

飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列

陈梓泳^{1,2}, 何俊^{1,2*}, 徐锡镇^{1,2}, 贺佳^{1,2}, 许百杰^{1,2}, 杜斌^{1,2}, 廖常锐^{1,2}, 王义平^{1,2}¹深圳大学物理与光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060;²深圳大学广东省光纤传感技术粤港联合研究中心深圳市物联网光子器件与传感系统重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 高温传感器在航空航天、核能电力、冶金工业等领域有着重要的研究与应用价值。为了实现光纤布拉格光栅(FBG)在高温传感领域的应用,研究了FBG阵列的制备技术、退火工艺和温度-波长拟合方法。首先,利用飞秒激光逐点法制备波分复用FBG阵列,并采用优化的工艺参数(飞秒激光脉冲能量、光纤移动速度、FBG长度)制备了1510~1580 nm范围内9个不同波长的FBG阵列。然后,研究了退火温度和退火时间对FBG中心波长的影响,通过高温长时间退火(700 °C、195 h)处理提高了FBG的波长稳定性,在700 °C下FBG的波长漂移率小于-2 pm/h。最后,研究了不同中心波长FBG的高温响应特性,获得了不同中心波长FBG的通用温度-波长拟合函数。实验结果表明,在700 °C高温下FBG阵列传感器的测温精度优于±1.8 °C,该传感器有望应用于航空发动机、高速飞行器、核反应堆堆芯等极端环境中的高温测量。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤布拉格光栅; 高温传感器; 飞秒激光

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306002

High-Temperature Sensor Array Based on Fiber Bragg Gratings Fabricated by Femtosecond Laser Point-by-Point Method

Chen Ziyong^{1,2}, He Jun^{1,2*}, Xu Xizhen^{1,2}, He Jia^{1,2}, Xu Baijie^{1,2}, Du Bin^{1,2},
Liao Changrui^{1,2}, Wang Yiping^{1,2}¹Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education/Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;²Shenzhen Key Laboratory of Photonic Devices and Sensing Systems for Internet of Things, Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fibre Sensors, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract High-temperature sensors have important research and application value in aerospace, nuclear power, metallurgical industry, and other fields. To apply fiber Bragg gratings (FBG) to high-temperature sensing, this paper studies the preparation technology, annealing process, and temperature-wavelength fitting method of FBG arrays. First, a wavelength division multiplexed FBG array is prepared by the femtosecond laser point-by-point method, and FBG arrays with 9 different wavelengths in the range of 1510–1580 nm are prepared with optimized process parameters (femtosecond laser pulse energy, fiber moving speed, and FBG length). Then, the effect of annealing temperature and time on the center wavelength of FBG is examined, and the wavelength stability of FBG is improved by high-temperature and long-term annealing (700 °C, 195 h), with the wavelength drift rate of FBG at 700 °C less than -2 pm/h. Finally, the high-temperature response of FBG with different center wavelengths are studied, and the general temperature-wavelength fitting functions of these FBG are obtained. The experimental

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(61875128)、国家自然科学基金联合基金(U1913212)、“广东特支计划”科技创新青年拔尖人才(2019TQ05X113)

通信作者: * hejun07@szu.edu.cn

results show that the temperature measurement accuracy of the FBG array sensor is better than $\pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. The sensor is expected to be used for high-temperature measurement in extreme environments such as aeroengines, high-speed aircraft, and nuclear reactor cores.

Key words fiber optics; optical fiber sensors; fiber Bragg gratings; high-temperature sensor; femtosecond laser

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.2430

1 引言

航空航天、核能电力、冶金工业等领域面临着超高温、高压等极端恶劣的工作环境,光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有高灵敏度和良好的稳定性与复用性,成为工程中结构健康监测的理想传感元件^[1-8]。常用的 FBG 是利用紫外激光和相位掩模板在掺锗光纤上写制的^[9],一般为 Type I 型 FBG,其耐高温性能较差,在 $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右 FBG 会被擦除。此外,相位掩模板的周期是固定的,无法灵活写制波分复用(WDM)-FBG 阵列。飞秒激光脉冲借助极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,可以在石英光纤、晶体光纤内诱导并获得较大的折射率调制,形成 Type II 型 FBG^[10-16],将 FBG 的耐受温度提高到了 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Oi 等^[17]利用近红外飞秒激光全息干涉法在光纤中制备了 FBG,但这种利用双光束干涉制备 FBG 的方法光路复杂,且对光路的稳定性要求较高。Mihailov 等^[18]利用近红外飞秒激光与相位掩模板在单模光纤中制备出 FBG,但这种方法制备的 FBG 无法灵活改变 FBG 的周期。Martinez 等^[19]采用近红外飞秒激光在光纤中实现了 FBG 的逐点刻写,这种方法可以灵活改变 FBG 的周期,可用于制备 WDM-FBG 阵列。

退火处理是释放 FBG 内部残余应力的重要方法,通过退火处理可增加 FBG 的热稳定性和可靠性^[20]。Li 等^[21]对飞秒激光刻写的 FBG 进行高温退火处理,以释放光栅内的应力,使 FBG 在 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下具有高温稳定性并保持较好的机械强度。采用合适的标定和拟合方法对提高 FBG 温度传感器的测温精度至关重要,因此,胡文芳等^[22]对 FBG 在 $-20\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行标定,采用线性拟合得到波长与温度的相关系数 $R^2 = 0.9976$,最大测量误差为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;采用二次函数拟合得到波长与温度的 $R^2 = 0.9998$,最大测量误差为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。虽然该方法可以获得极小的传感误差,但测量范围有限。杜勇等^[23]在 $300\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下对 FBG 进行标定,采用线性拟合得到波长与温度的 $R^2 = 0.999$,测试温度与设定温度的差小于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。研究表明,对 FBG 的温度响应采用线性拟合时精度不高,且误差会随测温范围

