

准分布式光纤布拉格光栅高温传感器

杜勇¹ 司金海¹ 陈涛¹ 李思佳¹ 崔巍¹ 李存霞² 侯洵¹

¹西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049

²西安理工大学理学院, 陕西 西安 710054

摘要 针对耐高温准分布式光纤布拉格光栅(FBG)传感器的需求,利用飞秒激光相位掩模辐照结合光纤拉伸,研究出制备不同周期的布拉格光栅的方法。通过改变光纤两端施加应力的控制来控制 FBG 的周期,得到具有不同布拉格波长的 FBG 并构成准分布式高温传感器。标定了 FBG 的温度响应参数,实现了两点准分布式温度测量。准分布式传感系统由光纤光栅解调仪和串接在一起的不同布拉格波长的 FBG 构成。不同温度下 FBG 的光谱响应结果表明:FBG 的布拉格波长对温度响应曲线有很好的线性拟合相关度,在 800 °C 长时间退火后 FBG 反射率稳定在 -10.2 dB,该传感系统可用于 800 °C 以内的温度传感测量。

关键词 光纤光学; 准分布式温度传感器; 飞秒激光微加工; 相位掩模; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.100606

Quasi-Distributed High Temperature Sensor Based on Fiber Bragg Grating

Du Yong¹ Si Jinhai¹ Chen Tao¹ Li Sijia¹ Cui Wei¹ Li Cunxia² Hou Xun¹

¹School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

²School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract According to the requirement of quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating (FBG), preparation method of the FBGs with different periods is studied by using the femtosecond laser phase mask combined with fiber pulling. Periods of the FBGs are controlled by changing the stress applied to the fiber during femtosecond laser irradiation, then the quasi-distributed high temperature sensor based on the FBGs with different Bragg wavelengths is obtained. Temperature response parameter of the FBG is demonstrated, and two points quasi-distributed temperature measurement is achieved. The quasi-distributed sensor system is consist of the FBG demodulation instrument and FBGs with different Bragg wavelengths. Measured results of the FBG spectra under different temperatures indicate that the Bragg wavelength of the FBG is shifted linearly as the temperature increases. Reflectivity of the FBG keeps at -10.2 dB after annealing for a long time at 800 °C. This FBG sensor system can be applicable to sensing measurement within 800 °C.

Key words fiber optics; quasi-distributed temperature sensor; femtosecond laser micromachining; phase mask; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.3735; 320.2250; 350.3390

1 引言

光纤光栅传感技术具有抗电磁性好、耐高温、抗潮湿、准分布式测量、单端输入、体积小以及价格便宜等优点,可以实现对温度、应力等多种物理量的测量,在岩土、桥梁、危化品等工程监测方面发挥着极其重要的

收稿日期: 2016-07-01; **收到修改稿日期:** 2016-07-07; **网络出版日期:** 2016-09-08

基金项目: 国家 973 计划(2012CB921804)、国家自然科学基金青年基金(11204236,61308006)

作者简介: 杜勇(1992—),男,硕士研究生,主要从事飞秒激光制备光纤光栅及其应用方面的研究。

E-mail: 1106912487@qq.com

导师简介: 司金海(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事超快非线性光学和超快成像、飞秒激光微纳加工方面的研究。E-mail: jinhaisi@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

作用^[1-6]。1989年,美国的 Meltz 等^[7]提出了一种刻写光纤光栅的实用方法,采用 244 nm 紫外双光束干涉法在光敏光纤中写入了适用于通信波段的光纤布拉格光栅(FBG),但此方法对光源相干性和系统稳定性要求较高。1993年,加拿大的 Hill 等^[8]用紫外光垂直照射相位掩模板法曝光光敏光纤快速稳定地写入了 FBG,此方法对光源相干性要求较低,使用更为广泛。

