

# 激光与光电子学进展

## 基于飞秒光纤光栅的准分布式高温传感器及应用

刘帅<sup>1</sup>, 曾琦<sup>2</sup>, 黎超超<sup>2</sup>, 何少灵<sup>1</sup>, 章奕<sup>1</sup>, 吴小笛<sup>1</sup>, 桑卫兵<sup>1</sup>, 李东明<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>杭州应用声学研究所光纤传感事业部, 浙江 杭州 310023;

<sup>2</sup>中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

**摘要** 基于飞秒激光刻写的光纤光栅在 1000 °C 高温下具备较高的热稳定性, 将其采用细金属管封装后制成飞秒光纤光栅高温传感器。经测试, 该传感器的温度系数具备良好的一致性和重复性, 在 1000 °C 范围内测温精度达到  $\pm 5$  °C。实验中, 5 个飞秒光纤光栅高温传感器串接成高温传感器阵列, 并将 3 条高温传感器阵列布设在航空领域某筒状高温部件表面上中下三个部位的 15 个测温点进行准分布式的温度测量。结果显示, 上中下三个位置最高温度分别为 460 °C、600 °C 和 520 °C, 且周向温度基本一致。这表明基于管式封装的飞秒光纤光栅高温传感器可准确反应试验件表面的温度变化和温场分布, 实现了基于飞秒光栅高温传感器的准分布式温场测量。

**关键词** 光纤光学; 飞秒光纤光栅; 高温传感器; 准分布式温度测量

中图分类号 TP212.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0106007

### Application of Quasi-Distributed High Temperature Sensor Based on Femtosecond Fiber Bragg Grating

Liu Shuai<sup>1</sup>, Zeng Qi<sup>2</sup>, Li Chaochao<sup>2</sup>, He Shaoling<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>1</sup>, Wu Xiaodi<sup>1</sup>, Sang Weibing<sup>1</sup>,  
Li Dongming<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Fiber Sensing, Hangzhou Applied Acoustic Institute, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>2</sup>Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, China

**Abstract** Fiber Bragg gratings (FBGs) using femtosecond laser inscription technology exhibit stable thermal ability at approximately 1000 °C. High temperature sensors based on femtosecond FBGs demonstrate good repeatability and consistency with thin steel tube packages. The temperature measurement accuracy of the sensor reaches  $\pm 5$  °C within 1000 °C, which indicates that the femtosecond FBG high temperature sensor can measure temperature up to 1000 °C. Applications of the sensor in quasi-distributed temperature sensing of the top, middle, and bottom parts of an aeroengine using a three FBG sensor array with 15 femtosecond FBGs was conducted. The results reveal that the highest temperature of the top, middle, and bottom parts is 460 °C, 600 °C, and 520 °C, respectively. Moreover, the circumferential temperature distribution is approximately same. This successful application of the femtosecond FBG high temperature sensor in quasi-distributed temperature sensing of the cylindrical parts indicates good performance in accurate temperature measurement and temperature distribution.

**Key words** fiber optics; femtosecond fiber Bragg grating; high temperature sensor; quasi-distributed temperature sensing

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-04-20; 录用日期: 2021-04-28

通信作者: lidongming715@163.com

## 1 引言

温度传感器在工业领域具有非常广泛的应用,其中较常用的是电学温度传感器,比如热电偶温度计和电阻温度计。考虑到工业测温应用中存在局部密集测温的需求,这会导致复杂的引线问题,并且极易受电磁干扰影响。光纤光栅温度传感器所具备的多点复用和电磁干扰免疫的特征正好可以解决上述问题。此外,光纤光栅温度传感器还具备本征安全、信噪比高、耐腐蚀、寿命长等优势<sup>[1-5]</sup>。

