

激光与光电子学进展

基于飞秒光纤光栅的高温 FBG 传感器阵列

赵贤^{1,2}, 王永杰^{2*}, 李慧聪^{2,3}, 张登攀¹¹河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;²中国科学院半导体研究所, 北京 100083;³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 以高功率散裂靶测温需要为牵引,设计并制备了一种基于飞秒光纤光栅的高温传感阵列。采用飞秒激光刻写的光纤光栅和管式封装方法,扩大并提升了传感器的测温范围和机械强度。研究并优化了涉及退火步骤、退火时间、退火温度在内的退火工艺,并进行多次退火(800 °C, 20 h)处理,提高了光纤布拉格光栅的稳定性。通过对其进行标定测试,获得了温度-波长的精确拟合函数。结果表明,传感器在 100~500 °C 温度范围内的精度达±0.2 °C。经过现场测试,该传感器可实现对高功率散裂靶温度的精确测试。

关键词 光纤布拉格光栅; 高温传感器; 高精度; 温度测量

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230752

High-Temperature Fiber Bragg Grating Sensor Array Based on Femtosecond Fiber Grating

Zhao Xian^{1,2}, Wang Yongjie^{2*}, Li Huicong^{2,3}, Zhang Dengpan¹¹School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;²Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;³Center of Materials Science and Optoelectronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, a high-temperature sensing array based on a femtosecond fiber grating was designed to address the temperature measurement needs of high-power spallation targets. The temperature range and mechanical strength of the sensor were enhanced using a femtosecond laser-engraved fiber grating and a tubular encapsulation method. The annealing process, i. e., annealing steps, annealing time, and annealing temperature, was investigated and optimized. Additionally, multiple annealing (800 °C, 20 h) was conducted to improve the stability of the fiber Bragg grating. An accurate fitting function of temperature-wavelength was obtained through its calibration test. The sensor has an accuracy of ±0.2 °C in the temperature range of 100–500 °C, with good repeatability. Moreover, on-site testing results indicate that the proposed sensor can achieve precise temperature testing of high-power spallation targets.

Key words fiber Bragg grating; high temperature sensor; high accuracy; temperature measurement

1 引言

温度作为表征物体状态的一个基本参量,其测量精度关系到工业动力、油气电力、铸造化工、航空航天等领域的正常运转^[1],例如在国际油气运输、井下开采、高新材料冶炼、新一代的航空大推力发动机运转等方面都需要高温范围的温度测量^[2-3]。商用的传统热电偶温度传感器存在抗腐蚀能力差、抗电磁干扰性能

差、测温范围小、测量精度低等问题^[3],不利于在高温恶劣的环境中长期稳定工作。与其相对的是,高温光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有抗电磁干扰能力强、体积小、耐腐蚀性强、测温范围广、复用能力强等优点,在近些年来受到广泛关注,逐渐成为在高温恶劣的环境中进行温度检测的主要器件。

FBG 温度传感器的核心传感元件是光纤光栅。通过紫外线曝光得到的 I 型光纤光栅一般只能应用于

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-04-04; 录用日期: 2023-04-10; 网络首发日期: 2023-04-21

通信作者: *wyj@semi.ac.cn

常温环境的温度传感,在高温环境中,因为随着温度升高,其折射率的周期性调制会逐渐消失,无法用于传感^[4]。经过国内外学者的深入研究,发现飞秒激光脉冲峰值功率密度很高,可以在超短时间内积累极高的能量。飞秒激光在光纤中形成的折射率调制比紫外线曝光引起的折射率调制高很多,通过此方式制备的 FBG 耐温性能大幅度提高。

