

# 不同环境氛围高温再生光纤光栅温度特性研究

孙亚丽<sup>1</sup>, 田 婧<sup>1</sup>, 张钰民<sup>2</sup>, 姚霖峰<sup>1</sup>, 吕 峥<sup>1</sup>, 祝连庆<sup>1,2,3\*</sup>

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. 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:** 环境氛围对再生光纤光栅的温度特性有直接影响,文中将不同的环境氛围引入高温再生光纤光栅的制作过程,分析了 850 °C 高温退火温度下光栅中心波长随时间的演化规律,获取了种子光栅擦除与再生光栅的生长特点。以紫外激光刻写的光纤光栅作为种子光栅,光纤涂覆层为聚酰亚胺,对比分析空气和氮气作为环境氛围的再生光纤光栅的性能。两种再生光纤光栅的反射率相差不大,然而在 350~750 °C 升降温循环下,氮气环境氛围下的再生光纤光栅具有较好的温度稳定性,在 700 °C 时其测温精度可达±2.9 °C。氮气环境氛围条件下制备的再生光纤光栅有助于提升其稳定性及测量精度,在高温测量领域具有潜在的应用前景。

**关键词:** 再生光纤光栅; 环境氛围; 高温退火; 稳定性; 重复性

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230229

## 0 引 言

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感不受光源功率波动及耦合损耗的影响,具有抗干扰、可多路复用的优点<sup>[1]</sup>。FBG 传感器因其质量轻、体积小、耐腐蚀、可灵活部署等特点,在辐射、化学腐蚀、电磁干扰等航空航天、石油化工、能源开采等领域的诸多苛刻环境下的结构健康监测发挥了重要作用<sup>[2-3]</sup>。而传统的 I 型 FBG 在高于 300 °C 的环境下,反射率逐渐降低,不适于更高温度下的传感和监测任务<sup>[4]</sup>。为此,国内外科研人员研究了多种耐高温的 FBG 制备方法,包括型 II 型 FBG、II A 型 FBG 和再生光纤光栅 (Regenerated Fiber Bragg Grating, RFBG) 以提升 FBG 的耐高温性能。其中, RFBG 因其制作简单、成本低廉、高温性能良好等优势受到广泛关注,它是对 I 型 FBG 进行高温退火处理,光栅经历擦除并重新生长出来的一种 FBG。

RFBG 经过高温热处理其耐温特性优异,尽管其

成栅机理目前尚不明确,但这并不影响其在高温传感领域的应用,仍旧是高温 FBG 的重要关注点<sup>[5-9]</sup>。2002 年,瑞典科学家 Fokine 等采用高温热处理的方法首次利用化学合成的 FBG 制备出 RFBG<sup>[10]</sup>。2015 年, Holmberg 等在进行高温热再生实验时,发现其再生温度阈值为某个温度区间,且再生过程中光纤的 H、O 元素可以提升再生温度<sup>[11]</sup>。2019 年, Chah 等利用硼锆共掺的光纤制作出能在低于 550 °C 稳定工作的 RFBG<sup>[12]</sup>。同年,薛渊泽等使用 SM125 的种子光纤光栅 (Seed Fiber Bragg Grating, SFBG) 在 1000 °C 下制备 RFBG, 结果发现 RFBG 反射率仅为 5%<sup>[13]</sup>。2020 年,印度 Jitendra Kumar 等人利用载氢后的 SMF-28e 的 SFBG, 经 900 °C 高温退火后获得了 RFBG, 结果发现其仅能在 650 °C 下保持热稳定性<sup>[14]</sup>。2021 年,德国的 Bian Q 等使用大模场光纤制作了再生光纤光栅阵列式温度传感器,并通过实验获得了高达 800 °C 的温度校准函数<sup>[15]</sup>。2022 年,王恩博等人在 850 °C 下制备 RFBG, 测试结果发现

收稿日期:2023-04-14; 修订日期:2023-05-25

基金项目:北京市自然科学基金项目 (4212048)

作者简介:孙亚丽,女,硕士生,主要从事光纤传感方面的研究。

导师简介:张钰民,男,副教授,博士,主要从事光纤传感与光纤激光器方面的研究。

通讯作者:祝连庆,男,教授,博士,主要从事光纤传感与光电器件方面的研究。

其热稳定性较差<sup>[16]</sup>。通过众多研究发现, RFBG 的反射率与光纤化学组分、光纤栅区长度、SFBG 的反射率高低和高温退火过程等有关, 且 I 型 FBG 的反射率越高, 所得 RFBG 反射信号越强。