在航空航天和石油化工领域等领域,测温上限要求达到 1000 °C 甚至更高。传统紫外光结合相位掩模版刻写的光纤光栅在 400 °C 以上的温度工作时容易被“擦除”<sup>[6-7]</sup>,导致传统光纤光栅温度传感器无法胜任高温传感的应用。“擦除”效应产生的原因是紫外光引起的光纤纤芯中折射率调制深度比较低( $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ),高温下光纤光栅的反射率逐步减小到 0,从而失效。为了提高基于紫外光写制技术的光纤光栅的高温性能,一种方法是通过过度曝光在纤芯中引入负折射率调制形成 II 型光纤光栅,这种类型的光栅一般可以工作到 700 °C<sup>[8-9]</sup>。另一种方法是对 I 型光栅进行退火生成再生光栅,这种光栅能够承受 1000 °C 左右的高温,但是再生光纤光栅的刻写需要特殊掺杂的光纤和载氢处理<sup>[10-11]</sup>,工艺复杂、成品率不高。近些年,随着飞秒激光技术的不断进步,采用飞秒激光刻写的特种光纤光栅表现出良好的高温性能。飞秒光纤光栅采用飞秒激光点对点直写技术可直接在带有涂覆层的光纤纤芯上引起高达  $10^{-3}$  量级的折射率调制深度<sup>[12-15]</sup>,并且这种折射率分布在 1000 °C 的高温下长期保持不退化,可满足 1000 °C 高温领域的传感要求。但是基于飞秒光纤光栅的准分布式高温传感器及其在工业高温测量领域的应用实验研究却鲜少报道。

本文针对工业领域近 1000 °C 的高温测量应用需求,研制了基于飞秒光纤光栅的高温传感器及其在航空领域某筒状高温部件表面的准分布式测温应用。实验结果证明,布设在筒状高温部件表面的飞秒光纤光栅高温传感器阵列可以准确反映试验件表的温度变化和温场分布。本研究成果在工业高温测量领域,尤其是航空领域高温部件表面温场准分布式测量方面有重要应用价值。

## 2 飞秒光纤光栅高温特性

飞秒光纤光栅的高温特性主要体现在如下两个

方面:恒定高温环境下光栅反射峰的强度以及波长稳定性。对于 1000 °C 的高温测量应用,要求飞秒光纤光栅在 1000 °C 下持续工作时,反射峰强度和波长均具备高稳定性。我们在实验室中对多支基于飞秒激光点对点直写的 II 型纯石英飞秒光纤光栅进行 1000 °C 下的退火实验,采用 AMETEK CTC-1205 型高精度校准干体炉提供实验环境,数据采集则采用 MOI sm125 光纤光栅解调仪。室温下将飞秒光纤光栅放入干体炉内,设置干体炉的升温斜率为 20 °C/min,在 50 min 后干体炉达到 1000 °C,而后进入恒温保持阶段。干体炉采用内置温度传感器和外置温度传感器双重校准,控温精度达到 0.01 °C。

选取其中一支中心波长为 1560 nm 的飞秒光栅进行具体分析。其退火过程中反射峰强度变化和波长变化如图 1 和图 2 所示。从图 1 中可以看出,在 240 min 的退火时间内,光栅强度基本都在 -8.4 dBm 上下随机波动,波动幅度  $< 0.4$  dB,说明飞秒光栅反射峰强度在 1000 °C 下具备高稳定性。图 2 为飞秒光栅退火过程中的波长变化,退火开始时光栅中心波长约为 1559.8 nm,随着退火时间的增加光栅中心波长出现蓝移,在 100 min 时光栅的中心波长趋于稳定,波长蓝移量达到 1.6 nm。从 100 min 到 240 min,光栅的中心波长则基本保持不变,表明光栅此时已处于退火过程中的高稳定状态。退火过程中飞秒光纤光栅波长的蓝移是由于光纤中存在的残余应力被高温释放掉而引起的,这种残余应力主要是光栅写制过程中高能脉冲激光在光纤中引起的热应力和机械应力的叠加效应,而热应力则是由于纤芯和包层之间的热膨胀系数不同导致的,机械应力是由于纤芯和包层之间的黏弹性不同导致的<sup>[16-17]</sup>。综上,飞秒光纤光栅退火后可满足 1000 °C 下高温传感对光栅高温特性的要求。