FBG 温度传感器需要进行退火和封装处理。退火处理可以释放 FBG 内部的残余应力,进而提高传感器的热稳定性和可靠性,以实现稳定的温度测量。退火效果与光纤材料、退火工艺、操作波长等因素有关,所以优化热退火工艺对 FBG 的性能提高十分重要^[5]。经过退火处理的光纤变得十分易碎,选用合适的封装材料和技术对光纤进行保护是十分必要的。封装材料的选择是实现高精度、高温传感的关键因素。首先,封装材料需要足够的机械强度以保护裸光栅,避免交叉应力的干扰。其次,封装材料与光纤的热膨胀系数需保持匹配,避免封装材料对温度测量精度造成干扰^[6]。所以,传感器的封装是高温 FBG 传感器实现高精度测温的研究重点之一。

近年来,高温 FBG 传感器引起了广泛关注。2012 年, Barrera 等^[7]利用陶瓷管和镍合金管对光纤光栅进行了封装,该传感器最高测试温度达 1000 °C,精度在 ±5 °C 以内。2014 年, Cui 等^[8]对红外飞秒激光刻写的 FBG 进行了再生研究,经过 19 小时 800 °C 的高温退火后,光栅强度达到饱和,约为初始光栅的 5%。2015 年 Mamidi 等^[9]利用不锈钢管和陶瓷管封装飞秒刻写的光纤光栅,测量温度范围为 20~650 °C,分辨率为 1 °C。2016 年 Hsiao 等^[10]采用溅射技术成功制备了一种新型的高温传感器,该传感器在 100~650 °C 的温度范围内波长与温度成线性关系,线性度为 0.992,灵敏度约为 14.0 pm/°C。2021 年深圳大学陈梓泳等^[11]利用飞秒激光逐点法制备具有光纤布拉格光栅的高温传感器阵列,在 700 °C 高温下 FBG 阵列传感器的测温精度优于 ±1.8 °C。上述研究表明利用 FBG 实现高温传感的方式有很多^[12],但是在高温下的测量精度还需要进一步提高。

本文探究了飞秒激光刻写 FBG 阵列的原理和退火工艺,成功研制了高精度的高温传感器。采用飞秒

激光制作了包含 4 个不同波长的耐高温 FBG 阵列,并在 800 °C 温度下进行循环多次退火处理,提高了 FBG 的波长稳定性,保证了高温下的测量精度。选用不锈钢管对其进行管式封装。经实验测试,该传感器阵列测量的温度范围为 100~500 °C,测量精度优于 ±0.2 °C,该传感器具有很好的一致性和重复性。

2 高温 FBG 阵列传感原理及制备过程

2.1 FBG 传感原理

光纤布拉格光栅相当于一个光学滤波器,当一束宽带光入射到光纤光栅,满足布拉格条件的光被反射回来,形成一个窄带反射谱。对于均匀周期的光纤布拉格光栅,根据光纤光栅传输耦合模理论,反射光对应的中心波长为

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

式中: n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为光纤光栅周期。当外界环境的参数发生变化会引起有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 发生变化,中心波长 λ_B 就会随之改变,通过解调光纤光栅中心波长的漂移情况,实现对外界物理量变化的检测。当外界其他参量不变,光纤光栅只受温度变化影响时,热膨胀效应引起的光纤光栅周期的变化为

$$\Delta\Lambda = \alpha_f \Lambda \Delta T, \quad (2)$$

式中: α_f 为光纤光栅的热膨胀系数; ΔT 为外界温度变化。热光效应引起的纤芯的有效折射率的变化为

$$\Delta n_{\text{eff}} = \xi_f \cdot n_{\text{eff}} \cdot \Delta T, \quad (3)$$

式中: ξ_f 为光纤光栅的热光系数。则光纤光栅中心波长的相对变化率为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} = (\alpha_f + \xi_f) \Delta T. \quad (4)$$

常温下 α_f 和 ξ_f 为常数,中心波长的变化和温度成线性关系,但当 FBG 处于高温环境时, α_f 和 ξ_f 受温度变化的影响较大,不再是常数,应采用高阶多项式拟合中心波长与温度的关系,表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = \lambda_B \times \left(\frac{d\lambda_B}{dT} + \frac{1}{2} \frac{\lambda_B^2}{dT^2} \Delta T + \frac{1}{6} \frac{\lambda_B^3}{dT^3} \Delta T^2 + \dots \right). \quad (5)$$