的扩大而增大。因此,Liao 等^[24]对飞秒激光写制的 Type II 型光栅进行温度响应标定,在常温至 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下用三次函数拟合得到波长与温度的 $R^2 = 0.999$ 。薛渊泽等^[25]研制了一种高温再生 FBG 温度传感器结构,在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内对 FBG 进行标定并采用三次函数拟合,其测量精度优于 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。虽然该方法可得到较高的拟合精度,但获得的高精度拟合曲线只适用于同一中心波长的 FBG,对不同中心波长的 FBG 传感器,需要单独进行标定。Lindner 等^[26]提出了一种适用于不同中心波长 FBG 的拟合函数,实现了 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内中心波长差小于 0.2 nm 的 FBG,拟合的温度误差小于 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,但该方法只能在 0.2 nm 窄波段内实现高精度的标定拟合。

本文研究了耐高温 FBG 阵列的飞秒激光逐点制备方法、高温退火工艺及其在高温下的温度响应。首先,采用飞秒激光逐点法制备了包含 9 个不同波长 FBG 的 WDM-FBG 阵列,并在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下退火处理 195 h,提高了 FBG 的波长稳定性(波长漂移率小于 -2 pm/h)。然后,提出了一种基于三次多项式函数的分段拟合标定方法,建立了适用于 8 nm 范围内不同中心波长 FBG 的温度响应拟合公式,在室温至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的中心波长拟合误差小于 27 pm 、温度测量精度优于 $\pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验结果表明,用本方法制备的 FBG 高温传感器阵列可适用于航空发动机、高速飞行器、核反应堆堆芯等极端环境中的高温测量。

2 飞秒激光逐点法制备 WDM-FBG 阵列

利用飞秒激光逐点直写法制备 FBG 阵列,实验装置如图 1 所示。其中,OSA(YOKOGAWA, AQ6370D)为光谱仪,ASE(HOYATEK)为宽带光源,用 3 dB 耦合器测试 FBG 的透射光谱(光路 1)和反射光谱(光路 2)。用飞秒激光器(Light Conversion, Pharos)作为加工光源,输出激光的波长为 1028 nm 、平均功率为 4 W 、脉冲宽度为 $290\text{ fs}\sim 10\text{ ps}$ 、重复频率为 $1\sim 200\text{ kHz}$ 、最大单脉冲能量为 $200\text{ }\mu\text{J}$ 。经倍频器(2 倍)后输出波长为 514 nm 、转换效率大于 50% 的飞秒激光。激光功率由半波片

和 Glan 棱镜进行衰减和调节。输出光斑为高斯光斑,高斯直径为 3 mm,可使用物镜进行聚焦。飞秒激光经过双色镜反射后进入物镜,再通过物镜聚焦于光纤的纤芯中进行 FBG 的加工制备。光纤的圆柱形表面结构会导致聚焦光束产生像差,使激光散焦,从而无法在纤芯有效诱导出良好的折射率调制区域,影响 FBG 的质量。实验采用高数值孔径的油浸物镜 (Zeiss),其放大倍数为 63 倍,数值孔径 $NA=1.40$,分辨率为 $0.3 \mu\text{m}$ 。对飞秒激光进行聚焦时,将光纤浸入匹配油中以减小像差。通过高数值孔径的物镜、成像 CCD 以及照明光源,实时获取加工过程中的光纤影像,保证 FBG 制备过程中激光焦点始终位于纤芯中间。实验中利用高精度双臂光

纤夹具 (Newport 466 A-710) 将光纤固定在三维 (3D) 气浮式精密电动位移平台 (Aerotech ABL9000, 亚纳米级重复定位精度、水平方向的移动行程为 30 cm) 上,通过位移平台移动光纤,从而制备 FBG 阵列。

FBG 阵列的制备过程:首先,飞秒激光保持静止,将清洁后的光纤置于气浮式精密电动位移平台上,通过程序控制电动平台沿光纤轴线方向移动;然后,打开激光挡板并通过物镜将光束聚焦至光纤纤芯;最后,匀速移动光纤,使飞秒激光脉冲通过多光子吸收效应在光纤纤芯中央诱导出一系列折射率调制区域,从而形成 FBG。折射率调制区域的间距就是光栅周期 $\Lambda=v/f$,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。完成单个 FBG 后,关闭激光挡板,通过驱动气浮式精密电动位移平台将光纤移动到下一个 FBG 的写作起始点,打开激光挡板,继续写作下一个 FBG。

采用脉冲能量为 120 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 $1.071 \mu\text{m}$,栅区长度为 2 mm。用 CCD 观察的 FBG 显微形貌图及其光谱如图 2 所示,可以发现,该 FBG 的中心波长为 1548.4 nm,插入损耗 (IL) 为 0.22 dB,3 dB 带宽 (BW@3 dB) 为 0.7 nm,反射率高于 90%。