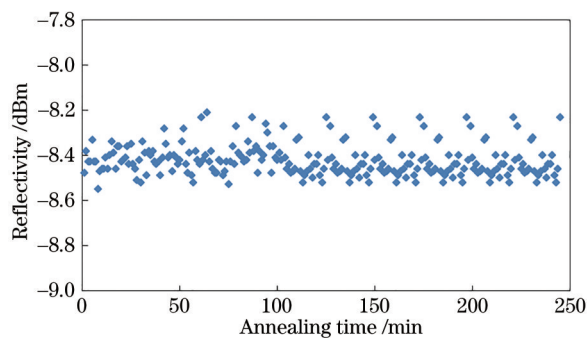


图 1 1000 °C 退火过程中飞秒光纤光栅反射率强度变化  
Fig. 1 Change in the reflectivity of femtosecond FBG at an annealing temperature of 1000 °C

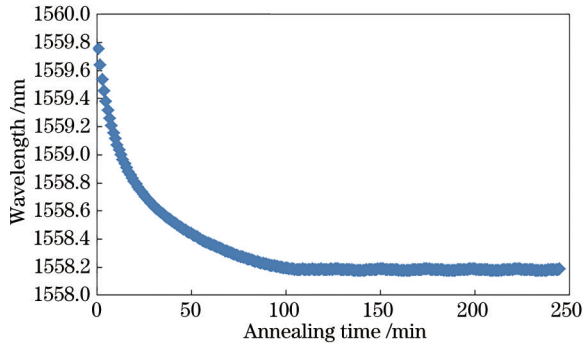


图 2 1000 °C 退火过程中飞秒光纤光栅中心波长变化  
Fig. 2 Change in the resonant wavelength of femtosecond FBG at an annealing temperature of 1000 °C

### 3 飞秒光纤光栅高温传感器

光纤光栅的温度传感原理主要基于光纤的热光效应、弹光效应和热膨胀效应<sup>[18]</sup>, 表示为

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda \left[ \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha \right] + 2n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T, \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为光纤半径;  $2\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T$  为光纤光栅热光效

应引起的波长漂移;  $2\Lambda (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$  为热膨胀引起的弹光系数;  $2\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \alpha} \Delta \alpha$  为热膨胀引起光纤芯径变化而产生的波导效应;  $2n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T$  为光纤的热膨胀系数。

一般认为掺锗光纤的热光系数和热膨胀系数均为常数, 因此, 将(1)式进行简化后得出温度的变化会引起光纤光栅波长的线性响应, 该线性特性奠定了其温度传感的基础。

在实际的应用中, 光纤光栅温度传感器会进行相应封装以满足不同应用场景的需要。在 1000 °C 的高温测量环境中, 我们采用细金属管对飞秒光纤光栅进行封装, 制成高温传感器, 其结构原理如图 3 所示。包含 4 个飞秒光纤光栅的光栅串用高温密封胶封装在细金属管中, 栅串处于自由状态, 确保其不受外界应力影响。从金属管中引出的尾纤用护套进行保护, 由于金属管尾部远离高温环境, 不会对护套产生影响。光栅串中光栅的数量可以根据实际应用需求增加或减少, 相邻光栅的间距可根据被测温对象的尺寸进行精准设计。在本节温度系数标定实验中考虑到高温炉有效测温区长度以及将在第 4 节中 被测对象的尺寸, 选择包含 4 个单栅的光栅串制成传感器。

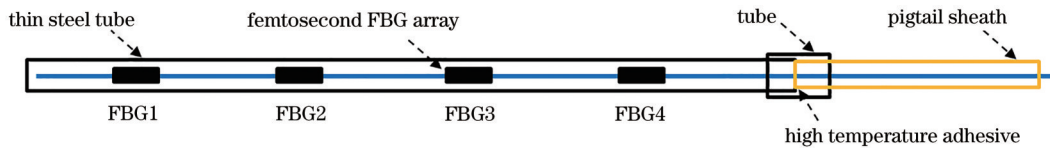


图 3 管式封装的飞秒光纤光栅高温传感器阵列结构

Fig. 3 Diagram structure of tube packaged femtosecond FBG high temperature sensor