封装后,热膨胀系数为 α_d 的材料也会随温度变化而发生变化,将各参量代入式(5),为提高精度,保留三次项,可得

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [p_{\text{eff}}\alpha_f + \xi_f + (1 - p_{\text{eff}})\alpha_d] \Delta T + \frac{1}{2} \left\{ p_{\text{eff}} \frac{d\alpha_f}{dT} + \frac{d\xi_f}{dT} + (1 - p_{\text{eff}}) \frac{d\alpha_d}{dT} + [p_{\text{eff}}\alpha_f + \xi_f + (1 - p_{\text{eff}})\alpha_d]^2 \right\} \times \Delta T^2 + \frac{1}{6} \left\{ p_{\text{eff}} \frac{d\alpha_f^2}{dT^2} + \frac{d\xi_f^2}{dT^2} + (1 - p_{\text{eff}}) \frac{d\alpha_d^2}{dT^2} + [p_{\text{eff}}\alpha_f + \xi_f + (1 - p_{\text{eff}})\alpha_d]^3 \right\} \Delta T^3, \quad (6)$$

式中: p_{eff} 为光纤材料的有效弹光系数。采用光栅进行测温,将式(6)的温度变化与中心波长变化的关系转换为温度和波长的函数关系,有

$$\lambda_B(T) = AT + BT^2 + CT^3 + D, \quad (7)$$

式中: A 为一次项系数, B 为二次项系数, C 为三次项系数; D 为温度为 0 时对应的初始波长。

2.2 基于飞秒激光的 FBG 阵列制备

采用飞秒激光逐点法制备 FBG, 过程如图 1 所示。OSA 为光谱仪, ASE 为宽带光源, 左右两端的 OSA 分别用来观测透射谱和反射谱。当飞秒激光通过高数值孔径的物镜聚焦在光纤内部, 激光焦点处极强的激光场将引发光纤对激光的非线性吸收, 导致在激光焦点处聚集大量的电子-离子等离子体, 随着等离子体的结合和能量消耗, 光纤内就形成一段折射率调制区域^[12], 即 FBG。调制区域的间距就是光栅周期 Λ , 由脉冲频率 f 和光纤移动速度 v 共同决定。通过控制飞秒激光的能量和调制域的间距, 就可以得到不同反射率和周期的单个 FBG。

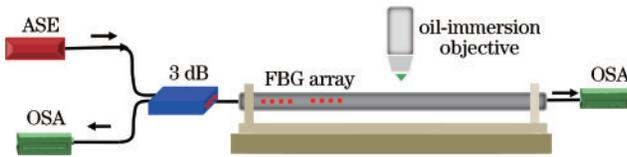


图 1 飞秒光栅制备过程示意图

Fig. 1 Schematic of the femtosecond-grating preparation process

采用脉冲能量为 220 nJ、重复频率为 1 kHz 的激光, 在光纤移动速度为 1.071 mm/s 时在单模光纤上制备出单个 FBG, 其周期为 1.071 μm , 长度为 2 mm。通过光谱仪观察到的光谱如图 2 所示, 可以发现, 该 FBG 的中心波长为 1546 nm, 插入损耗 (IL) 约为 8 dB, 3 dB 带宽 (BW@3 dB) 为 0.45 nm。利用相关程序控制移动台到下个 FBG 刻写的起始位置, 继续刻写就可以得到 FBG 阵列。

