

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.01

飞秒光纤光栅高温测量方法研究

张鹏浩, 陈爽, 武洪波

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为了实现高温环境下温度的准确测量, 利用飞秒激光制备的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings, FBG)杰出的热稳定性, 提出一种基于飞秒光纤光栅的高温测量方法。利用光纤热光系数、热膨胀系数与温度之间的依赖关系, 建立了FBG中心波长-温度模型; 由于该模型不存在解析解, 利用单点中心波长-温度特解和四次多项式拟合温度-中心波长工作曲线。基于该工作曲线和预退火(1 000 °C, 20 h)FBG在常温至900 °C范围内进行温度测量实验, 结果表明最大测量偏差不超过 ± 2 °C。本方法仅需标定单点中心波长-温度即可实现宽温度范围内的温度准确测量, 简洁有效, 在航空航天、核电冶金等领域中具有重要的研究和应用价值。

关键词: 飞秒激光; 光纤布拉格光栅; 工作曲线; 退火; 高温测量

中图分类号: TB942; TP21

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)05-0001-06

A high temperature measurement method using femtosecond fiber Bragg gratings

ZHANG Penghao, CHEN Shuang, WU Hongbo

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to achieve accurate temperature measurement in high-temperature environments, a measurement method based on femtosecond fiber Bragg gratings (FBG) is proposed, utilizing the outstanding thermal stability of FBG fabricated by femtosecond lasers. A FBG central wavelength-temperature model was established based on the dependence of thermal optical coefficient and thermal expansion coefficient on temperature. Since there is no analytical expression for the model, the temperature-central wavelength working curve is fitted by using the single point specific solution of central wavelength-temperature and quartic polynomial. Based on this working curve and pre annealing (1 000 °C, 20 h) FBG, temperature measurement experiments were conducted from room temperature to 900 °C, and the results showed that the maximum measurement deviation was less than ± 2 °C. This method only needs to calibrate a single point central wavelength-temperature to achieve accurate temperature measurement over a wide temperature range. It is simple and effective, and has important research and application value in the fields such as aerospace, nuclear power metallurgy, etc.

Key words: femtosecond laser; fiber Bragg gratings; working curve; annealing; high temperature measurement

0 引言

在航空航天、核能、冶金、电力等领域, 往往需要在高温、高压、振动和强电磁干扰等极端

恶劣环境中对多种参数进行监测, 光纤布拉格光栅具有灵敏度高、热稳定性好和复用能力强的优势^[1-3], 是理想的结构健康监测传感元件。传统的FBG利用紫外激光和相位掩模板技术在载氢的标

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-06-05

引用格式: 张鹏浩, 陈爽, 武洪波. 飞秒光纤光栅高温测量方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 1-6.

Citation: ZHANG P H, CHEN S, WU H B. A high temperature measurement method using femtosecond fiber Bragg gratings[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 1-6.



准石英单模光纤上刻制而成,这种FBG为典型的Type I型折射率调制,在超过300℃时会被逐渐擦除,无法在高温环境中使用。飞秒激光具有脉冲极短、峰值功率极高的特点^[4],当激光能量高于光纤材料的损伤阈值时,在飞秒激光曝光的区域,光纤材料会发生微爆炸熔化,随后迅速凝固收缩,形成永久性的Type II型折射率调制^[5-6],利用这种方式制备的FBG具有极高的热稳定性,耐受温度高达1 000℃^[7]。

在光纤的拉制以及飞秒激光刻制FBG的过程中,光栅区域会不可避免地引入残余应力,影响高温测量准确性。退火是释放FBG内部残余应力、提高FBG在高温下稳定性和可靠性的有效方法。香港理工大学王东宁研究小组在1 000℃时进行高温退火以释放残余应力,将FBG耐温上限提高至1 200℃^[8];随后该团队在退火的基础上进行空气淬火,进一步提高了FBG的机械强度^[9]。Warren-Smith S C等人对悬芯光子晶体光纤光栅进行了1 000、1 050、1 100℃的退火特性研究,结果表明未退火光栅呈现不同程度的中心波长红移或蓝移,退火光栅几乎不存在中心波长漂移,研究还表明更高的退火温度能够使FBG获得更高的稳定性^[10]。