在实验室中对封装完成的飞秒光纤光栅高温传感器阵列进行温度系数标定, 温度从 50 °C 至 1000 °C, 每隔一定温度记录一次温度参考值和对应的波长。实验系统采用的干体炉和光纤光栅解调仪与光栅退火实验的相同, 确保记录的温度值和波长值精准。高温传感器阵列包含的 4 支单栅的温度标定实验结果如图 4(a)~(d) 所示, 从图 4 可以看出飞秒光纤光栅波长与温度的变化关系呈二次函数关系, 并且其二次拟合度  $R^2$  均达到了 0.9998 以上。

飞秒光纤光栅波长与温度之间呈现二次变化关系可能是高温下石英光纤的热光系数和温度之间的线性关系导致的<sup>[19-21]</sup>。此外, 从拟合公式中可以看出 4 支不同波长光栅温度标定的二次系数完全相同, 一次系数也基本相同, 波动幅度不大

于  $\pm 0.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , 相比于  $11.4 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  的温度系数而言, 这微小的波动可以忽略。因此, 对于不同波长的飞秒光纤光栅而言, 可认为波长与温度变化的二次拟合函数相同, 在解调时可以采用相同的温度系数。在已知初始温度  $T_0$ 、初始波长  $\lambda_0$ 、一次温度系数  $\kappa_1$  和二次温度系数  $\kappa_2$  的前提下, 根据光纤光栅解调仪解调出的实时波长  $\lambda_x$  便可计算出实时的温度值, 表示为

$$T_x = \left[ \frac{(\lambda_x - \lambda_0) + \kappa_1 T_0^2 + \kappa_2 T_0}{\kappa_1} + \frac{\kappa_2^2}{4\kappa_1^2} \right]^{1/2} - \frac{\kappa_2}{2\kappa_1}. \quad (2)$$