根据制备机理以及耐温性能的不同,FBG 可分为多种类型^[9]。利用紫外光(UV)在光敏光纤中制备的 FBG 一般为 Type I 型,普遍认为其写入机制是利用纤芯对 UV 激光辐射的线性吸收而形成“色心”结构,这种类型的 FBG 一般在 400 °C 就会被擦除^[10]。另外通过紫外光刻写 FBG 要求光纤必须具有光敏性,限制了可加工光纤的种类。飞秒激光脉冲具有超强的峰值功率,与透明电介质材料相互作用呈现出高非线性效应,对任何材料都可进行加工。利用飞秒激光相位掩模法在石英光纤中写入的 FBG 通常分为 Type I-IR 和 Type II-IR 两种类型。Type II-IR 光栅的折射率调制来源于局部高密度等离子体微爆炸,属于永久性改变;Type I-IR 光栅的折射率调制可能来源于多光子非线性吸收形成的“色心”结构,耐性能明显优于传统紫外光制备的 Type I 光栅^[11-12]。2004年,英国的 Martinez 等^[13]采用飞秒激光逐点刻写的方法在非光敏性的通信单模光纤上成功刻写出了 FBG,但是逐点刻写会引入微空洞调制,使米氏散射显著,增加了短波区的散射损耗,该方法对机械平台要求较高并且成栅时间较长。2005年,加拿大的 Smelser 等^[11]用飞秒激光相位掩模法在石英光纤中制备了 Type I-IR 和 Type II-IR FBG,制备的 Type I-IR FBG 反射率和紫外光加工出的 FBG 的反射率相当,Type II-IR FBG 可耐受 1000 °C 的高温。此外,飞秒激光还可在具有更高熔点的非光敏性材料如蓝宝石光纤中制备 FBG^[14-16],因此基于飞秒激光的 FBG 制备技术对于实现耐高温 FBG 传感器具有重要的潜力。

光纤光栅传感器相对于其他电磁传感器的一个重要优点就是能实现准分布式测量。利用飞秒激光相位掩模板法制备的 FBG 周期为相位掩模板的一半,即对于特定的光纤而言,制备不同波长的 FBG 需要不同周期的掩模板^[17]。至今为止,对利用飞秒激光制备的 FBG 温度响应特性的报道很多,但尚未有利用飞秒激光制备高反射率 FBG 作为传感器件进行温度传感及解调的报道,尤其是利用不同布拉格波长的 FBG 构成准分布式高温传感器的研究。

本文针对耐高温准分布式 FBG 传感器的需求,通过光纤应力调控^[18],利用飞秒激光相位掩模板法扫描加工高反射率不同布拉格波长的 FBG,并利用刻写的 FBG 建立了耐高温准分布式传感系统。实验中通过将两个不同布拉格波长的 FBG 熔接建立了准分布式传感测量系统并从室温到 200 °C 进行了传感器的标定和测试。测量结果表明:两个 FBG 的温度灵敏度系数分别为 11.05 pm/°C 和 10.87 pm/°C,布拉格波长对温度响应曲线的线性拟合相关度均在 0.999 以上。高温下 FBG 的温度响应特性测量结果表明:刻写的 FBG 在 800 °C 长时间退火后具有稳定的反射率,可用于 800 °C 以内的温度传感测量。当温度升高到 900 °C 时,FBG 的反射率迅速下降,这可能是因为在实验中利用飞秒激光结合相位掩模板照射光纤纤芯形成的 FBG 还未达到 Type II-IR 光栅的程度。实验结果表明,该准分布式 FBG 温度传感器在低温和高温段的测量最大误差分别为 2.55 °C 和 5 °C。制备的准分布式 FBG 传感器对工程中高温领域的传感测量具有重要的应用价值。

2 光纤光栅温度传感模型

温度引起光纤 FBG 布拉格波长偏移的主要原因为:光纤热膨胀效应、光纤热光效应以及光纤内部热应力引起的弹光效应^[19]。为了建立 FBG 温度响应特性的数学模型作如下假设:热膨胀系数在测量过程中始终保持不变,因为石英材料的软化温度在 1730 °C 左右,所以温度低于软化温度时可以认为热膨胀系数不变;测量范围内光纤折射率温度系数(热光系数)保持为常数;忽略光纤光栅不同位置之间的温度差效应,当光栅的长度不太长时,可以忽略光栅不同位置温度差带来的影响。布拉格公式为

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

式中 m 为布拉格波长的阶数, λ_B 表示 FBG 的布拉格波长, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅的周期。由(1)式可得温度变化 ΔT 导致 FBG 相应的布拉格波长位移 $\Delta\lambda_B$ 为