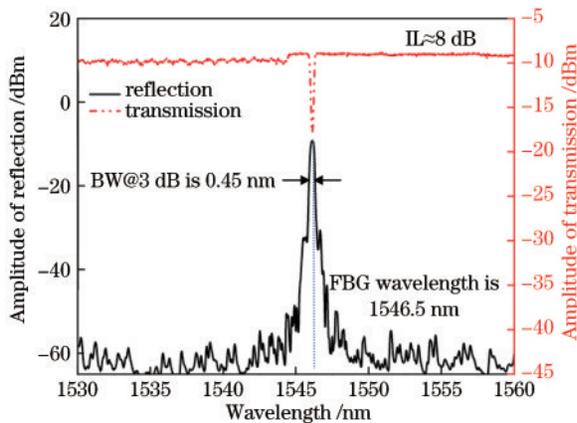


图 2 FBG 的透射谱和反射谱

Fig. 2 FBG reflection and transmission spectra

2.3 FBG 阵列热退火实验

光纤光栅的热稳定性对传感器的高精度测量是十分重要的。由于光纤的折射率 n 会随内部应力的变化而变化, 最终导致中心波长 λ_B 发生漂移。对光纤光栅进行退火, 光栅内部应力会随着时间的增加而释放, 中心波长会趋于稳定, 进而可以提高传感器的热稳定性

和可靠性, 实现高温范围内的高精度传感。

对飞秒激光刻写的 FBG 阵列进行热退火实验, 整体实验装置如图 3 所示。实验过程如下: 首先, 将 FBG 阵列放入管式加热炉, 使用热电偶作为温度标准实时监测炉内温度; 所用解调仪为自主研发, 内置可调谐光源, 发出的宽谱光进入 FBG 阵列中, 经 FBG 反射的光通过环形器回到解调仪; 对反射光谱的中心波长变化进行实时监测, 同时反射光传输到光谱仪, 光谱仪实时反映在退火过程中光谱的变化。管式加热炉的最高工作温度为 1100 $^{\circ}\text{C}$, 温度测量精度为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。管式加热炉实物如图 3 所示, 为保证精度, 开始实验前在管式加热炉的不同位置进行了温度梯度测试。

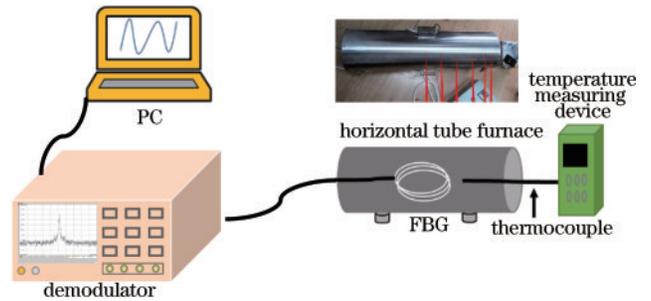


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup

退火处理中的退火温度、退火步骤和退火时间会影响 FBG 的反射谱强度和其他光谱性能。高温下, 恒温退火更有利于 FBG 内部预应力的均匀释放, 使 FBG 最终的中心波长更稳定, 同时恒温的环境对 FBG 机械强度的损伤也会更小^[13]。对退火工艺的研究和优化也是提高 FBG 性能和测温精度的关键。

本实验对 FBG 的退火共分为 3 个阶段, 如图 4 所示。第一阶段是加热升温阶段, 需要从室温 (20 $^{\circ}\text{C}$) 升至 800 $^{\circ}\text{C}$, 耗时约 200 min; 第二阶段为温度保持阶段, 需要在 800 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下保持 200 min; 第三阶段为冷却阶段, 需要自然冷却至室温。退火阶段至少重复 3 次。此外, 整体需采用均匀加热的方式, 以避免单个 FBG 内部应力释放不充足, 造成该阵列性能下降, 同时需格外注意对光纤接头的保护。

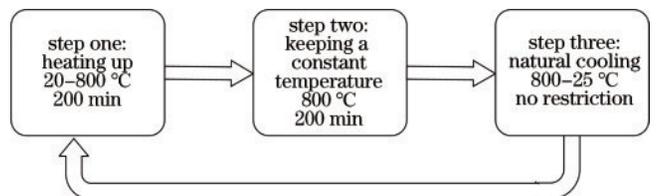


图 4 退火过程

Fig. 4 Annealing process

退火后 FBG 阵列的光谱如图 5 所示。FBG1~FBG5 的中心波长分别为 1529.43 nm、1536.30 nm、1543.19 nm、1549.97 nm、1557.23 nm, 与退火前相