然而, RFBG 在高温条件下的稳定性、重复性却少有报道, 特别是在不同环境氛围下 RFBG 的温度特性更是很少涉及。文中将环境氛围的影响引入到 RFBG 的制作与测试当中, 分别在空气、氮气环境氛围下对栅区长度为 12 mm 的 I 型 FBG 进行了 850 °C 的高温再生实验。实验结果表明, 在氮气环境下得到的 RFBG 具有较高的反射率, 其值为 21.73%, 且表现出良好的热稳定性。

## 1 实验设备及技术方案

### 1.1 RFBG 制作的实验装置

RFBG 制作的实验装置如图 1 所示, 主要由高温炉 (温度范围为 25~1400 °C)、氮气瓶、宽带光源、光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA, 型号 AQ6370D, 分辨率 0.02 nm)、光纤光栅解调仪 (Bayspec Interrogator System, 解调范围 1525~1565 nm, 分辨率 1 pm)、热电偶、计算机、光纤环形器和 3 dB 光纤耦合器组成。

宽带光源发出的光由光纤环形器 1 端口入射, 2 端口输出后进入光纤耦合器分成两束, 分别写入到待测试的 SFBG 中, 经过 SFBG 的透射光分别接入两台 OSA 对其透射谱进行监测。两支 SFBG 的反射光由光纤环形器 3 端口接入光纤光栅解调仪, 对再生过程中反射谱的变化进行实时跟踪, RFBG 制作全过程的光谱数据由两台 OSA 通过计算机程序控制并同步触发采集, 采集时间间隔为 30 s。两支 SFBG 分别放入两支刚玉管中, 其中一支通入 99.999% 的高纯氮气, 另一支为空气环境。SFBG 两端均通过光纤夹具固定, 并保持水平置于高温炉中。炉内温度通过高温热电偶进行实时监测并记录, 对 SFBG 进行高温再生时高温炉的设定条件为从 24 °C 升至 850 °C, 升温时间为 30 min, 温度到达 850 °C 后持续时间为 11 h, 之后自然降至室温。

两支 SFBG 的栅区长度均为 12 mm, 所用光纤型号为 SMF-28e, 光纤涂覆层为聚酰亚胺, 其制作方式为紫外激光器结合相位掩模板刻写而成。固定 SFBG 时确保其栅区位于高温炉的中心位置, 并使用一维平移台对 SFBG 进行预拉伸控制, 使其中心波长红移 1.6 nm。

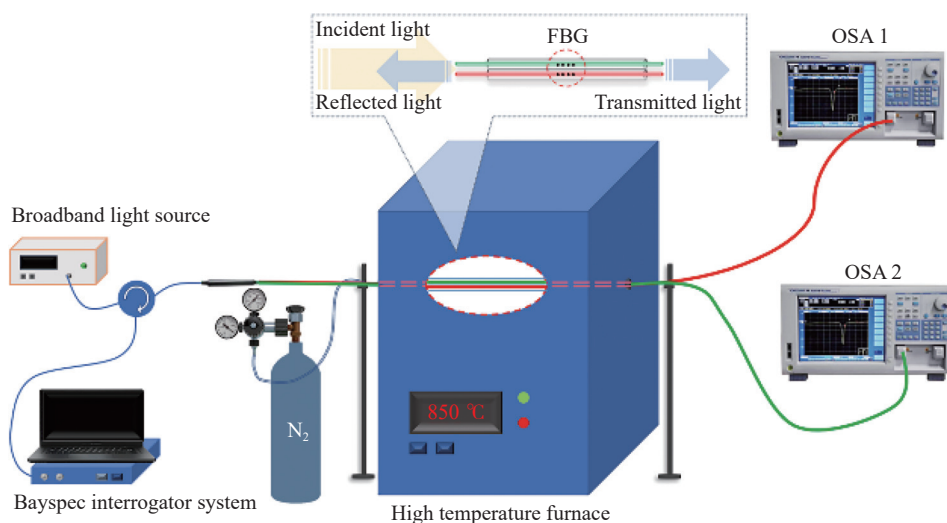


图 1 高温再生光纤光栅实验装置

Fig.1 Experimental setup of high temperature regenerated fiber Bragg grating

### 1.2 RFBG 温度特性实验装置

光栅再生过程结束后, 将在空气、氮气的加热氛围高温再生后的 RFBG 分别命名为 1#RFBG 和 2#RFBG。搭建如图 2 所示的 RFBG 温度特性测试系

统, 对 RFBG 的温度稳定性、重复性等性能进行测试。测试系统主要由高温炉、氮气瓶、光纤光栅解调仪 (波长范围 1528~1568 nm, 分辨率为 0.1 pm)、热电偶、计算机组成。其中光纤光栅解调仪是基于可调谐