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

其中 a 为光纤纤芯的半径, $2\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \Delta T$ 代表光纤光栅的热光系数引起的波长偏移, $2\Lambda (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 代表热膨胀引起的弹光系数, $2\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a} \Delta a$ 代表由于热膨胀导致光纤芯径变化而产生的波导效应, $2n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T$ 代表光纤的热膨胀系数。

对于裸光纤光栅, 由于光纤纤芯半径变化对布拉格波长的偏移影响很小, 因此可以忽略第三项。在不受外力作用时, 未封装的 FBG 布拉格波长 λ_0 的变化 $\Delta\lambda$ 与外界温度变化 ΔT 的关系为

$$\Delta\lambda = \lambda_0 (\alpha + \xi) \Delta T = \kappa_T \Delta T, \quad (3)$$

式中 α 和 ξ 分别为光纤的热膨胀系数、热光系数, 比例系数 κ_T 是温度 T 的灵敏度。对于掺锗的石英光纤, $\alpha = 5.5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\xi = 6.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; 当 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 时; 可得 $\kappa_T = 10.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

可见, 当光纤材料确定后, 光纤光栅对温度的灵敏度系数基本上只与材料的热膨胀系数和热光系数相关, 这就从理论上保证了采用光纤光栅作为温度传感器可以使波长对温度的响应曲线具有很好的线性拟合相关度。因为线性热膨胀系数较热光系数小得多, 所以可认为其温度灵敏系数完全取决于材料的热光系数。光纤光栅光谱信号的解调是温度传感的关键步骤, 国内外针对准分布式光纤光栅传感的解调进行了很多研究^[20-22]。该文采用的波长解调的方法测量范围广且 FBG 传感器的复用个数多, 可实现较高的分辨率及测量精度, 适用于工程应用。

3 实验装置

飞秒激光结合相位掩模板刻写光纤布拉格光栅的装置如图 1(a) 所示, 实验中采用的飞秒激光中心波长为 800 nm 、脉冲宽度为 50 fs 、重复频率为 1 kHz , 柱透镜的焦距为 25 mm , 相位掩模板的周期为 $\Lambda_{\text{pm}} = 2.142 \text{ } \mu\text{m}$, 加工功率为 600 mW 。飞秒激光脉冲经过柱面透镜聚焦后垂直入射相位掩模板形成衍射。掩模板针对 800 nm 激光设计, 零级光的能量被抑制, 低于 3% , 而 ± 1 级光各有 35% 左右的能量。 ± 1 级衍射光在重叠区域进行干涉形成干涉条纹, 曝光光纤纤芯形成周期性折射率调制即为光栅结构, 光栅周期为 $\Lambda = \Lambda_{\text{pm}}/2$, 即掩模板周期的一半。实验中采用磁力光纤夹具将光纤固定在三维压电平台上, 控制精密压电平台将光纤沿垂直于光纤轴的方向横向匀速扫描。该方法拓展了成栅区域, 可提高光栅的反射率。 $1525 \sim 1570 \text{ nm}$ 放大自发辐射 (ASE) 宽带光源输出的光经环形器耦合进入 FBG, 反射 (透射) 光谱由光栅光谱分析仪 (WALICS) 测量。实验中采用拉伸光纤的方法改变刻写 FBG 的周期。具体加工方法为: 在待加工光纤的两端悬挂一定质量的重物并将光纤拉紧并夹持好, 使待加工光纤处于相应的拉伸状态, 刻写完成后光纤均恢复至自由状态, FBG 原本相同的周期会有不同程度的回缩, 即得不同布拉格波长的 FBG。悬挂重物的质量不同, 刻写的 FBG 周期也不同。利用飞秒激光相位掩模板扫描法在未施加拉力的光纤上刻写出的