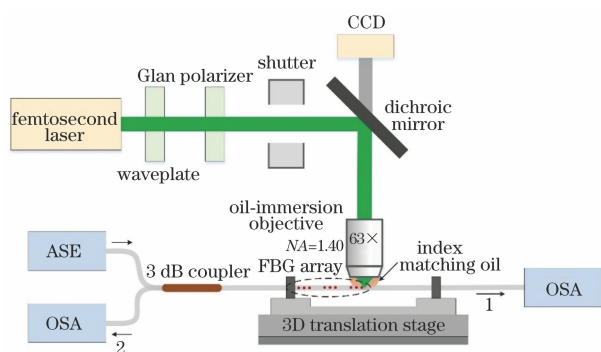


图 1 飞秒激光逐点法制备 FBG 阵列的装置

Fig. 1 Experimental setup for fabricating FBG array based on femtosecond laser point-by-point method

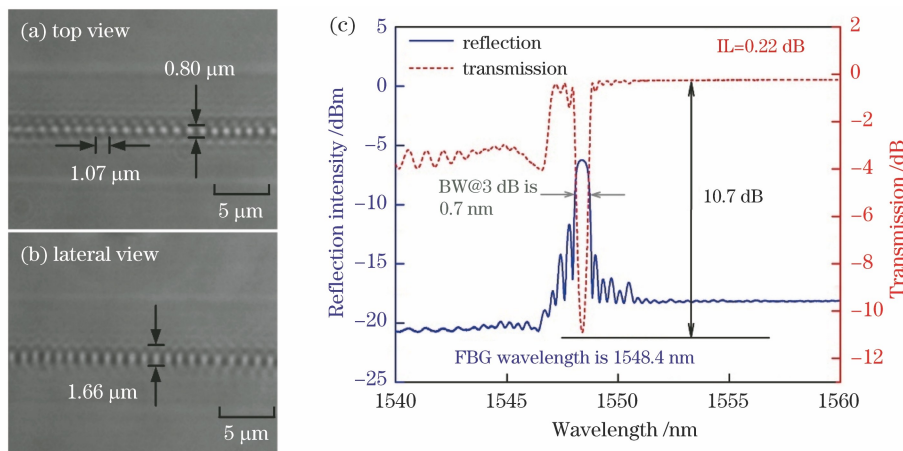


图 2 FBG 的显微形貌图及光谱。(a)俯视图;(b)侧视图;(c)透射光谱和反射光谱

Fig. 2 Microscope images and spectra of the FBG. (a) Top view; (b) lateral view; (c) transmission spectrum and reflection spectrum

采用相同的脉冲能量,制备了包含 9 个不同中心波长 FBG 的 WDM-FBG 阵列 (FBG 1~FBG 9)。各 FBG 的制备参数如表 1 所示,光纤移动速度分别为 1.0471、1.0526、1.0581、1.0636、1.0692、1.0747、

1.0802、1.0858、1.0913 mm/s,FBG 的栅区长度均为 2 mm,间距为 8 cm,反射光谱如图 3 所示。该 WDM-FBG 阵列的插入损耗为 2.8 dB,FBG 1~FBG 9 的波长分别为 1514.09、1522.49、1530.32、

1538.58、1546.32、1554.12、1562.33、1570.03、1577.94 nm, 每个 FBG 的波长间隔约为 8 nm。

表 1 不同 FBG 的制备参数

Table 1 Preparation parameters of different FBG

Sample	Translation speed/(mm·s ⁻¹)	Period/ μ m	Pulse power/nJ
FBG 1	1.0471	1.0471	120
FBG 2	1.0526	1.0526	120
FBG 3	1.0581	1.0581	120
FBG 4	1.0636	1.0636	120
FBG 5	1.0692	1.0692	120
FBG 6	1.0747	1.0747	120
FBG 7	1.0802	1.0802	120
FBG 8	1.0858	1.0858	120
FBG 9	1.0913	1.0913	120

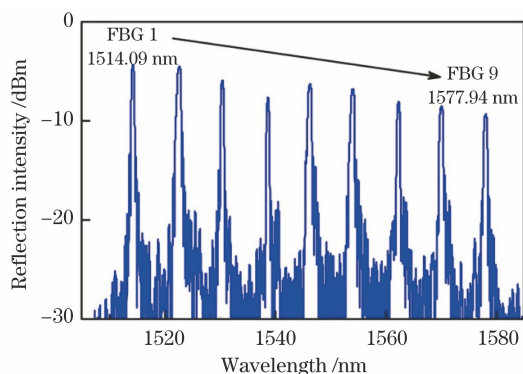


图 3 WDM-FBG 阵列的反射光谱

Fig. 3 Reflection spectrum of the WDM-FBG array

3 光纤光栅阵列的退火处理与高温稳定性

为了进一步研究 FBG 的退火特性、温度标定和温度传感特性, 采用脉冲能量为 120 nJ、重复频率为 1 kHz 的激光制备了 2 个 WDM-FBG 阵列。每个 WDM-FBG 阵列包含 2 个 FBG, 栅区长度均为 2 mm, 光栅间隔为 6 cm, 初始中心波长分别为 1536 nm 和 1544 nm, 反射光谱如图 4 所示。4 个 FBG 样品的编号分别为 FBG T1~FBG T4, 对应的初始中心波长分别为 1535.79、1543.95、1535.66、1544.04 nm。