扫描激光器原理的 FBG 解调装置, 温度特性测试时用其采集 RFBG 的反射峰中心波长的变化, 设定采集间隔时间为 6 s。RFBG 温度特性测试时温度设定范围为 350~750 °C, 温度步进为 100 °C, 每个温度点稳定时长 120 min。共进行三个循环的升降温实验。

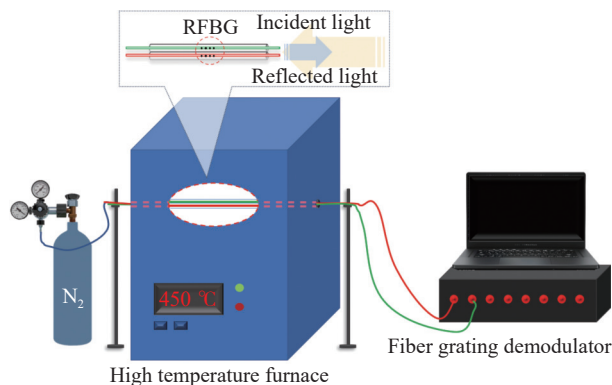


图 2 RFBG 温度特性实验装置

Fig.2 Experimental setup of temperature characteristic of RFBG

整套 RFBG 制作和温度特性测试系统的实物实验平台如图 3 所示, 该实验平台可实现 RFBG 的制作、标定与性能测试功能。

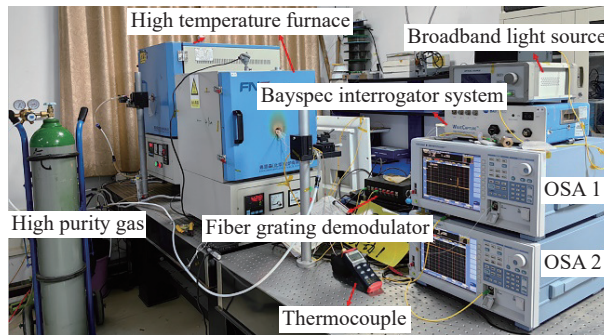


图 3 RFBG 制作和温度特性测试系统的实物实验平台

Fig.3 Experiment platform for RFBG production and temperature characteristic testing system

## 2 实验结果分析

### 2.1 再生前后光谱分析

图 4 为 FBG 再生前后的透射光谱, 可见 1#SFBG 透射深度为 47 dB, 中心波长为 1 535.64 nm, 1#RFBG 的反射率为 21.68%; 2#SFBG 透射深度为 42 dB, 中心波长为 1 534.95 nm, 2#RFBG 的反射率为 21.73%。由此可见, 在再生温度、再生时间、SFBG 参数基本一致的情况下, RFBG 的反射率在氮气和空气环境氛围下具有相似性。