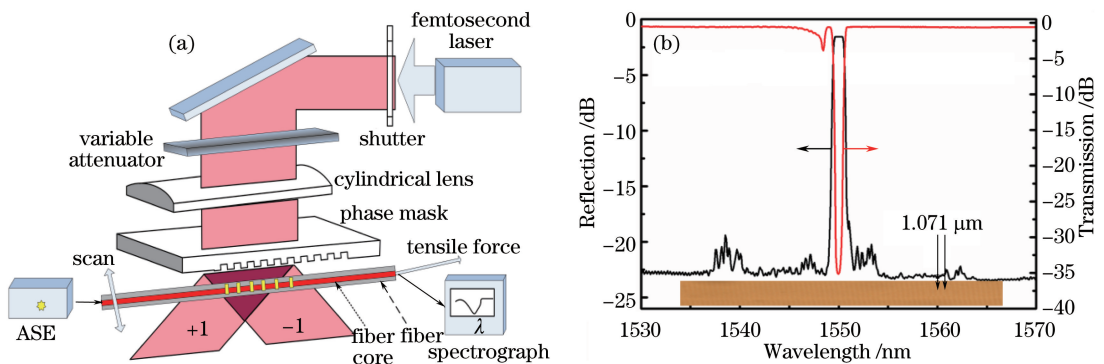


图 1 利用飞秒激光相位掩模板法刻写高反射率 FBG 的 (a) 装置图和 (b) 光谱图

Fig. 1 (a) Set-up diagram and (b) reflection and transmission spectra of the FBG with high reflectivity fabricated by using the femtosecond laser and phase mask

FBG 典型光谱如图 1(b)所示,反射率峰值波长为 1549.979 nm、反射率为 -0.28 dB(93%)、边模抑制比大于 20 dB。实验中在普通单模通信光纤中刻写的 FBG 周期为 1.071 μm ,因此 1549.979 nm 为二阶布拉格波长。

准分布式温度传感系统如图 2 所示,用于对所刻写的 FBG 进行温度传感特性的标定以及对温度传感器的测温验证。将 FBG 紧贴于控温板表面,尾纤通过光纤连接器与光纤光栅解调仪连接。光纤光栅解调仪(珏光科技,JPFBG3000)内置宽带光源和光谱解调模块,其光谱测量范围为 1520~1570 nm,分辨率达 1 pm。解调仪发出的宽带光经 FBG 反射回解调仪,由解调仪中光谱分析模块测量并解调出布拉格波长。解调仪的数据由计算机终端采集并显示布拉格波长,记录不同温度时的布拉格波长值。所用控温板的整个工作台面保持恒温,控温精度为 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$,可在 200 $^\circ\text{C}$ 以内实现精准控温。计算机终端上可实时显示根据采集的布拉格波长计算出的当前温度值。对于 FBG 在高温下的传感特性研究,其实验装置与图 2 类似,控温装置为高温炉。实验中采用的高温炉为可开启管式炉(NBD-O1200),温度精确控制范围为 300~1200 $^\circ\text{C}$,控温精度在 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,恒温区为 10 cm。高温段传感标定与验证的实验温度均在 300 $^\circ\text{C}$ 以上。

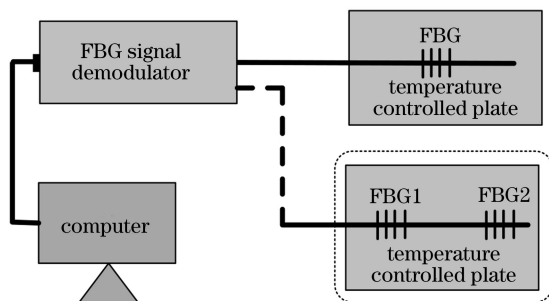


图 2 FBG 准分布式温度传感系统示意图

Fig. 2 Diagram of the FBG quasi-distributed temperature sensing system

4 实验结果与分析

4.1 准分布式温度传感

采用光纤应力调控的方法制备出布拉格波长为 1548.063 nm 的 FBG1 和布拉格波长为 1549.844 nm 的 FBG2,然后将两个 FBG 熔接串联起来,图 3 给出了两个 FBG 各自的光谱图以及熔接后的光谱图。将 FBG 紧贴控温平台台面上,用光纤光栅解调仪测量 FBG 的反射光谱从 40 $^\circ\text{C}$ 到 200 $^\circ\text{C}$ 范围内的变化,其中每隔 10 $^\circ\text{C}$ 记录一个布拉格波长值,每个温度点保持 30 min。实验中分别记录升温 and 降温两个过程中 FBG 布拉格波长随温度的偏移,最后取其平均值进行线性拟合。拟合结果表明:FBG1 和 FBG2 的布拉格波长随温度变化曲线的线性拟合相关度分别为 0.99922 和 0.99947,温度灵敏度分别为 11.05 pm/ $^\circ\text{C}$ 和 10.87 pm/ $^\circ\text{C}$,两光栅的标定拟合曲线如图 4 所示。得到拟合曲线的表达式为