FBG 的退火处理和温度标定系统由计算机、高温炉、热电偶、温度测试表、解调仪组成, 如图 5 所示。其中, 高温炉 (Isotech, J650N) 的温度范围为 0~700 °C, 分辨率为 0.01 °C, 具有较高的温度稳定性 (± 0.02 °C)。将温度测试表 (JinKo, JK808) 与高

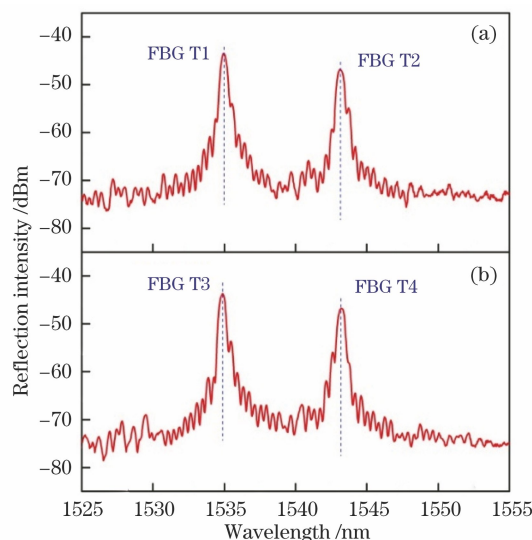


图 4 不同 FBG 的反射光谱。(a) FBG T1 和 FBG T2; (b) FBG T3 和 FBG T4

Fig. 4 Reflection spectra of different FBG.

(a) FBG T1 and FBG T2; (b) FBG T3 and FBG T4

精度热电偶连接, 可原位测量 FBG 所在位置的实时温度, 用 FBG 解调仪 (上海拜安, FT210) 对 FBG 的中心波长进行实时解调。

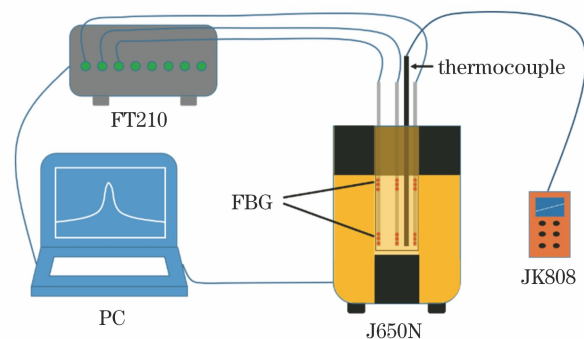


图 5 FBG 的退火与标定系统的装置图

Fig. 5 Experimental setup of FBG annealing and calibration system

利用 J650N 高温炉提供稳定的温度场, 以研究 FBG 的退火情况。将制备好的 FBG 放入高温炉中, 将热电偶安装在 4 个 FBG 样品所在的位置, 以记录温度的变化。当高温炉升温至 700 °C, 并保持 195 h 后, 用解调仪实时监测 FBG 的中心波长, 实验结果如图 6 所示。可以发现, 随着退火时间的增加, FBG 的内应力被释放, 导致 FBG 内部的折射率发生变化, FBG 中心波长发生蓝移。当 FBG 的内应力被全部释放时, FBG 中心波长趋于稳定。表 2 为 4 个 FBG 样品在退火过程中不同时间段中心波长随时间的漂移速率。可以发现, 在 700 °C 保持 150 h 后, 4 个 FBG 样品的波长漂移速率均小于 -2 pm/h,

这表明 FBG 的中心波长已经稳定,也验证了通过高温退火工艺提高 FBG 高温稳定性的可行性。

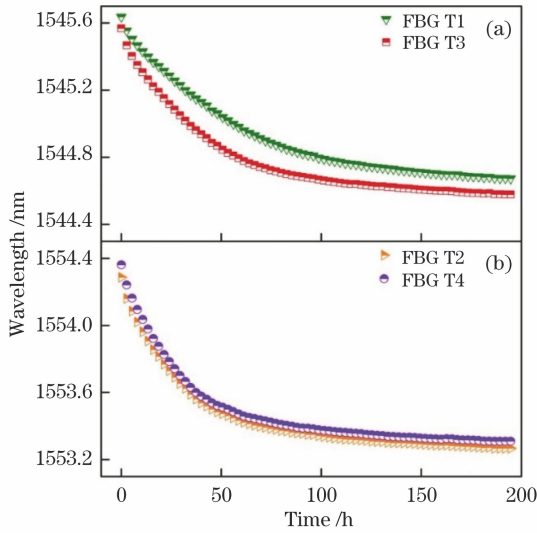


图 6 退火过程中 FBG 中心波长随时间的变化曲线。
(a) FBG T1 和 FBG T3; (b) FBG T2 和 FBG T4

Fig. 6 FBG center wavelength change curve with time during annealing process. (a) FBG T1 and FBG T3; (b) FBG T2 and FBG T4

表 2 退火过程中 FBG 中心波长的漂移率

Table 2 Drift rate of the FBG center wavelength during annealing

Time/h	0-50	51-100	101-150	151-195
FBG T1/(pm·h ⁻¹)	-11.09	-4.93	-1.59	-0.85
FBG T2/(pm·h ⁻¹)	-13.58	-3.54	-1.06	-0.66
FBG T3/(pm·h ⁻¹)	-9.42	-4.27	-1.94	-1.14
FBG T4/(pm·h ⁻¹)	-15.57	-2.58	-0.88	-0.61