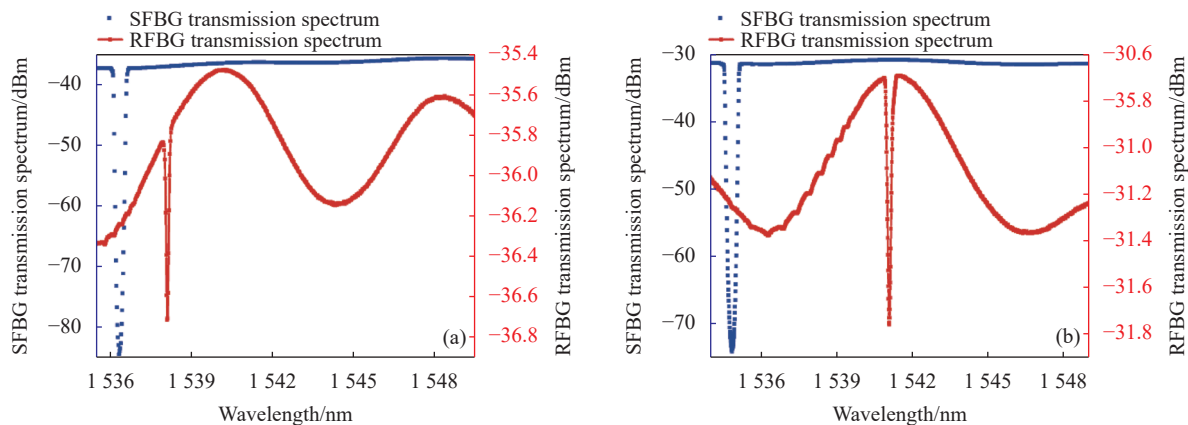


图 4 再生前后光纤光栅透射光谱。(a) 空气环境氛围; (b) 氮气环境氛围

Fig.4 Transmittance spectra of FBG before and after the generation. (a) Air environmental atmosphere; (b) Nitrogen environmental atmosphere

### 2.2 RFBG 再生过程与结果分析

OSA 记录了 SFBG 再生的全过程, 利用 OSA 采集的透射谱数据绘制出两支 FBG 的中心波长随时间的变化曲线和透射深度随时间的变化曲线, 如图 5 所示。从图中可以观察到 SFBG 的透射深度在升温段和保温段初期不断降低, 直至 SFBG 被完全擦除, 光

栅被擦除后会持续一段时间, 随后形成一个新的 RFBG, 其透射深度随保温时间的持续而逐渐升高, 直至趋于饱和。由中心波长随时间的变化曲线可求得 SFBG 的擦除时间、擦除持续时间, 由透射深度随时间的变化曲线可得到再生过程的完成时间。

经研究发现, 在空气的加热氛围条件下 SFBG 被

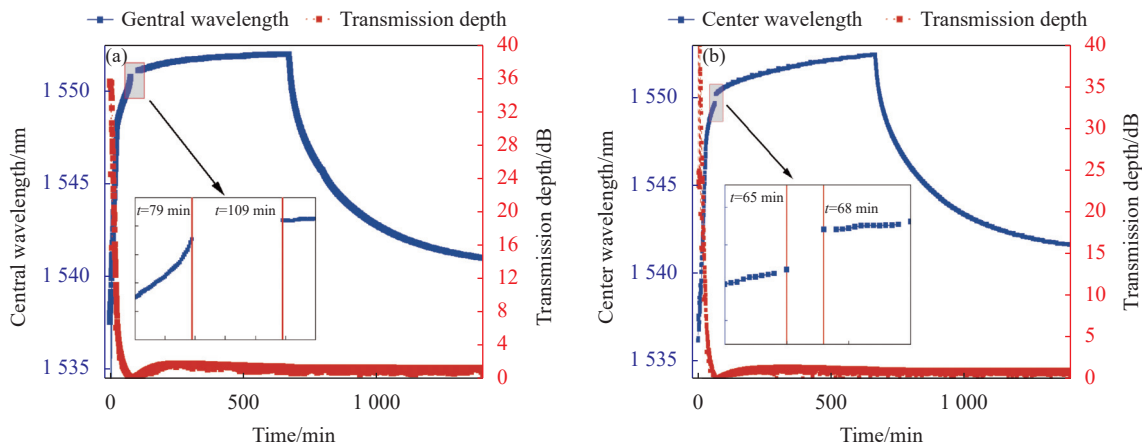


图 5 再生过程中心波长及透射深度的变化。(a) 1#RFBG; (b) 2#RFBG

Fig.5 Changes in central wavelength and transmission depth during regeneration. (a) 1#RFBG; (b) 2#RFBG

彻底擦除的时间为 79 min, 到 109 min 时光谱再次出现, 即擦除持续时间 30 min。新形成的 1#RFBG 在 180 min 后其透射深度达到最大, 其反射率为 21.68%。而在氮气的加热氛围条件下制作 RFBG 时, SFBG 的擦除时间为 65 min, 擦除过程持续 3 min, 再生完成时间为 120 min, 其反射率为 21.73%。由此可见, SFBG 在 850 °C 再生温度时不同加热氛围条件下, 再生结束时最终所得 RFBG 的反射率相差不大, 但在氮气环境氛围相比于空气条件下 SFBG 从擦除到新光栅的生长时间更短。

### 2.3 RFBG 温度特性分析

利用三个周期的升降温实验并结合光纤光栅解调仪采集的中心波长的数据, 可有效评估上述条件下制作的 RFBG 特性。图 6 为 1#RFBG 和 2#RFBG 的波长重复性实验结果。由图可见, 2#RFBG 的温度重复性表现较好, 这说明氮气氛围下可制备出温度重复