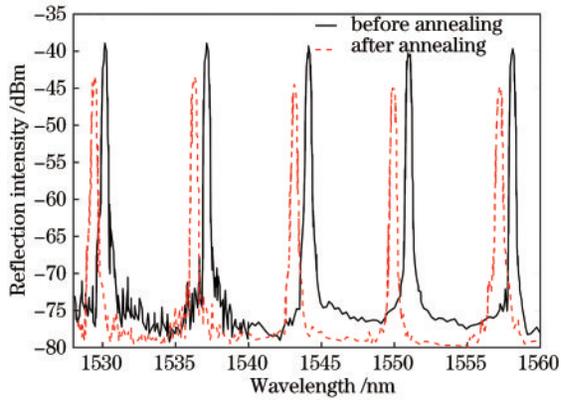


图5 退火前后的光栅光谱

Fig. 5 FBG spectra before and after annealing

比,FBG 阵列的中心波长发生了蓝移。这是因为,在退火过程中,预应力的释放使 FBG 中心波长约有 2 nm 的偏移,且反射率有一定程度降低。但是,光谱仪仍能清楚地观测到反射光谱,这表明 FBG 经过高温处理后虽然存在一定程度的衰退,但仍具有在高温环境下良好的传感能力。

2.4 FBG 的封装

在实际应用中,由于环境恶劣,需要对 FBG 栅区和光纤本身进行保护。利用耐高温材料对传感器阵列进行管式封装不仅可以起到保护的作用同时操作简便便捷。在封装材料中,不锈钢管可以在不改变 FBG 应变传感特性的同时,大大提高光纤光栅的温度传感特性,对比裸纤,极大地提升了测温精度^[14],而且定制成本低、周期短,适用于工程化应用。故本研究采用直径为 1 mm 的细金属管对飞秒光纤光栅阵列进行封装,制成高温传感器,其结构原理如图 6 所示。阵列中的 4 个飞秒 FBG 封装在细金属管中,处于自由状态,确保其不受外界应力影响。不锈钢管的一端开口处用激光焊接,采用 FC/APC 连接器对另一端引出的光纤与外部进行连接。阵列中 FBG 的数量可以根据实际需求增加或减少,FBG 的间距可根据被测温对象的尺寸进行精准设计。传感器的实物如图 7 所示。