FBG的温度响应受光纤热膨胀系数和热光系数影响,北京理工大学江毅研究小组在0~1 200℃内标定并用多项式表征了热膨胀系数、热光系数与温度之间的对应关系^[11]。2020年,武汉邮电科学研究院胡文芳等人采用二次多项式拟合标定了FBG在-20~80℃的温度曲线,温度间隔为5℃,最大测量偏差为0.7℃^[12]。西安交通大学杜勇等人在300~800℃范围内以100℃间隔进行了标定,采用线性拟合的方式,实测温度与设定温度之间的偏差小于5℃^[13]。深圳大学王义平研究小组利用高温长时间退火(700℃,195 h)提高了FBG的波长稳定性,在700℃下以50℃为间隔进行多点标定,采用三次多项式拟合温度测量偏差不超过±1.8℃^[14]。

现有研究通过退火配合不同的标定拟合方法获得了较好的测试结果,但却往往需要在温度测量范围内多点密集标定FBG的温度响应,增加了FBG高温测量的复杂性,限制了其在工业领域的实际应用。针对此问题,本文提出一种基于飞秒

光纤光栅的高温测量方法,根据热光系数和热膨胀系数的温度响应,建立FBG中心波长与温度的高阶多项式模型,根据单点中心波长与温度的特解结合拟合方法得到温度-中心波长工作曲线;利用飞秒激光逐点法结合退火技术,制备具有高温稳定性的FBG。基于温度-中心波长工作曲线和制备的FBG进行实际温度测量实验,验证基于飞秒光纤光栅的高温测量方法的可行性与准确性。

1 FBG的中心波长-温度模型

FBG的中心波长 λ 满足布拉格光栅谐振方程,即

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

式中: n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率, Λ 为FBG的周期。将谐振方程对温度 T 求导,得到中心波长对温度的响应特性为

$$\begin{aligned} \frac{d\lambda}{dT} &= \lambda(\alpha + \zeta) \\ \alpha &= \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \\ \zeta &= \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: α 和 ζ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。当温度较低时,可认为光纤的热膨胀系数和热光系数为常数,但是在高温环境下,光纤的热膨胀系数和热光系数将与温度产生复杂的依赖关系,可表示为^[11]

$$\alpha = aT + b \quad (3)$$

$$\zeta = cT^2 + eT + f \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 c 、 e 、 f 为参数, $a = 1.24 \times 10^{-10}$, $b = 5.36 \times 10^{-7}$, $c = 1.611 \times 10^{-9}$, $e = 1.09 \times 10^{-5}$, $f = 1.447$ 。将式(1)、式(3)和式(4)代入式(2),可得

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \left(aT + b + \frac{2cT + e}{cT^2 + eT + f} \right) \quad (5)$$

对式(5)两侧积分并化简得到FBG的中心波长-温度特性模型,即

$$\lambda = (cT^2 + eT + f) \cdot e^{\frac{1}{2}aT^2 + bT + K} \quad (6)$$

式中: K 为常数,在已知特定温度 T_0 条件下,中心波长 λ_0 时,可通过反解式(6)得到,即

$$K = \ln \left(\frac{\lambda}{cT^2 + eT + f} \right) - \frac{1}{2}aT^2 - bT \quad (7)$$

式(6)建立了中心波长-温度特性模型,但在实

际使用过程中，往往需要依据实测的中心波长 λ 求得温度 T ，即需要反解得出实际的温度 T -中心波长 λ 工作曲线 $T=f(\lambda)$ 。由于利用式(6)无法求得温度 T -中心波长 λ 之间的解析解，因此采用多项式拟合获得近似解。为明确合理的拟合次数，在0~900℃之间，采用最高九次多项式拟合，并求出拟合结果与直接采用式(6)得到的温度结果之间的偏差，如图1所示。随着拟合阶次提高，温度偏差呈逐步减小趋势。统计最大温度偏差如表1所示。当拟合阶次达到四次时，最大温度偏差已经不足0.01℃，可用于温度测量。进一步提高拟合阶次虽然能够降低偏差，但会显著增加计算复杂度，不利于实际应用。