性良好的 RFBG。

根据重复性实验数据, 取其中第二和第三循环, 对比同一温度点、相同时间段升降温时的中心波长波动情况。图 7 和图 8 分别为 1#RFBG 和 2#RFBG 在不同温度点的中心波长波动情况。由此可以看出, 1#RFBG 在温度实验循环中其中心波长的波动在  $\pm 23$  pm 范围内, 而 2#RFBG 的中心波长波动在  $\pm 10$  pm 范围之内。这表明 2#RFBG 表现出更好的温度稳定性, 说明氮气环境氛围对提升 RFBG 的温度稳定性具有积极地促进作用。

将第三次实验温度稳定阶段的中心波长平均值作为 RFBG 在该温度稳定点的中心波长值。利用最小二乘法对该中心波长值与温度设定点进行曲线拟合, 得到两者间的对应关系曲线, 如图 9 所示。其中, 1#RFBG 的拟合系数  $R^2$  为 0.9995, 其拟合方程为:

$$\lambda_1 = 2.8585 \times 10^{-6} T^2 + 0.0118T + 1537.8888 \quad (1)$$

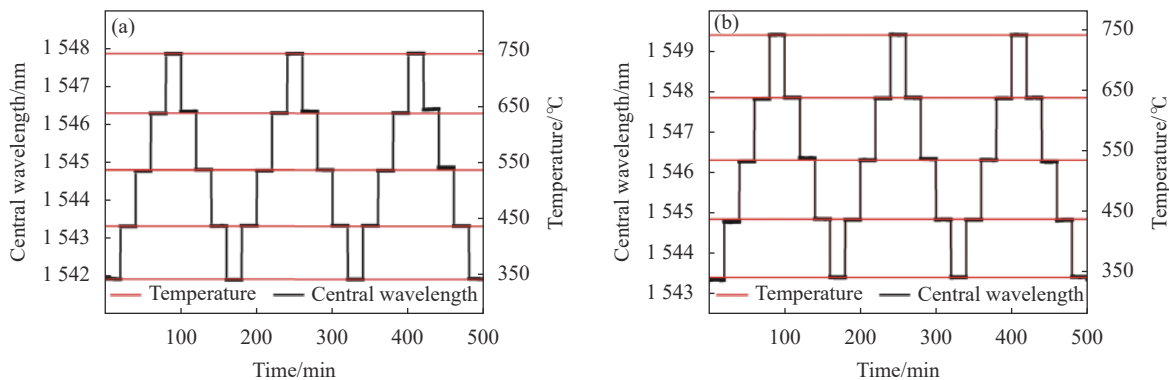


图 6 (a) 1#RFBG 的波长重复性实验结果; (b) 2#RFBG 的波长重复性实验结果

Fig.6 (a) 1#RFBG of wavelength repeatability experiments results; (b) 2#RFBG of wavelength repeatability experiments results