4 光纤光栅阵列的温度-波长标定与拟合

FBG 的布拉格波长 λ 满足光栅方程

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

式中, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率。可以发现, λ 随 n_{eff} 和 Λ 的变化而变化, 而 n_{eff} 和 Λ 是温度 T 的函数, 因此, 通过(1)式对温度 T 进行求导, 得到

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \cdot (\xi + \alpha), \quad \xi = \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}dT}, \quad \alpha = \frac{d\Lambda}{\Lambda dT}, \quad (2)$$

式中, ξ 为石英光纤的热光系数, α 为石英光纤的热膨胀系数。当 FBG 用于常温环境时, 温度变化范围十分有限(200 °C 以内), 石英材料的热光系数和热膨胀系数近似与温度无关, 其波长漂移量与温度变化近似为线性关系。因此, FBG 在常温环境下的温度响应曲线通常采用线性拟合。但当 FBG 用于高

温环境时, 其温度变化范围可达上千摄氏度, 此时, 石英材料的热光系数和热膨胀系数受温度变化的影响较大, FBG 在高温环境下的波长漂移量与温度变化不再是简单的线性关系。热光系数与热膨胀系数和温度的关系可表示为^[27]

$$n_{\text{eff}} = 1.447 + aT + bT^2, \quad (3)$$

$$\alpha = c + eT, \quad (4)$$

式中, $a = 1.09 \times 10^{-5}$, $b = 1.611 \times 10^{-9}$, $c = 5.36 \times 10^{-7}$, $e = 1.24 \times 10^{-10}$ 。联立(2)式~(4)式, 得到

$$\frac{d\lambda}{dT} = \lambda \cdot \left(\frac{a + 2bT}{1.447 + aT + bT^2} + c + eT \right), \quad (5)$$

对(5)式积分并求解, 得到

$$\lambda = (1.447 + aT + bT^2) \cdot \exp\left(cT + \frac{1}{2}eT^2 + K\right), \quad (6)$$

式中, K 为常数。对(6)式进行泰勒展开并忽略泰勒展开式中二阶以上的高阶项, 得到

$$\begin{aligned} \lambda = & (1.447 + aT + bT^2) \cdot \left(1 + cT + \frac{1}{2}eT^2 + K\right) = \\ & 1.447 \cdot (1 + K) + (1.447c + a + Ka) \cdot T + \\ & (0.7235e + ac + b + Kb) \cdot T^2 + \\ & \left(\frac{1}{2}ae + bc\right) \cdot T^3 + \frac{1}{2}be \cdot T^4. \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式可知, FBG 中心波长的温度响应函数可以变换为多项式函数的形式。为了简便运算, 在保证高精度的情况下, 忽略高阶项, 对函数进行简化。采用 Matlab 对(6)式进行求解, 得到 0~1000 °C 下波长与温度的对应关系, 然后对其进行泰勒展开并分别化简为线性函数、二次函数、三次函数, 不同温度下不同函数的波长与(6)式的误差如图 7 所示。可以发现, 线性函数、二次函数和三次函数在 1000 °C 范围内与原函数的最大误差分别为 1800.0 pm、1.8 pm 和 0.1 pm, 三次函数与原函数的误差极小。这表明可以利用 FBG 温度标定数据建立三次拟合函数, 从而得到 FBG 的温度响应公式, 实现高精度温度传感。

对 FBG 进行温度标定后, 通过三次函数拟合获得 FBG 谐振峰波长和温度的关系为

$$\lambda(T) = \lambda_0 + AT + BT^2 + CT^3, \quad (8)$$

式中, A 、 B 、 C 为常数。由于 WDM-FBG 阵列的中心波长并不一致, 对于不同初始中心波长 λ_0 (0 °C 下的中心波长) 的 FBG, 各项系数 (A 、 B 、 C) 也不同。基于单个 FBG 所得的温度拟合公式, 无法适用于不同初始中心波长 λ_0 的 FBG。因此, 需要建立一种

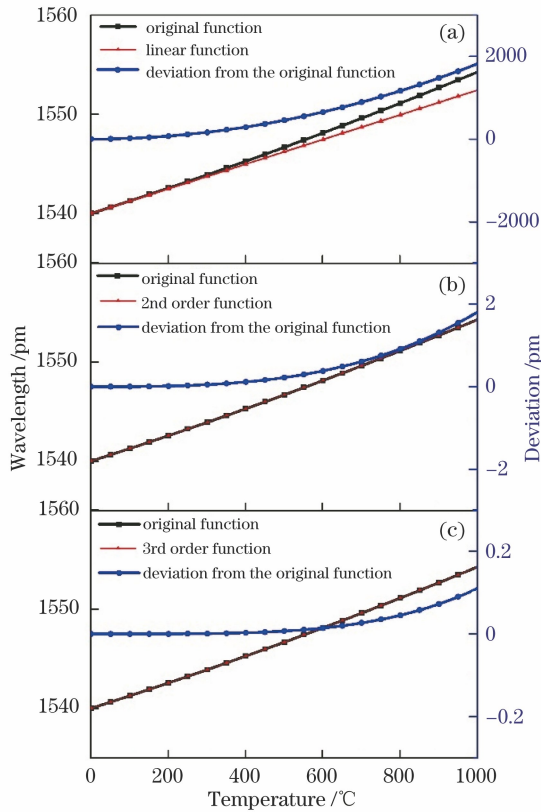


图 7 不同拟合函数的计算误差。(a)线性函数；(b)二次函数；(c)三次函数

Fig. 7 Calculated deviations of different fit functions. (a) Linear function; (b) second-order polynomial function; (c) third-order polynomial function