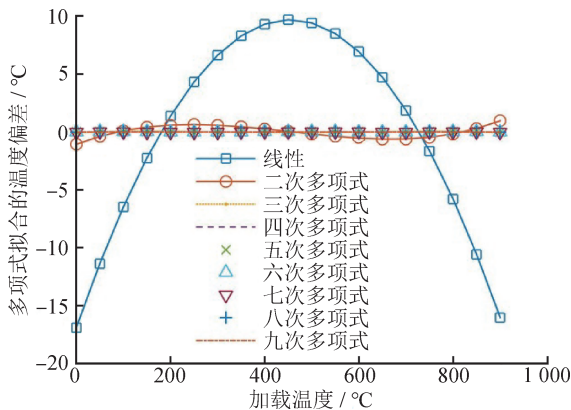


图1 不同次数多项式拟合的温度偏差
Fig.1 Temperature deviation fitted by polynomials of different orders

表1 不同次数多项式拟合的最大温度偏差
Tab.1 Maximum temperature deviation fitted by polynomials of different orders °C

拟合方式	最大温度偏差
线性拟合	16.918 83
二次多项式拟合	1.066 75
三次多项式拟合	0.075 29
四次多项式拟合	0.005 42
五次多项式拟合	0.001 04
六次多项式拟合	0.000 50
七次多项式拟合	0.000 32
八次多项式拟合	0.000 12
九次多项式拟合	0.000 05

2 FBG的制备与退火

利用飞秒激光逐点法制备切趾FBG，实验装置如图2所示。飞秒激光经过快门、反射镜和衰减器等，由聚焦物镜聚焦到光纤纤芯内。掺钛蓝宝石飞秒激光光源的中心波长为800 nm，脉冲宽度为120 fs，重复频率为500 Hz，单脉冲能量为180 nJ；聚焦物镜放大倍数为40×，数值孔径为0.65；FBG刻制在具有聚酰亚胺涂覆层的标准石英单模光纤上，利用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)光纤定位系统实现光纤在xyz三维位移台上的精确定位。光纤在高分辨力电机带动下匀速移动，刻写路径为贯穿纤芯的线性平移斜线，用于实现FBG的切趾^[15]。利用光谱仪实时地监测FBG的生长过程。FBG的阶数为2阶，长度为3 mm，反射光谱如图3所示，中心波长为1 547.512 nm，3 dB带宽为0.52 nm，边模抑制比为20.1 dB。

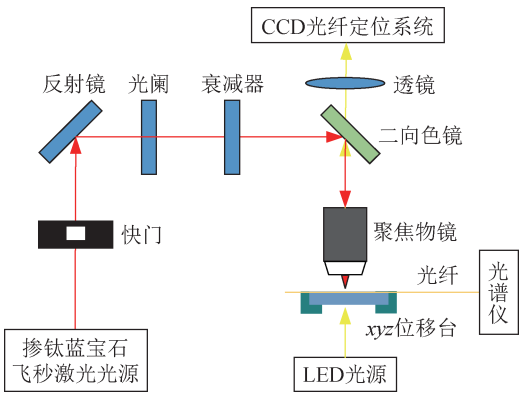


图2 飞秒激光逐点法制备FBG的装置
Fig.2 Experimental setup for fabricating FBG based on femtosecond laser point-by-point method

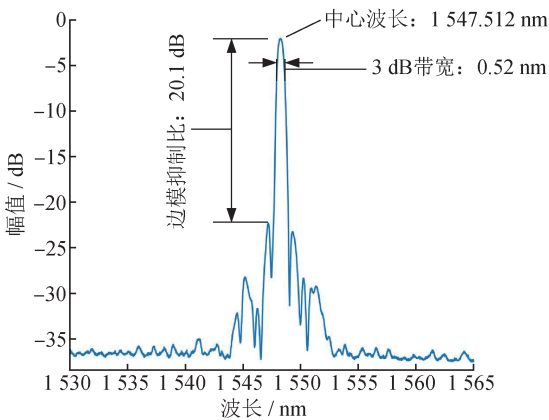


图3 FBG反射光谱
Fig.3 Reflection spectrum of FBG

利用管式高温炉对FBG进行退火,原理如图4所示。FBG置于管式高温炉正中,紧邻FBG放置一支I级N型热电偶,FBG和热电偶分别与高温炉外对应的解调仪表连接。管式高温炉的加温范围为常温至1 200 °C,控温误差不超过 ± 1 °C。