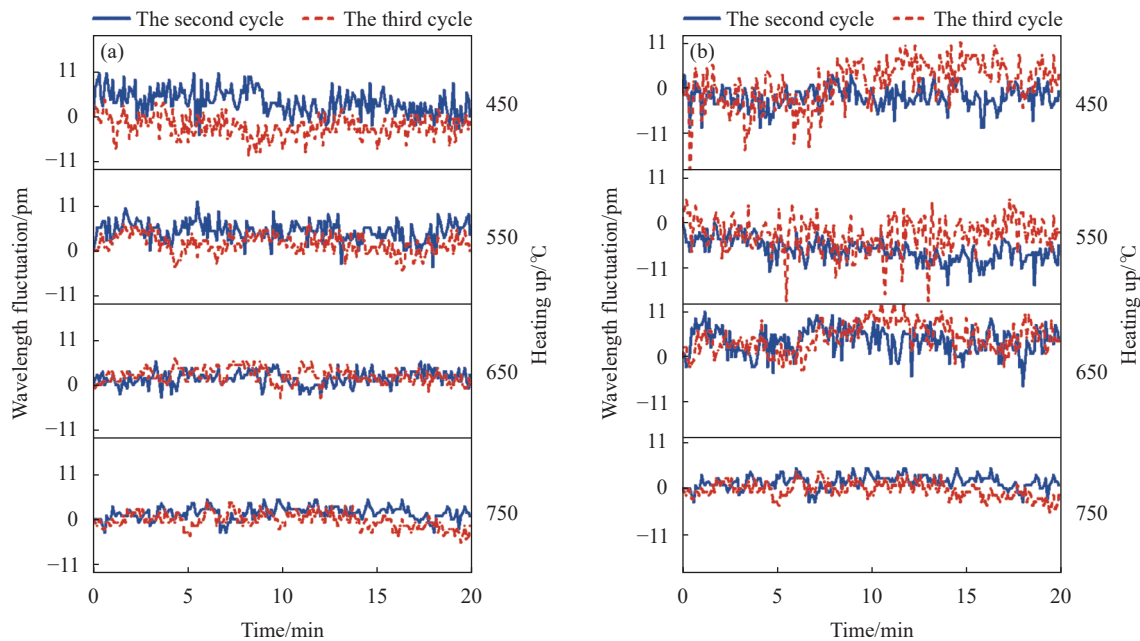


图 7 (a) 1#RFBG 在各温度不同循环下升温时的波长波动; (b) 1#RFBG 在各温度不同循环下降温时的波长波动

Fig.7 (a) Wavelength fluctuations of 1#RFBG when heating up under different cycles at each temperature; (b) Wavelength fluctuations of 1#RFBG when cooling down under different cycles at each temperature

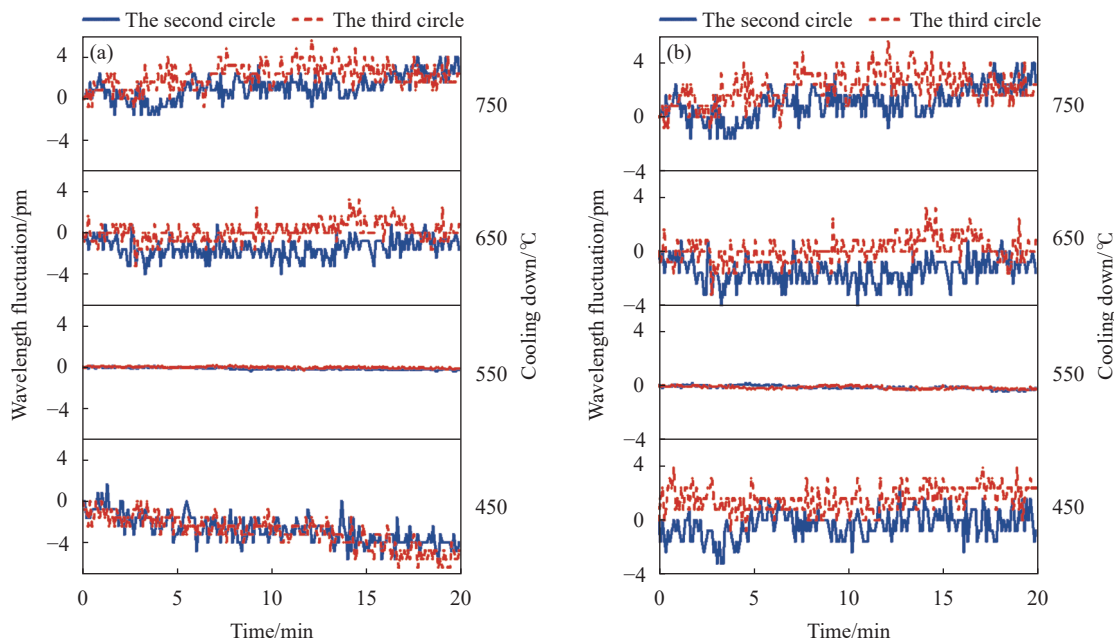


图 8 (a) 2#RFBG 在各温度不同循环下升温时的波长波动; (b) 2#RFBG 在各温度不同循环下降温时的波长波动

Fig.8 (a) Wavelength fluctuations for 2#RFBG when heating up under different cycles at each temperature; (b) Wavelength fluctuations for 2#RFBG when cooling down under different cycles at each temperature

2#RFBG 的拟合系数  $R^2$  为 0.9997, 其拟合方程为:

$$\lambda_2 = 2.665 \times 10^{-6} T^2 + 0.0119T + 1540.3662 \quad (2)$$

利用上述计算的中心波长与温度的曲线关系, 设定高温炉的温度为 700 °C, 分别对两支 RFBG 的测温

精度进行实验验证。1#RFBG 的温度测量误差在  $\pm 6.3$  °C 范围内, 而 2#RFBG 温度测量误差可控制在  $\pm 2.9$  °C 范围内。由此可见, 氮气氛围下所得 RFBG 的温度稳定性和重复性良好, 在 750 °C 以下进行温度