$$T = 90.47346\lambda - 140019.36864, \text{ for FBG1}, \quad (4)$$

$$T = 91.97472\lambda - 142503.69016, \text{ for FBG2}. \quad (5)$$

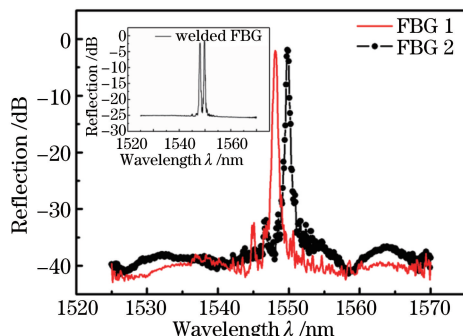


图 3 具有不同布拉格波长的两个 FBGs 的光谱图(插图为两个 FBGs 熔接后的光谱图)

Fig. 3 Spectra of two FBGs with different Bragg wavelengths (The inset shows the spectrum of two FBGs after welding)

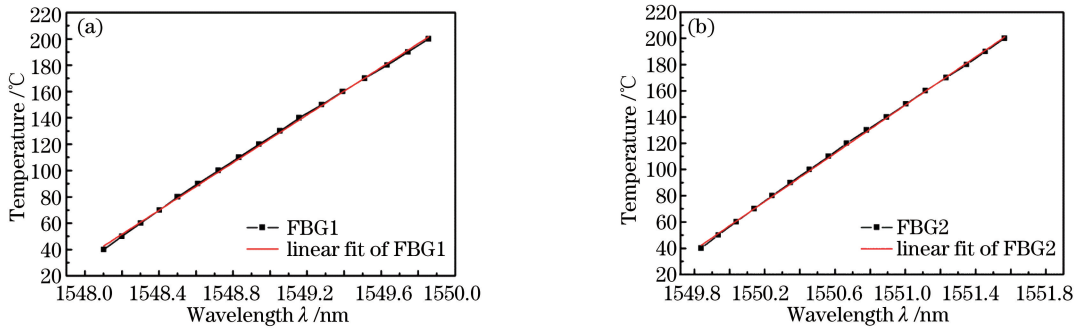


图4 (a) FBG1 温度传感标定结果图;(b) FBG2 温度传感标定结果图

Fig. 4 (a) Temperature sensing calibration results of the FBG1; (b) temperature sensing calibration results of the FBG2

将(4)、(5)式中的斜率与截距值作为两个 FBG 的解调参数进行解调,选取 6 个温度值,每个温度值保持 30 min,对两个 FBG 传感器的温度测量性能分别进行测试验证,结果见表 1。

表 1 低温段 FBG 传感温度验证表

Table 1 Validation results of the FBG under low-temperature section

Setting temperature / °C	Temperature of the FBG1 / °C	Deviation / °C	Temperature of the FBG2 / °C	Deviation / °C
65	64.71	-0.29	64.76	-0.24
85	83.84	-1.16	84.02	-0.98
105	103.20	-1.80	104.03	-0.97
135	133.15	-1.85	134.56	-0.44
165	164.50	-0.50	166.45	1.45
200	199.78	-0.22	202.55	2.55

验证结果表明,两裸 FBG 传感器测量的 6 个温度值中,误差绝对值最大为 2.55 °C、最小为 0.22 °C,平均值分别为 0.97 °C 和 1.1 °C,误差的主要来源是控温板的控温精度仅为 ± 2 °C。为了进一步实现双波长准分布式温度测量,即同时测量不同位置处的温度,将普通钢尺一端紧贴于控温台面,另一端悬空,则在钢尺上就会出现温度梯度分布,装置示意图如图 5 所示。

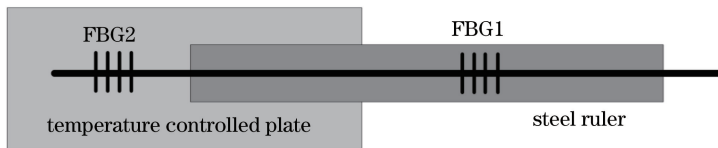


图 5 FBG 准分布式温度传感验证装置示意图

Fig. 5 Verification schematic diagram of the FBGs for quasi-distributed temperature sensing