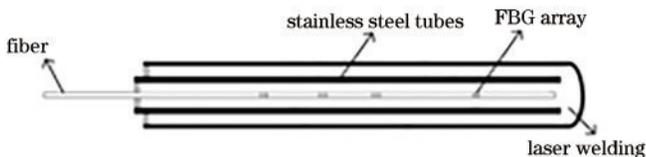


图6 封装结构示意图

Fig. 6 Schematic of package structure

3 高温 FBG 传感器阵列的标定及实测

3.1 传感器标定

温度标定是温度传感器实现精确测温的必要步骤^[15]。温度标定实验系统如图 8 所示,该系统由传感解调系统和恒温系统两部分组成。传感解调系统由超连

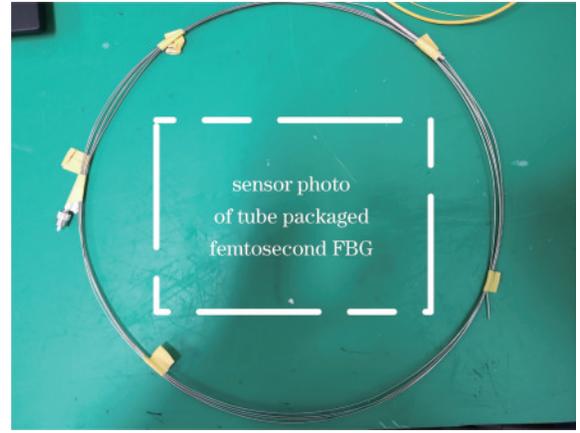


图7 实物照片

Fig. 7 Photo of the sensor

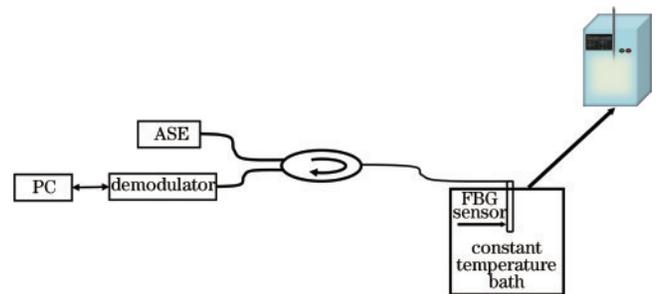


图8 温度标定实验系统

Fig. 8 Temperature calibration experiment system

续宽带光源、环形器、便携式解调仪组成。恒温系统主要由智能恒温槽进行精确控温,控温精度可达 0.1℃。

本次标定实验的温度范围为 100~500℃。标定实验过程:首先将封装后的高温光纤光栅传感器放置在控温槽内,在 100~300℃范围内,采用油浴加热,分布 4 个标定点,升温温度间隔 50℃,每个标定点稳定时长为 60 min;300~500℃范围内,采用盐浴加热,均匀分布 4 个标定点,升温温度间隔 50℃,每个标定点稳定时长为 70 min。标定过程如图 9 所示,在标定点稳定的时长内,用解调仪每 1 min 采集每个 FBG 的中心波长,并对采集到的值进行均值处理,最后的均值即为标定点处对应的 FBG 中心波长。

3.2 传感器温度-波长的拟合

从式(7)可知,光纤光栅中心波长的漂移量与温度的变化在高温下呈非线性。结合标定得到的数据,对 FBG 阵列中的每个 FBG 分别进行温度-中心波长的三次函数拟合,得到中心波长随温度变化的曲线,如图 10 所示,拟合函数分别为

$$\lambda_{B1}(T) = -6.18890 \times 10^{-9} T^3 + 9.9492 \times 10^{-6} T^2 + 0.0091T + 1528.61, \quad (8)$$

$$\lambda_{B2}(T) = -5.61912 \times 10^{-9} T^3 + 9.9490 \times 10^{-6} T^2 + 0.0089T + 1536.02, \quad (9)$$

$$\lambda_{B3}(T) = -3.12486 \times 10^{-9} T^3 + 7.2460 \times 10^{-6} T^2 + 0.0098T + 1543.14, \quad (10)$$