完成了飞秒光纤光栅高温传感器的温度系数标定实验后, 我们在浙江省计量科学院研究院对传感器的测温精度进行计量, 从 100 °C 到 1000 °C 的测

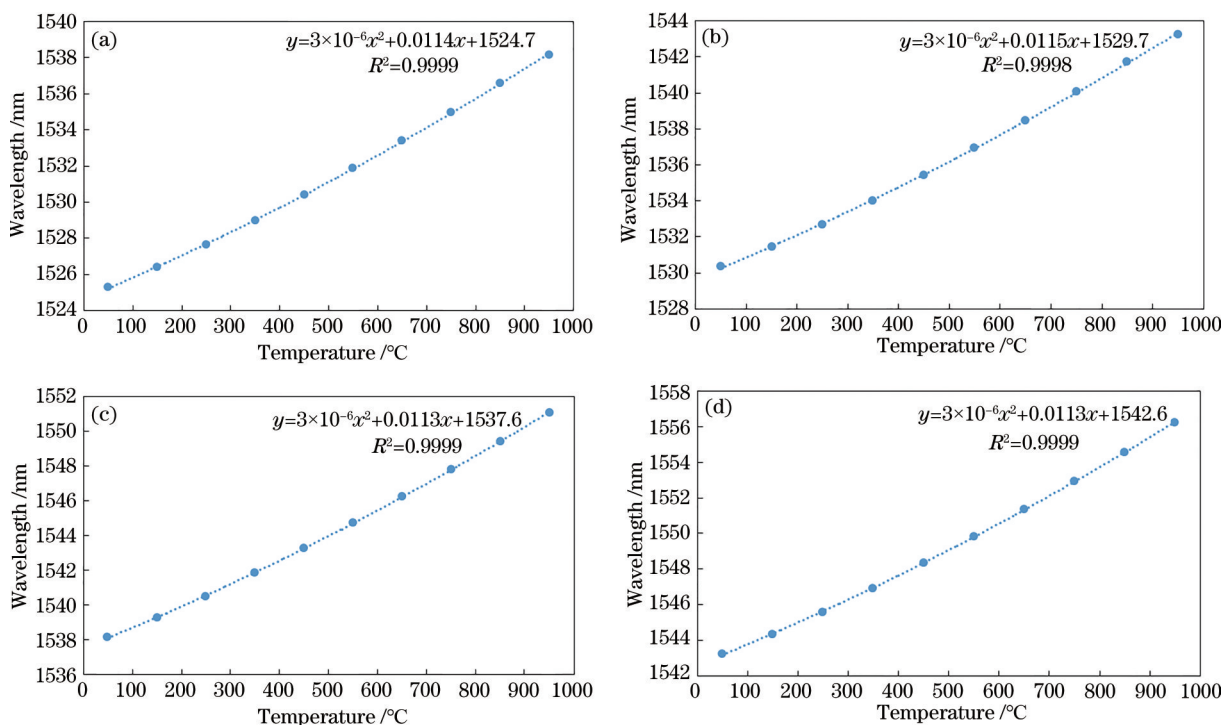


图4 初始波长不同的4支飞秒光纤光栅高温传感器温度系数标定。(a) 1530 nm;(b) 1535 nm;(c) 1540 nm;(d) 1545 nm  
Fig. 4 Temperature cycling of 4 femtosecond FBG high temperature sensors with different initial wavelengths. (a) 1530 nm;  
(b) 1535 nm; (c) 1540 nm; (d) 1545 nm

温范围内每隔 100 °C 取一个点记录其波长,而后利用解调公式进行温度解调,解调出的温度值与计量院的标准温度计的温度值进行对比,结果如表 1 所示,基于飞秒光纤光栅的高温传感器在 1000 °C 测温范围内测温精度达到 ±5 °C。可见,相比于目前高温测量常用的热电偶,飞秒光纤光栅高温传感器不仅具备准分布式测量(引线少)、抗电磁干扰等传统优势,而且在测温精度上也具备一定优势。

表 1 飞秒光纤光栅高温传感器精度计量结果

Table 1 Temperature measurement accuracy of femtosecond FBG high temperature sensor

Calibration point /°C	Indication error /°C	Expanded uncertainty of indication error $U$ /°C ( $k=2$ )
100	-0.88	1.5
200	-2.23	1.5
300	-4.28	1.5
400	-4.38	1.5
500	-1.28	1.5
600	+1.78	1.5
700	+3.83	1.5
800	+2.68	1.5
900	+0.21	1.5
1000	-0.23	1.5

#### 4 飞秒光纤光栅高温传感器在航空领域某筒状高温部件上的测温应用

高温测量领域许多应用场景都需要进行准分布式的温度测量,比如航空领域某高温部件表面温场的准分布式测量,这种准分布式高温测量能够充分体现光纤光栅温度传感器的波分复用优点<sup>[22]</sup>。我们加工了筒状的高温部件试验件,并且在其表面上中下三个部位开设细槽用于布设 3 条飞秒光纤光栅高温传感器阵列,每条传感器阵列包含 5 个飞秒光纤光栅,共计 15 个测点。试验件安装于加热台上,加热台点火后试验件表面迅速升温,引起温度传感器波长变化。光纤光栅解调仪将波长值实时解调出来通过网口传送到计算机中,再根据解调公式进行温度值的实时解算,从而得出试验件的温度分布。实验系统如图 5 所示。

实验过程共经历 2 个阶段:点火升温和关火降温,整个实验过程持续约 500 s,其中前 100 s 记录室温下温度值,从第 100 s 后开始点火,持续至 500 s 开始关火降温,并停止记录,实验过程中光纤光栅解调仪的采样频率设置为 1 Hz。