适用于不同初始中心波长的 FBG 温度拟合公式^[26]。基于三次多项式建立普适性拟合公式的过程如下。

1) 根据(8)式,对多个不同初始中心波长 FBG 的温度-波长数据进行拟合,得到

$$\lambda_i(T) = \lambda_{i,0} + A_i T + B_i T^2 + C_i T^3, \quad (9)$$

式中, i 为 FBG 的序号, A_i, B_i, C_i 为常数。

2) 用不同温度下的 $\lambda_i(T)$ 减去拟合曲线中的初始中心波长 $\lambda_{i,0}$, 得到波长漂移量

$$\Delta\lambda_i(T) = \lambda_i(T) - \lambda_{i,0}. \quad (10)$$

3) 采用三次函数对波长漂移量 $\Delta\lambda_i(T)$ 和温度 T 进行拟合, 获得普适性的波长漂移量拟合方程

$$\Delta\lambda_i(T) = A_g T + B_g T^2 + C_g T^3, \quad (11)$$

式中, A_g, B_g, C_g 为常数。可通过提高多项式拟合函数的阶数提高拟合精度, 但会带来更复杂的运算过程。因此, 本方法采用分段拟合方法在不同分段区间建立拟合函数^[28]。

利用经退火处理的 4 个光栅样品进行温度标定实验, 具体步骤: 1) 设置程序将高温炉的温度从常温

升至 700 °C; 2) 每隔 50 °C 停留 45 min, 使炉内温度达到稳定且 FBG 充分受热; 3) 用解调仪采集 4 个光栅样品的中心波长。通过上述步骤获得 FBG T1~FBG T4 的温度-波长数据及其三次函数拟合结果, 如图 8 所示。可以发现, 两个 FBG 的三次拟合相关系数 R^2 都达到了 0.99999。FBG T1 和 FBG T2 的拟合关系式为

$$\lambda_1(T) = 1535.47774 + 0.00974T + 8.13595 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 3.50844 \times 10^{-9} \cdot T^3, \quad (12)$$

$$\lambda_2(T) = 1543.67634 + 0.00963T + 9.52045 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 4.93644 \times 10^{-9} \cdot T^3. \quad (13)$$

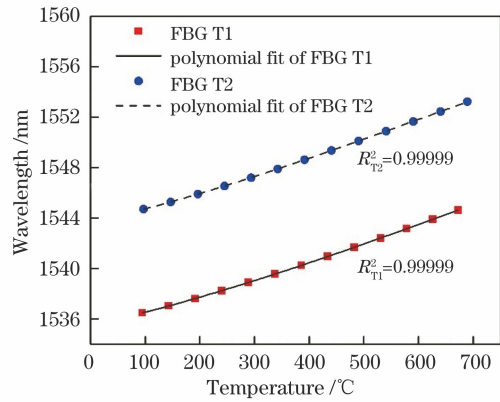


图 8 FBG T1 和 FBG T2 的波长-温度标定点及温度响应拟合曲线

Fig. 8 Wavelength-temperature calibration points and temperature response fitting curves of FBG T1 and FBG T2

为了验证三次函数的拟合误差, 对比 FBG T1 和 FBG T2 的拟合函数和对应温度标定点的中心波长测量值, 得到的拟合误差如图 9 所示。可以发现, 在 700 °C 范围内, 两个 FBG 的最大误差小于 10 pm, 这表明采用三次函数拟合 FBG 温度与波长的关系精度较高。

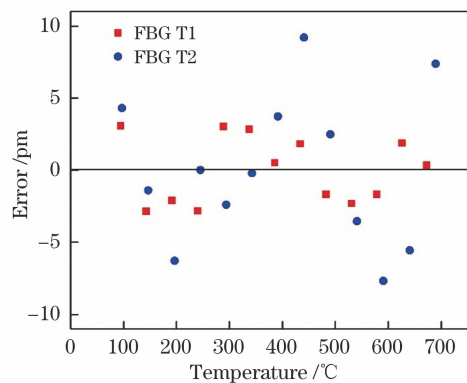


图 9 FBG T1 和 FBG T2 的拟合误差

Fig. 9 Fitting errors of FBG T1 and FBG T2

用 4 个光栅样品的温度-波长数据建立普适性温度响应曲线,结果如图 10 所示。首先,用三次函数分别拟合 4 个 FBG 在常温至 700 °C 的温度-波长数据;然后,将 4 个 FBG 在不同温度下的响应波长 $\lambda_i(T)$ 与拟合函数的常数项 $\lambda_{i,0}$ 作差,得到波长漂移量 $\Delta\lambda_i(T)$ 。最后,对波长漂移量 $\Delta\lambda_i(T)$ 与温度 T 进行三次函数拟合,得到

$$\Delta\lambda_i(T) = 0.00996T + 7.86996 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 3.37151 \times 10^{-9} \cdot T^3. \quad (14)$$