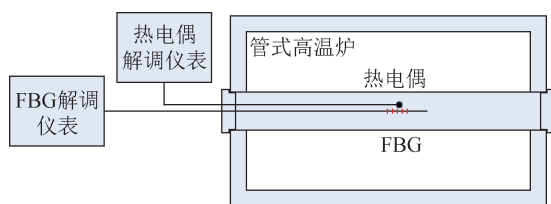


图4 FBG温度加载原理图

Fig.4 Schematic diagram of the annealing and calibration device for FBG

将高温炉以 $2\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率由常温逐步升温至1 000 °C,随后在1 000 °C保温20 h进行退火。退火前后FBG的显微照片如图5所示,退火前FBG的条纹具有清晰明锐的边界,退火后FBG的条纹边缘更为平滑,这可能与纤芯内飞秒激光诱导微爆炸形成的碎屑软化有关。在保温过程中,FBG中心波长先后经历快速红移、缓慢蓝移,最后趋于稳定,如图6所示。由于退火温度已接近二氧化硅的退火点,漂移方向呈现先红移后蓝移的复杂性,这可能是光纤拉制和FBG写入过程中形

成的应力逐步释放以及潜在的二氧化硅中 β -方晶石生长产生析晶等多种因素共同影响造成的^[7]。表2统计了不同时间段内FBG的中心波长的变化速率,随着退火过程进行,中心波长的变化速率由初始的 $12.5\text{ pm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降低至最终的 $0.2\text{ pm}\cdot\text{h}^{-1}$,实验结果表明高温退火有效地增加了FBG中心波长的稳定性。

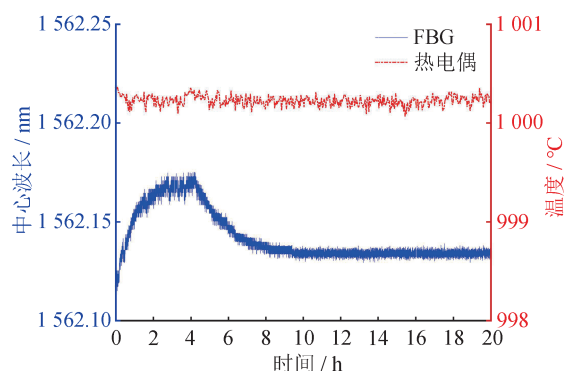


图6 退火过程中FBG中心波长漂移

Fig.6 Drift of the central wavelength of FBG during annealing

表2 退火过程中FBG中心波长变化速率

Tab.2 Drift rate of the center wavelength of FBG during annealing

时间/h	变化速率/($\text{pm}\cdot\text{h}^{-1}$)
0 ~ 4	12.5
5 ~ 8	-8.8
9 ~ 12	-0.6
13 ~ 16	-0.2
17 ~ 20	0.2

3 温度测量实验与讨论

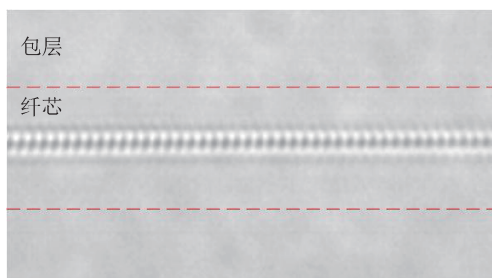
利用如图4所示的温度加载装置对预退火FBG进行温度测量实验,具体步骤为:

1) 标定出某一温度下FBG的中心波长值,代入式(7)求出 K 。在常温下(即 T_0 为20 °C时),FBG的中心波长 λ_0 为1 547.512 nm,计算得到 K 为6.974 90。

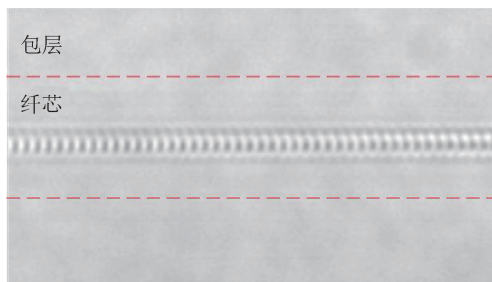
2) 将 K 代入式(6),并利用四次多项式拟合出式(6)的温度 T -中心波长 λ 工作曲线。

$$T = A\lambda^4 + B\lambda^3 + C\lambda^2 + D\lambda + E \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 、 E 为参数, $A = -2.683\,531\,936 \times 10^{-4}$, $B = 1.679\,669\,924$, $C = -3.942\,948\,738 \times 10^3$,