3 条传感器阵列的温度变化如图 6(a)~(c)所

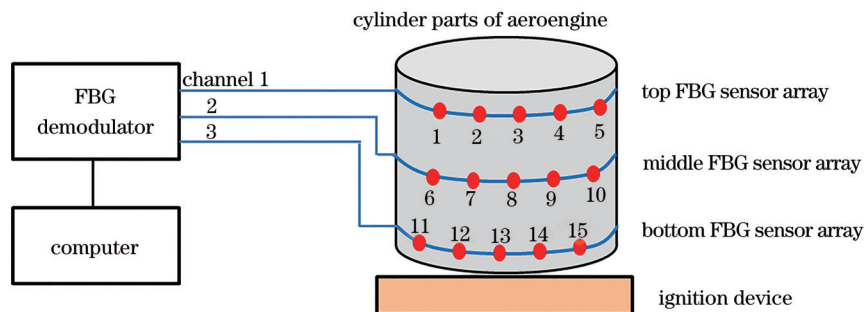


图 5 基于飞秒光纤光栅高温传感器的筒状高温部件准分布式测温应用

Fig. 5 Quasi-distributed temperature measurement application of cylindrical high temperature components based on femtosecond fiber grating high temperature sensor

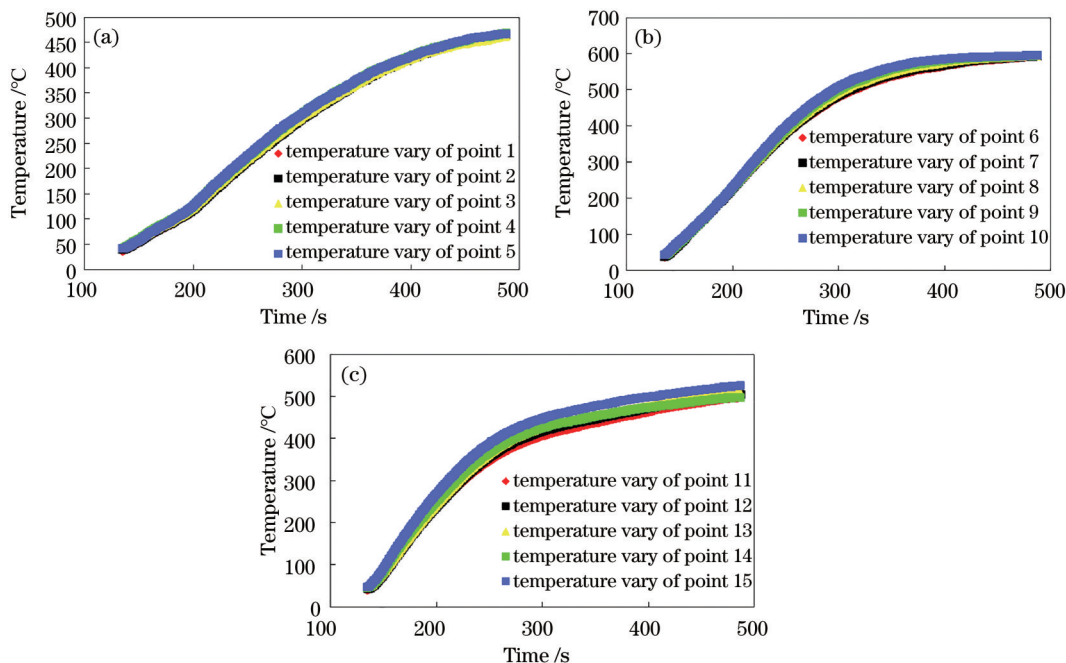


图 6 筒状试验件表面三个不同部位的温场分布。(a)顶部;(b)中部;(c)底部

Fig. 6 Measured temperature distribution of three different parts of cylinder samples.(a) Top part; (b) middle part; (c) bottom part

示。从 3 张图中可以看出,当加热台点火后,各传感器测得的温度值快速升高,且同一阵列的 5 个测点温度基本相同,这是由于加热台是沿圆周方向均匀布设有点火器,使得点火后火焰在圆周方向分布比较均匀。此外,沿着试验件径向的最高温度出现中间高,两头低的现象。这是由于加热台点火的火焰具有一定的高度,中间部位的测温阵列距火焰的外焰最近,因此,中部温度最高,达到 600 °C 左右;底部则与火焰的根部最近,最高温度略低,达到 520 °C,顶部由于距离火焰最远,最高温度只有 460 °C。