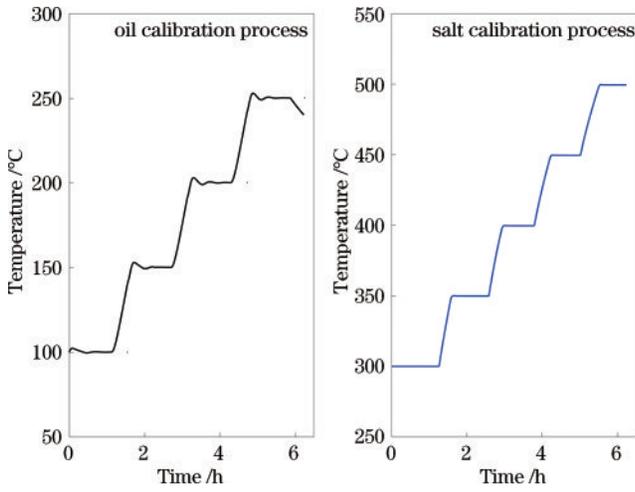


图 9 标定过程记录

Fig. 9 Calibration process record

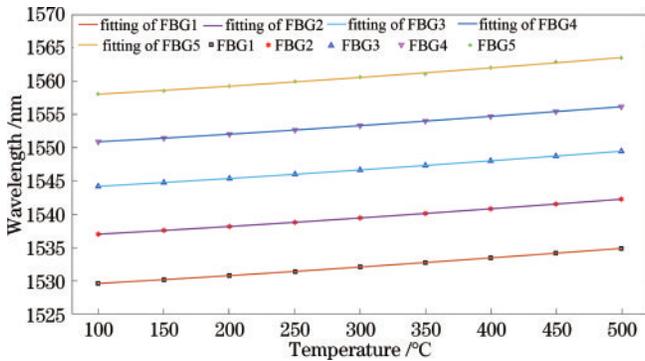


图 10 中心波长随温度变化的拟合结果

Fig. 10 Fitted result of center wavelength as a function of temperature

$$\lambda_{B4}(T) = -8.40146 \times 10^{-9} T^3 + 1.2962 \times 10^{-5} T^2 + 0.0080T + 1549.97, \quad (11)$$

$$\lambda_{B5}(T) = -4.11900 \times 10^{-9} T^3 + 8.4032 \times 10^{-6} T^2 + 0.0098T + 1557.01. \quad (12)$$

图 10 中 5 条 FBG 温度-中心波长的拟合曲线与阵列中每个 FBG 一一对应, 5 个三次拟合函数的相关系数都达 0.99999 以上, 说明三次拟合函数更精确地表达了温度和 FBG 的关系, 同时 5 个 FBG 拟合函数曲线整体趋势一致, 说明传感器具有很好的一致性。

3.3 传感器精度测定

得到传感器温度-波长的三阶拟合函数后, 在北京市计量检测科学研究院进行传感器测量误差实验。测试温度为 100~500 °C, 以 100 °C 为温度步长, 依次测量传感器的波长, 并根据拟合函数得到传感器测量的温度值, 并与热电偶所测得的标准温度进行对比, 对比结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出, FBG5 所测的温度值与标准值的误差在 ±0.05 °C 内, 基于飞秒 FBG 高温传感阵列,

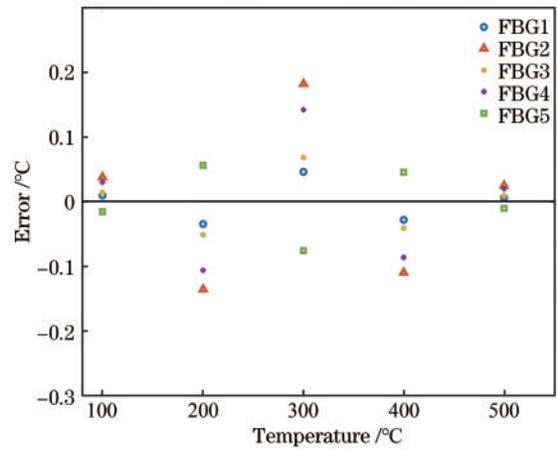


图 11 温度测量误差分布

Fig. 11 Temperature measurement error distribution

所有 FBG 所测温度值与标准值之间的最大误差在 ±0.2 °C 内。

3.4 传感器应用

许多应用场景都需要进行分布式的高温测量, 比如高功率散裂靶表面温度场的分布式测量。散裂靶是加速器驱动的次临界系统的一部分且长时间处于高温环境中, 其温度的精确监测对整个系统的正常运行至关重要。

如图 12 所示, 散裂靶装置呈圆筒状, 根据实际需求, 在筒状高温部件表面 5 个部位布设高温传感器阵列, 组建准分布式温度传感网络。解调系统实时对传感器阵列中的每个 FBG 的中心波长进行监测, 并根据解调公式进行温度值的实时解算, 从而得出装置的温度分布。系统界面如图 13 所示, 当监测温度达到阈值时, 上位机系统自动发出报警信息, 提示工作人员进行处理。运行结果显示, 高温传感阵列可以实现对散裂靶表面温度的精确测量。