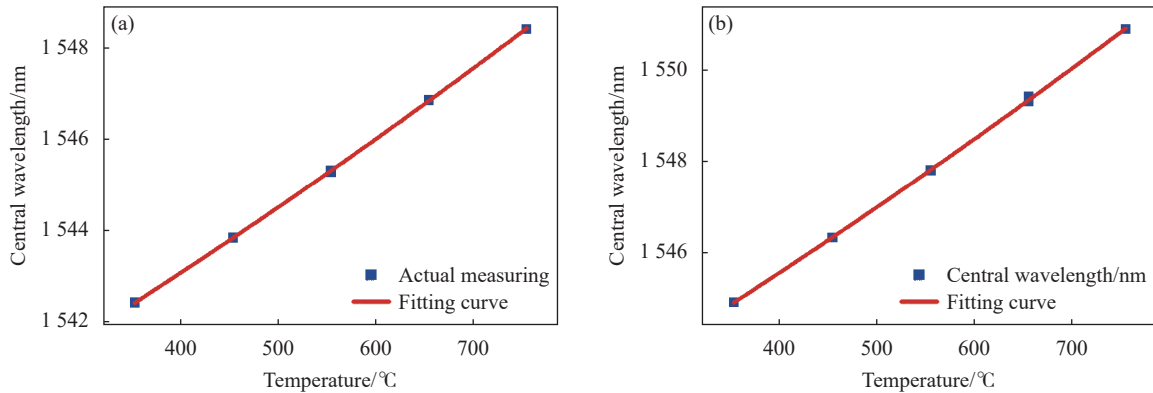


图 9 中心波长与温度拟合曲线。(a) 1#RFBG; (b) 2#RFBG

Fig.9 Center wavelength and temperature fitting curve. (a) 1#RFBG; (b) 2#RFBG

测量时其误差更小。

### 3 结 论

文中对空气和氮气两种不同环境氛围下 RFBG 的制作方法进行了研究, 获得了 850 °C 高温下紫外激光刻写的 SFBG 再生全过程记录, 系统研究了上述两种 RFBG 的温度特性和测温精度。研究表明, 空气和氮气加热氛围下获得的 RFBG 具有相似的反射率, 但氮气条件下 RFBG 的生长较为迅速, 并且具有良好的热稳定性, 其测温精度可达到  $\pm 2.9$  °C。因此, 环境氛围的改变会影响 RFBG 的热稳定性和测温重复性, 通过优化 RFBG 的制作方法, 将使得 RFBG 在高精度高温测量领域发挥重要的作用。

#### 参考文献:

[1] Shang Bolin, Song Bifeng, Wan Fangyi. Application of optical fiber sensors in structural health monitoring of flight vehicle [J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2008, 3(3): 7-10. (in Chinese)

[2] Jiang Dingting. The application of high temperature sensors of aero engine [J]. *Aviation Power*, 2020(1): 20-23. (in Chinese)

[3] Zhang Xuhui, Wang Lutang, Fang Nian. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020603. (in Chinese)

[4] Åslund M L, Canning J, Stevenson M, et al. Thermal stabilization of type i fiber Bragg gratings for operation up to 600 °C [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(4): 1-3.

[5] Polz L, Dutz F, Maier J, et al. Regenerated fibre Bragg gratings: A critical assessment of more than 20 years of investigations [J].

*Optics & Laser Technology*, 2021, 134: 106650.

[6] Nan Jian. Research on optical fiber multi-parameter sensing technology used in high temperature environment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[7] Shang Fufa. Research on the high temperature sensor based on fiber Bragg gratings with low reflectivity [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[8] Che Nana. Study on characteristics of fiber Bragg gratings during the process of regeneration [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)

[9] Ding Xudong, Zhang Yumin, Luo Fei, et al. Study on regeneration process and temperature characteristics of fiber grating with different reflectivity [J]. *Tool Engineering*, 2018, 52(5): 130-134. (in Chinese)

[10] Fokine M. Thermal stability of chemical composition gratings in fluorine-germanium-doped silica fibers [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(12): 1016-1018.

[11] Lai M H, Lim K S, Gunawardena D S, et al. Thermal stress modification in regenerated fiber Bragg grating via manipulation of glass transition temperature based on CO<sub>2</sub> laser annealing [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 748-751.