## 5 结 论

针对 1000 °C 准分布式测温应用,本文研究了基

于飞秒光纤光栅高温传感器的高温特性。退火实验表明在 1000 °C 下光栅反射峰强度和波长具备良好的热稳定性,满足 1000 °C 下高温传感对光栅高温特性的要求。采用细金属管对飞秒光纤光栅进行封装,形成高温传感器阵列,在航空领域某筒状高温部件试验件表面上中下三个部位共布设 3 条 5 栅串的高温传感器阵列,共 15 个测点进行准分布式的温度测量。实验结果显示,试验件上中下三个位置最高温度分别为 460 °C、600 °C 和 520 °C,且周向温度基本一致。表明基于飞秒光栅高温传感器的准分布式温场测量,在工业高温测量领域,尤其是航空领域某高温部件表面温场准分布式测量方面具有广泛的应用前景。由于实验条件的限制,传感

器在温度系数标定以及计量过程中只针对单向升温过程,在后续的研究中对继续对传感器高温性能进行研究,并结合航空领域高温部件的温场分布实现被测部件的三维动态重构。

### 参 考 文 献

- [1] Yin Z W, Gao L, Liu S C, et al. Fiber ring laser sensor for temperature measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(23): 3403-3408.
- [2] Culshaw B. Optical fiber sensor technologies: Opportunities and-perhaps-pitfalls[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 39-50.
- [3] Mihailov S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [4] Yang Z C, Xu H F, Dong X Y. Research development of high-temperature resistant fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050003.  
杨樟成, 徐汉锋, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050003.
- [5] He S L, Hao F H, Liu P F, et al. High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0605003.  
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605003.
- [6] Brambilla G. High-temperature fibre Bragg grating thermometer[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(17): 954-956.
- [7] Erdogan T, Mizrahi V, Lemaire P J, et al. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(1): 73-80.
- [8] Groothoff N, Canning J. Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2360-2362.
- [9] Ran Y, Jin L, Gao S, et al. Type IIA Bragg gratings formed in microfibers[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(16): 3802-3805.
- [10] Bandyopadhyay S, Canning J, Stevenson M, et al. Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1917-1919.
- [11] Du Y, Chen T, Zhang Y L, et al. Fabrication of phase-shifted fiber Bragg grating by femtosecond laser shield method[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(24): 2143-2146.
- [12] Cui W, Chen T, Si J H, et al. Femtosecond laser processing of fiber Bragg gratings with photo-induced gradient-index assisted focusing[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(7): 075015.
- [13] Li H Y, Rao B Y, Zhao X F, et al. Development of fiber gratings inscribed by femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111420.  
李宏业, 饶斌裕, 赵晓帆, 等. 基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111420.
- [14] Lü R D, Chen T, Fan C S, et al. Application of fiber lasers based on femtosecond laser inscribed fiber Bragg gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111426.  
吕瑞东, 陈涛, 范春松, 等. 飞秒激光制备光纤 Bragg 光栅在光纤激光器中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111426.
- [15] Warren-Smith S C, Nguyen L V, Lang C, et al. Temperature sensing up to 1300 °C using suspended-core microstructured optical fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 3714-3719.
- [16] Li Y H, Yang M W, Wang D N, et al. Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19785-19790.
- [17] Grobnc D, Smelser C W, Mihailov S J, et al. Long-term thermal stability tests at 1000 degree C of silica fiber Bragg grating made with ultrafast laser radiation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5855: 106-109.
- [18] Zhang Z J. Theoretical basis and sensing technology of fiber Bragg grating[M]. Beijing: Science Press, 2009: 118.  
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 118.
- [19] Liao C, Wang D N, Li Y, et al. Temporal thermal response of type II-IR fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(16): 3001-3007.
- [20] Flockhart G M H, Maier R R J, Barton J S, et al. Quadratic behavior of fiber Bragg grating temperature coefficients[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2744-2751.
- [21] Huang F Q, Chen T, Si J H, et al. Fiber laser based on a fiber Bragg grating and its application in high-temperature sensing[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 233-237.
- [22] Du Y, Si J H, Chen T, et al. Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 1006606.  
杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 1006606.