图 12 传感器实测安装图

Fig. 12 Sensor actual measurement installation diagram

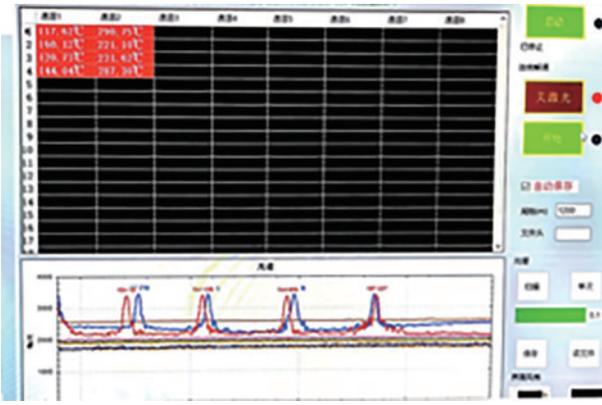


图 13 运行系统界面

Fig. 13 System operation interface

4 结 论

以进行极端环境下的高温监测为导向,设计并制备了由飞秒激光刻写的高温 FBG 传感阵列。阵列使用不锈钢管进行封装,包含 5 个 FBG 测温元件,经过多次循环退火后,阵列的反射光谱趋于稳定,FBG 内部预应力得到释放,稳定性得到提升。在 100~500 °C 的温度范围内,经过精确的标定,得到了传感器的温度-波长拟合曲线。通过与热电偶所测温度参考值进行比较,表明单个 FBG 的温度测量精度优于 ± 0.05 °C,传感器阵列整体的温度测量精度优于 ± 0.2 °C。相较传统的热电偶温度传感器,该传感器可实现分布式测量;相比其他 FBG 高温传感阵列,该阵列整体测温精度较高,可实现对被测物体更精确的测温。将高温传感阵列安装在散裂靶表面,可进行长时间的实时分布式温度测量。研究成果有望应用于航空发动机、高速飞行器、核反应堆等恶劣环境中的高温测量。

参 考 文 献

- [1] Li Y H, Yang M W, Liao C R, et al. Prestressed fiber Bragg grating with high temperature stability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1555-1559.
- [2] Goto H, Kaneko Y, Young J, et al. Extreme accelerations during earthquakes caused by elastic flapping effect[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 1117.
- [3] 徐锡镇. 蓝宝石光纤光栅的制备及高温传感特性研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
Xu X Z. Preparation of sapphire fiber grating and study on high temperature sensing characteristics[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [4] Zhang Y M. Fiber grating: principles techniques and sensing applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [5] 王楠楠, 师钰璋, 王高, 等. 蓝宝石光纤高温测量技术

进展[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 61-68.

Wang N N, Shi Y Z, Wang G, et al. Review of high temperature measurement with sapphire monocrystalline fiber[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(6): 61-68.

- [6] 刘福禄, 张钰民, 庄炜, 等. 基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1506002.
Liu F L, Zhang Y M, Zhuang W, et al. Fiber temperature sensor with composite structure based on vernier effect and substrate sensitization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1506002.
- [7] Barrera D, Finazzi V, Villatoro J, et al. Packaged optical sensors based on regenerated fiber Bragg gratings for high temperature applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 107-112.
- [8] 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.
- [9] Mamidi V R, Kamineni S, Sai Prasad Ravinuthala L N, et al. High-temperature measurement using fiber Bragg grating sensor accompanied by a low-cost detection system[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1): 094098.
- [10] Hsiao T C, Hsieh T S, Chen Y C, et al. Metal-coated fiber Bragg grating for dynamic temperature sensor[J]. Optik, 2016, 22(127): 10740-10745.
- [11] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306002.
Chen Z Y, He J, Xu X Z, et al. High-temperature sensor array based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser point-by-point method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306002.
- [12] Wang D N. Review of femtosecond laser fabricated optical fiber high temperature sensors[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 091204.
- [13] 余顶. FBG/FP 复合传感器高低温传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
Yu D. Study on high and low temperature sensing characteristics of FBG/FP composite sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [14] 王于鹏. 基于热重生光纤光栅的超高温传感研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
Wang Y P. Research on ultra-high temperature sensing based on thermally regenerated fiber grating[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [15] 薛渊泽. 光纤光栅高温传感技术研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2018.
Xue Y Z. Research on fiber Bragg grating high temperature sensing technology[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2018.