(a) 退火前
(a) Before annealing



(b) 退火后
(b) After annealing

图5 FBG的显微图像

Fig.5 Microscopic images of FBG

$D = 4.114\,250\,883 \times 10^6$, $E = -1.610\,098\,867 \times 10^9$ 。

3) 升温至待测温度, 将此时FBG的中心波长代入式(8), 计算得到FBG测量温度。将高温炉自50℃起始, 以50℃为间隔升温至900℃, 每个温度点保温30 min, 使FBG和热电偶充分受热达到平衡, 记录每个温度点FBG的中心波长和热电偶温度。利用FBG测量得到的温度与热电偶测量得到的温度对比如图7所示。在20~900℃范围内, FBG测量得到的温度与热电偶测量得到的温度基本一致, 最大偏差出现在100℃时, 为1.2℃。

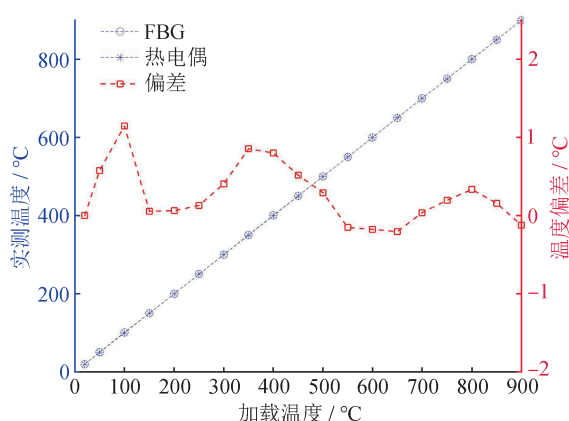


图7 利用FBG测量得到的温度与热电偶测量得到的温度对比

Fig.7 Comparison between temperatures measured by FBG and thermocouples

为了避免初始中心波长不同对测量准确性产生的影响, 采用10支不同初始中心波长(20℃条件下中心波长为1 515.343~1 560.021 nm)的FBG, 首先在1 000℃保温20 h进行预退火处理, 然后重复上述温度实验。10支FBG测量得到的温度与热电偶测量得到的温度偏差如图8所示。FBG测温偏差与初始中心波长未呈现显著相关性, 表明在测试波长范围内初始中心波长未对测量准确度产生明显影响。温度偏差均处于-1~2℃之间, 表明本方法在常温至900℃范围内温度测量偏差不得超过±2℃。本方法获得较高的测温准确度主要得益于两点: ①预退火提升了FBG的高温稳定性; ②工作曲线绘制准确, 符合高温环境下热膨胀系数、热光系数与温度之间的高精度依赖关系。

由于本方法在标定温度下的温度测量偏差始终为0℃, 改变K值标定温度, 偏差曲线将会根据标定温度整体上下平移。以温度偏差相对较大的

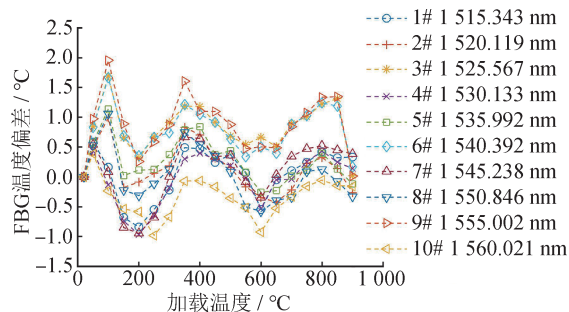


图8 不同中心波长FBG的温度偏差

Fig.8 Temperature deviations of FBG with different initial center wavelengths

9#FBG(初始中心波长1 555.002 nm)为例, 采用不同标定温度(20~900℃)计算温度偏差, 如图9所示。当采用20℃计算K值时, 曲线中20℃时的测量偏差为0℃, 100℃时的测量偏差为1.98℃; 当采用100℃计算K值时, 曲线中100℃时的测量偏差为0℃, 相较20℃时曲线测量偏差值整体下移1.98℃。由于FBG的温度测量偏差的最大值与最小值之间的差值始终小于2℃, 因此采用不同标定温度的测量偏差仍不超过±2℃。

