的应变耐受性,应变的作用导致光纤的伸长^[28]。该研究进一步加深了对 FBG 高温应变测量的认识。

5 结 论

对在高温条件下纯石英芯 FBG 的温度特性和应变特性进行了研究。对纯石英芯 FBG 在 20~1000 °C 温度范围内的温度传感特性进行研究,得到相关系数为 0.9996,温度灵敏度为 14.07 pm/°C。在相同应变加载条件下,对不同温度下 FBG 中心波长的稳定性进行了实验研究。结果表明,在 400 °C 及以下的高温环境中,未封装的纯石英芯 FBG 表现出良好的波长稳定性,温度超过 500 °C 时的应变加载引起中心波长的不断红移。因此,对未封装的纯石英芯 FBG 施加 1000 $\mu\epsilon$ 应变时,只适用于 400 °C 的高温情况。将 FBG 应用在超高温应变领域时,需考虑合理的传感器封装形式。

参 考 文 献

- [1] Kinet D, Goossen K W, Goossen K W, *et al.* Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [2] Jia Ziguang, Ren Liang, Li Hongnan, *et al.* Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1298-1303.
贾子光, 任亮, 李宏男, 等. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1298-1303.
- [3] Yue Yin, Wang Yuan, Duan Jianli, *et al.* Experimental study on fiber Bragg grating monitoring the crack of CFRP concrete composite arch[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0805004.
岳音, 王源, 段建立, 等. 光纤光栅 CFRP 混凝土复合拱裂缝监测实验研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805004.
- [4] Hill K O, Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [5] Qi Yuefeng, Li Cailing, Jiang Peng, *et al.* Spectral shape multiplexing technology of fiber Bragg gratings using simulated annealing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906004.
齐跃峰, 李彩玲, 江鹏, 等. 利用模拟退火算法研究光纤布拉格光栅的光谱形状复用技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0906004.
- [6] Zhang Z Y, Yan L S, Pan W, *et al.* Sensitivity enhancement of strain sensing utilizing a differential pair of fiber Bragg gratings[J]. *Sensors*, 2012, 12(4): 3891-3900.
- [7] Yu Xiujuan, Yu Youlong, Zhang Min, *et al.* Applications of fiber Bragg grating sensor for aerospace composite and structures health monitoring[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(1): 1-3.
于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 光纤光栅传感器在航空航天复合材料/结构健康监测中的应用[J]. *激光杂志*, 2006, 27(1): 1-3.
- [8] Zhao Lina, He Pingzhao, Xing Shugen, *et al.* Strain measurement of carbon/carbon composites at high temperatures by digital speckle correlation method[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014, 37(5): 729-733.
赵丽娜, 贺平照, 邢树根, 等. 基于数字散斑技术的炭/炭复合材料高温应变测量[J]. *固体火箭技术*, 2014, 37(5): 729-733.
- [9] Zhang S J, Liu Y M. Fabrication of FBG strain gauge used for high temperature strain monitoring[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 668: 920-923.

- [10] Baker S R, Rourke H N, Baker V, *et al.* Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1470-1477.
- [11] Zhou Li, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.* Mechansim and experimental on performance degeneratio of fiber Bragg grating affected by temperature[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405007.
周丽, 梁大开, 曾捷, 等. 温度影响光纤光栅传感器性能蜕化机理及实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405007.
- [12] Habisreuther T, Elsmann T, Graf A, *et al.* High-temperature strain sensing using sapphire fibers with inscribed first-order Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 15953741.
- [13] Xiao H, Deng J, Pickrell G, *et al.* Single-crystal sapphire fiber-based strain sensor for high-temperature applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(10): 2276-2283.
- [14] Xie W, Meng S, Jin H, *et al.* Measurement of the high-temperature strain of UHTC materials using chemical composition gratings[J]. *Measurement Science & Technology*, 2016, 27(5): 055101.
- [15] Fielder R S, Stinsonbagby K L, Palmer M E. Harsh-environment fiber optic sensors for structural monitoring applications[C]. *SPIE*, 2004, 5388: 399-409.
- [16] Wu Tian, Sui Guanghui. Research on manufacture of sapphire fiber grating used in high-temperature measurement[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2015, 35(6): 10-13.
吴天, 隋广慧. 用于高温测量的蓝宝石光纤光栅的制备研究[J]. *计测技术*, 2015, 35(6): 10-13.
- [17] Wang T, Shao L Y, Canning J, *et al.* Temperature and strain characterization of regenerated gratings[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 247-249.
- [18] Bandyopadhyay S, Canning J, Biswas P, *et al.* A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1198-1206.
- [19] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, *et al.* Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2505-2507.
- [20] Martinez A, Khrushchev I Y, Bennion I. Thermal properties of fibre Bragg gratings in scribed point-by-point by infrared femtosecond laser[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(4):176-178.
- [21] Mihailov S J, Smelser C W, Grobnc D, *et al.* Bragg gratings written in all-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 94-100.
- [22] Groothoff N, Canning J. Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2360-2362.
- [23] Li K, Zhou Z, Liu A C. A high sensitive fiber Bragg grating cryogenic temperature sensor[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(2): 121-123.
- [24] Tanaka Y, Ogata M, Nagashima K, *et al.* Experimental investigation of optical fiber temperature sensors at cryogenic temperature and in high magnetic fields[J]. *Physica C: Super conductivity & Its Applications*, 2010, 470(20): 1890-1894.
- [25] Gu Y J, Yun B F, Wang Y P, *et al.* Studies on thermal decay of fiber Bragg gratings[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2007, 30(6): 2262-2264.
- [26] Canning J, Cook K, Shao L Y, *et al.* Regeneration of fiber Bragg gratings under strain[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(10): 2080-2085.
- [27] Lancry M, Cook K, Poumellec B, *et al.* Investigation of structural glass relaxation in regenerated fiber Bragg gratings [C]. *Australian Conference on Optical Fiber Technology*, 2016: JT4A.27.
- [28] Dianov E M, Mashinsky V M. Germania-based core optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3500-3508.