[12] Chah K, Yuksel K, Kinet D, et al. Fiber Bragg grating regeneration at 450 degrees C for improved high temperature sensing [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(16): 4036-4039.

[13] Xue Yuanze, Wang Xuefeng, Tang Caijie, et al. Packaging technique of high temperature regenerated fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(5): 49-51. (in Chinese)

[14] Kumar J, Singh G, Saxena M K, et al. Development and studies on FBG temperature sensor for applications in nuclear fuel cycle facilities [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020(99): 7613-7619.

- [15] Bian Q, Bauer C, Stadler A, et al. Multipoint temperature monitoring based on a regenerated fiber Bragg grating temperature sensor array in copper casting[C]//SPIE, 2021, 11591: 115910U.
- [16] Wang Enbo, Sun Yu, Hu Quanyi, et al. Engineering packaging technology of high-temperature sensor based on regenerated fiber Bragg grating [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2022, 13(3): 62-68. (in Chinese)

## Study on the temperature characteristics of high-temperature regenerated fiber Bragg grating in different environmental atmospheres

Sun Yali<sup>1</sup>, Tian Jing<sup>1</sup>, Zhang Yumin<sup>2</sup>, Yao Jifeng<sup>1</sup>, Lv Zheng<sup>1</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2,3\*</sup>

- (1. Photoelectric Information and Instruments Beijing Engineering Research Center, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;  
2. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology Ministry of Education, Beijing 100192, China;  
3. Beijing Key Laboratory of Photoelectric Testing Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

### Abstract:

**Objective** Type I fiber Bragg grating can work well below the temperature of 300 °C. However, when the temperature further rises, the reflectivity of Type I fiber Bragg grating will be reduced. If it operates in high temperature for a long time, the fiber Bragg grating will fail. There is a new type of grating called regenerated fiber Bragg grating attracting worldwide attention that promised to solve the problem. It is essentially formed from the initial Type I "seed" grating, precipitating through thermal processing with a structure that is set by the laser written seed. Regenerated fiber Bragg grating is an important optical fiber sensor for high-temperature sensing. But the stability and repeatability of the regenerated fiber Bragg grating under high temperature is less commonly reported, especially for different environmental atmospheres. For this purpose, environmental atmospheres are introduced during the process of regeneration and testing in this paper.

**Method** Air and nitrogen environmental atmospheres are designed during the regeneration of two type I seed gratings written by UV laser. The whole regeneration process is performed in a high-temperature furnace and recorded by optical spectrum analyzer and fiber Bragg grating interrogator (Fig.1). The temperature characteristic of the obtained regenerated fiber Bragg grating is tested by fiber Bragg grating interrogator under air and nitrogen environmental atmospheres (Fig.2). The regeneration results are shown in the form of evolution of central wavelength and transmission depth (Fig.5). The repeatability and stability of the regenerated fiber Bragg gratings are characterized by wavelength (Fig.6-8). And the temperature accuracy is verified at 700 °C.

**Results and Discussions** The reflectivity of the two kinds of regenerated fiber gratings is not much different. The one in air has a reflectivity of 21.68%, and the other in nitrogen has a similar value of 21.73%. However, under the temperature cycle of 350-750 °C, the regenerated fiber grating in the nitrogen environment has good temperature stability, and the temperature measurement accuracy can reach  $\pm 2.9$  °C at 700 °C. The regenerated fiber grating prepared under the condition of nitrogen atmosphere is helpful to improve its stability and measurement accuracy.

**Conclusion** The fabrication methods of regenerated fiber Bragg gratings under two different atmospheres of air

and nitrogen are studied. The whole process record of regeneration of seed gratings written by ultraviolet laser at a high temperature of 850 °C is obtained, and the temperature characteristics and temperature measurement accuracy of the above two kinds of gratings are systematically studied. The research results show that the regenerated fiber Bragg gratings obtained under the heating atmosphere of air and nitrogen have similar reflectivity, but the growth of regenerated fiber Bragg grating under nitrogen is faster and has good thermal stability, and its temperature measurement accuracy can reach up to  $\pm 2.9$  °C. Therefore, changes in the environmental atmosphere will affect the thermal stability and temperature measurement repeatability of regenerated fiber Bragg grating. By optimizing the fabrication method of regeneration, regenerated fiber Bragg grating will play an important role in the field of high-precision high-temperature measurement.

**Key words:** regenerated fiber Bragg grating; environment atmosphere; high-temperature annealing; stability; repeatability

**Funding projects:** Beijing Natural Science Foundation (4212048)