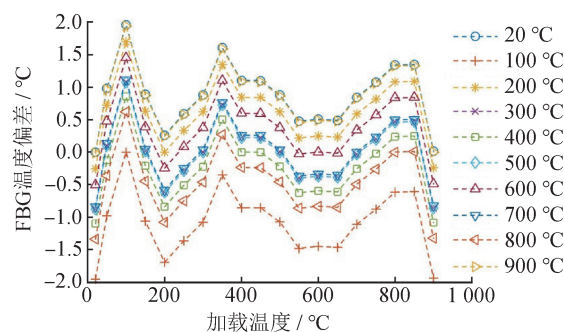


图9 不同标定温度时的温度偏差

Fig.9 Temperature deviations at different calibration temperatures

4 结论

提出了基于飞秒光纤光栅的高温测量方法, 只需在常温标定单点中心波长-温度, 即可实现全温度测量范围内的高精度测量。在常温至900℃范围内, 该方法的温度测量偏差不得超过±2℃, 准确性高, 且操作便捷高效, 极大地降低了FBG用于高温测量的复杂程度, 有利于进一步扩展飞秒激光FBG在极端环境下的工程应用。

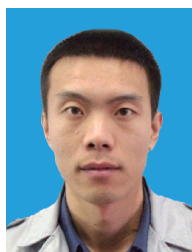
实验中, 随着温度变化, FBG的测温偏差呈

一定的规律性,这可能是由模型本身精度不足造成的。模型中采用线性和二次多项式分别表征热膨胀系数和热光系数与温度的依赖关系,虽然相较于取常数的方式准确性有所改善,但是这种依赖关系可能仍不足以非常精确地描述实际光纤材料的温度特性。采用更高精度的热膨胀系数和热光系数能够改善这种规律性差值,但是如何进一步提高高温环境下这两项参数的准确度仍有待研究。

参考文献

- [1] ZHAO Y, HE T Y, CHEN M Q, et al. Ultra-short fiber Bragg grating composed of cascaded microchannels in a microprobe for refractive index measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 44(8): 2555–2561.
- [2] JI L T, SUN Q Q, ZHAO S S, et al. High-resolution fiber grating pressure sensor with in-situ calibration for deep sea exploration[J]. Optics Express, 2023, 31(6): 10358–10367.
- [3] ZHANG R L, WU X, HONG L, et al. High-sensitivity fiber Bragg grating strain sensor of the substrate type[J]. Applied Optics, 2022, 61(35): 10567–10573.
- [4] 廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 130–138.
LIAO C R, HE J, WANG Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 130–138. (in Chinese)
- [5] WEI S E, WANG Y T, YAO H, et al. Thermal stability of Type II modifications by IR femtosecond laser in silica-based glasses[J]. Sensors, 2020, 20(3).
- [6] WANG Y T, WEI S, CICCONI M R, et al. Femtosecond laser direct writing in $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ binary glasses and thermal stability of Type II permanent modifications[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2020, 103(8): 4286–4294.
- [7] GROBNIC D, HNATOVSKY C, DEDYULIN S, et al. Fiber Bragg grating wavelength drift in long-term high temperature annealing[J]. Sensors, 2021, 21(4).
- [8] 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.
- [9] LI Y H, YANG M W, LIAO C H, et al. Prestressed fiber Bragg grating with high temperature stability[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1555–1559.
- [10] WARREN-SMITH S C, SCHATNER E P, NGUYEN L V, et al. Stability of grating-based optical fiber sensors at high temperature[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(8): 2978–2983.
- [11] GAO H C, JIANG Y, CUI Y, et al. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5881–5886.
- [12] 胡文芳, 江山, 李凯. 基于光纤Bragg光栅传感器温度灵敏系数标定算法的研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(7): 64–68.
HU W F, JIANG S, LI K. Research on the calibration algorithm of temperature sensitivity coefficient of fiber Bragg grating sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(7): 64–68. (in Chinese)
- [13] 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): 64–71.
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): 64–71. (in Chinese)
- [14] 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): 15–23.
CHEN Z Y, HE J, XU X Z. Fabrication of fiber Bragg grating high temperature sensor array by femtosecond laser point by point[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 15–23. (in Chinese)
- [15] 张鹏浩, 陈爽, 武洪波. 倾斜切趾光纤光栅的理论与实验研究[J]. 计测技术, 2022, 42(5): 119–124.
ZHANG P H, CHEN S, WU H B. Theoretical and experimental study on the oblique apodized fiber Bragg gratings[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(5): 119–124. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 张鹏浩 (1990—), 男, 博士, 毕业于北京航空航天大学测试计量技术及仪器专业, 主要从事飞秒激光制备耐高温光纤光栅技术以及极端环境下光纤传感技术研究。2023年7月在中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所完成博士后研究工作。