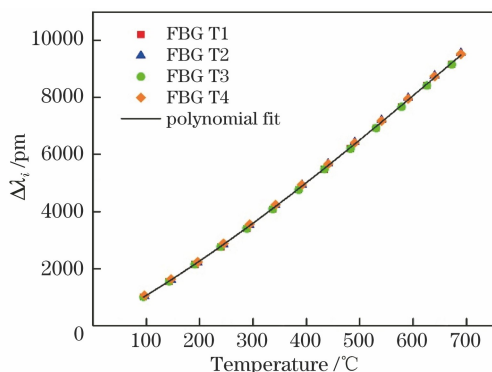


图 10 4 个光栅样品波长变化量与温度的拟合曲线
Fig. 10 Fitting curves of the wavelength variation and temperature of 4 grating samples

为了验证普适性拟合函数的拟合误差,对比了普适性拟合函数与 4 个光栅样品对应温度标定点的中心波长误差,结果如图 11 所示。可以发现,普适性拟合函数的最大误差达到 70 pm。采用分段拟合法处理 4 个光栅样品的温度-波长标定数据,将常温至 700 °C 的温度-波长标定数据分成为常温至 300 °C (第 1 组) 和 300~700 °C (第 2 组),并在第 2 组中加入常温下的温度-波长数据,根据 2 组温度-波长标定数据建立的普适性拟合函数为

$$\Delta\lambda_i(T) = 0.00902T + 1.15696 \times 10^{-5} \cdot T^2 - 7.67713 \times 10^{-9} \cdot T^3, T \leq 300 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (15)$$

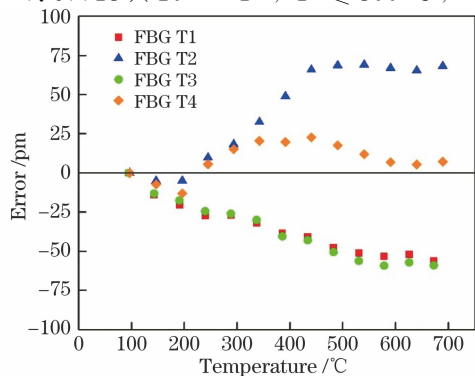


图 11 4 个光栅样品的普适性拟合函数误差
Fig. 11 Universal fitting function errors of 4 grating samples

$$\Delta\lambda_i(T) = 0.01098T + 5.527 \times 10^{-6} \cdot T^2 - 1.67413 \times 10^{-9} \cdot T^3, 300 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 700 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (16)$$

图 12 为用分段拟合方法改进后不同中心波长光栅样品的普适性拟合函数误差,可以发现,改进后拟合函数的最大误差为 27 pm,这表明分段拟合得到的普适性拟合公式可用于中心波长范围为 8 nm 的 FBG 在常温至 700 °C 范围的温度测试。

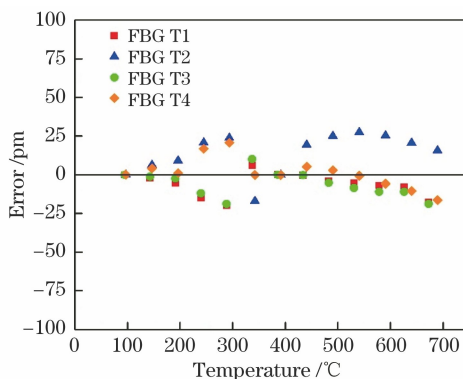


图 12 基于分段拟合方法改进后 4 个光栅样品的普适拟合函数误差

Fig. 12 Universal fitting function error of 4 grating samples improved based on piecewise fitting method

5 光纤光栅阵列的高温传感特性测试

用与 FBG T1~FBG T4 相同制备工艺和参数(能量、光栅长度等)、退火工艺和参数(温度、时间等)获得的 FBG 高温传感阵列验证普适性拟合公式的精度,该阵列包含 4 个光栅传感器 FBG S1~FBG S4,初始中心波长分别为 1535.75, 1538.48, 1541.53, 1544.17 nm。首先,将 4 个传感器放入高温炉,利用热电偶对其进行实时原位温度测量,并在常温至 700 °C 之间进行测试。然后,用解调仪测量 FBG 传感器的中心波长,并根据拟合公式获得响应温度。最后,记录热电偶测量值和 FBG 传感器的温度测量值,结果如图 13 所示。可以发现,4 个传感器在 700 °C 内的最大温度测量误差为 ±1.8 °C。这表明利用分段和三次拟合方法获得的普适性拟合公式用于初始波长范围为 8 nm 的 FBG 传感器时,在常温至 700 °C 范围内可获得较高的测温精度。

6 结 论

针对航空航天、金属冶炼等高温环境的测温问题,提出了一种基于飞秒激光逐点法制备的 FBG 阵列高温传感器。采用飞秒激光逐点法实现了 WDM-FBG 阵列的高效制备,通过优化飞秒激光的

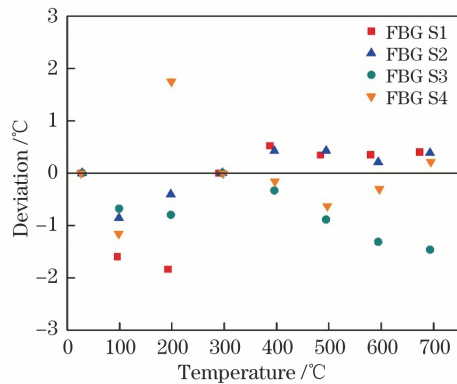


图 13 改进后 FBG S1~FBG S4 的测温误差

Fig. 13 Temperature measurement errors of FBG S1-FBG S4 after improvement

脉冲能量、光纤移动速度、光栅长度, 在 1510 ~ 1580 nm 范围内成功制备了包含 9 个 FBG 的阵列。进一步通过退火处理提高了 FBG 的高温稳定性 (700 °C 下的波长漂移率小于 -2 pm/h)。研究了 FBG 阵列高温传感器的温度响应曲线, 最终建立了一种适用于不同初始中心波长 (8 nm 范围) 的 FBG 普适性温度响应拟合函数, 并获得了优于 $\pm 1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 的测温精度。

参 考 文 献

- [1] Dutz F J, Heinrich A, Bank R, et al. Fiber-optic multipoint sensor system with low drift for the long-term monitoring of high-temperature distributions in chemical reactors[J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5476.
- [2] Wang Y H, Zhang M Y, Ma J X, et al. Measurements of penetration characteristics of jacked piles in clayey soil based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0706004.
王永洪, 张明义, 马加骥, 等. 光纤布拉格光栅用于黏质土中静压沉桩贯入特性的测量研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0706004.
- [3] Chen Y, An W Y, Liu H L, et al. Detection method using FBG sensing signal to diagnose rolling bearing fault[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1104004.
陈勇, 安汪悦, 刘焕淋, 等. 利用 FBG 传感信号诊断滚动轴承故障的检测方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1104004.
- [4] Wang Y B, Zhu Z H, Wang L, et al. A novel proposal of GPON-oriented fiber grating sensing data digitalization system for remote sensing network[J]. *Optics Communications*, 2016, 366: 1-7.
- [5] Zhu J L, Meng F Y, Yan G, et al. Aircraft fuel tank level monitoring sensor based on optical fiber sensor[J]. *Tool Engineering*, 2019, 53(6): 85-89.
朱家林, 孟凡勇, 闫光, 等. 基于光纤传感的飞机油箱液位监测传感器[J]. *工具技术*, 2019, 53(6): 85-89.
- [6] Chen J, Guo Y X, Zhu F D, et al. Fiber Bragg grating inclination sensor for transmission tower[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 080602.
陈剑, 郭永兴, 朱方东, 等. 用于输电铁塔的光纤布拉格光栅倾斜传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 080602.
- [7] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(21): 210603.
吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(21): 210603.
- [8] Zhou W H, Ye Q, Ye L, et al. Distributed optical fiber in-situ monitoring technology for a healthy temperature field in lithium ion batteries[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1204002.
周炜航, 叶青, 叶蕾, 等. 锂离子电池内温度场健康状况分布式光纤原位监测技术研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1204002.
- [9] Rathje J, Kristensen M. Continuous anneal method for characterizing the thermal stability of ultraviolet Bragg gratings [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(2): 1050-1055.
- [10] 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.
- [11] 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): 0328009.
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): 0328009.
- [12] He J, Wang Y, Liao C R, et al. Negative-index gratings formed by femtosecond laser overexposure and thermal regeneration [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23379.
- [13] Wang C, Zhang J C, Zhang C Z, et al. Bragg grating in suspended-core photonic microcells for high-temperature applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(14): 2920-2924.

- [14] Xu X Z, He J, Liao C R, et al. Sapphire fiber Bragg gratings inscribed with a femtosecond laser line-by-line scanning technique [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4562-4565.
- [15] Xu X Z, He J, Liao C R, et al. Multi-layer, offset-coupled sapphire fiber Bragg gratings for high-temperature measurements [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4211-4214.
- [16] Ding X D, Zhang Y M, Song Y M, et al. Response characteristics of pure-quartz-core fiber Bragg grating under high temperature strain [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106003.
丁旭东, 张钰民, 宋言明, 等. 纯石英芯光纤光栅高温应变响应特性 [J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106003.
- [17] Oi K, Barnier F, Obara M. Fabrication of fiber Bragg grating by femtosecond laser interferometry [C]//LEOS 2001. 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (Cat. No. 01CH37242), November 12-13, 2001, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2001: 776-777.
- [18] Mihailov S J, Smelser C W, Lu P, et al. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(12): 995-997.
- [19] Martinez A, Dubov M, Khrushchev I, et al. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(19): 1170-1172.
- [20] Liao C R, Li Y H, Wang D N, et al. Morphology and thermal stability of fiber Bragg gratings for sensor applications written in H₂-free and H₂-loaded fibers by femtosecond laser [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(11): 1675-1681.
- [21] 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.
- [22] 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, 73.
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, 73.
- [23] 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): 100606.
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): 100606.
- [24] Liao C R, 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.
- [25] Xue Y Z, Wang X F, Tang C J, et al. Packaging technique of high temperature regenerated fiber Bragg grating temperature sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(5): 49-51.
薛渊泽, 王学锋, 唐才杰, 等. 高温再生光纤光栅温度传感器封装技术 [J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(5): 49-51.
- [26] Lindner M, Tunc E, Weranek K, et al. Regenerated Bragg grating sensor array for temperature measurements during an aluminum casting process [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(13): 5352-5360.
- [27] 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.
- [28] Liu X, Wang Y F. Research of automatically piecewise polynomial curve-fitting method based on least-square principle [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(3): 55-58.
刘霞, 王运锋. 基于最小二乘法的自动分段多项式曲线拟合方法研究 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(3): 55-58.