验证准分布式温度传感时,将 FBG1 紧贴于钢尺表面,将 FBG2 紧贴于控温台表面,则 FBG1 处的温度低于 FBG2 的温度。将控温台的温度设定在 120 °C,在控温台显示温度值到达 120 °C 后的三个不同时刻 T 读取两个 FBG 传感器所解调出的温度值,详见表 2。由表 2 可以看出,FBG2 测量的温度值在 $T=0$ s 时为 120.31 °C,当 $T=100$ s 后稳定在 121.78 °C,即当控温台刚刚显示温度到达 120 °C 时,FBG 处的实际温度还未稳定,仍处于升温状态。稳定的温度值与设定的温度值偏差在 ± 2 °C 的范围内,与前面标定的 FBG 测量误差相符。FBG1 测量处的温度远远小于 FBG2 处, $T=0$ s 时 FBG1 测量处的温度为 48.37 °C。随着时间的推移,FBG1 处在 100 s 和 120 s 时分别上升了 4.98 °C 和 0.91 °C,表明 120 s 时钢尺上 FBG1 处的温度仍在上升中,且逐渐接近热平衡。

表 2 准分布式温度传感器不同时刻测温数据表

Table 2 Measured data of the quasi-distributed temperature sensor at different time

T / s	Temperature of the FBG1 / °C	Temperature of the FBG2 / °C
0	48.37	120.31
100	53.35	121.78
120	54.26	121.78

4.2 高温传感

在实际应用中,FBG 最常遇到的退化因素就是擦除温度。为了探索利用飞秒激光相位掩模板法刻写 FBG 的温度稳定性,实验中从 300 °C 到 1000 °C 对 FBG 进行了退火,探索其热稳定性。每个温度保持 30 min,结果如图 6 所示。测量结果表明,所制备的 FBG 反射率在 800 °C 时虽然有逐渐减小的趋势,但变化不大,而 900 °C 以上开始迅速下降,这可能是由于实验中制备的 FBG 还未达到 Type II-IR 光栅的程度。

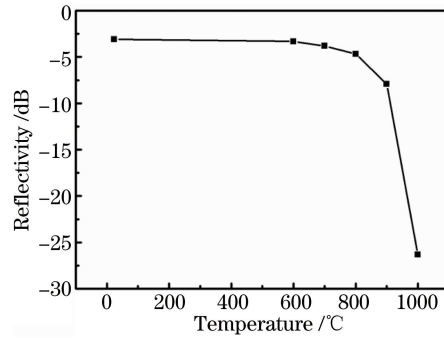


图 6 利用飞秒激光制备的 FBG 反射率随温度的变化

Fig. 6 Reflectivity of the FBG fabricated by femtosecond laser versus temperature

由于 800 °C 以内 FBG 反射率变化较小,选择在 800 °C 的条件下对 FBG 做长时间高温退火处理。图 7(a)给出了 800 °C 长时间退火过程中反射率随时间的变化曲线。实验结果表明:在 800 °C 下,随着退火时间的增加,反射率开始逐渐下降,8 h 时基本稳定在 -10.2 dB。图 7(b)为退火 8 h 后反射率随温度的变化曲线,每个温度值保持 30 min,测量中 FBG 的反射率基本没有变化。实验中记录了升温 and 降温两个过程中 FBG 布拉格波长的变化,如图 7(c)所示,升温 and 降温中同样温度下 FBG 的布拉格波长基本一致。取升温 and 降温过程中测量的布拉格波长的平均值作为不同温度下 FBG 的布拉格波长并进行线性拟合,图 7(c)给出了拟合结果,拟合的结果表明,该 FBG 的布拉格波长随温度变化曲线的线性拟合相关度为 0.99931,温度灵敏度系数为 15.58 pm/°C。将拟合好的相关系数作为解调参数,从而解调出在不同设定温度下 FBG 传感器测量的温度值。图 7(d)为不同温度下 FBG 的测量结果和偏差,实验结果表明,在 300~800 °C 的范围内,光纤光栅解调仪解调出的温度与高温炉设定的温度误差小于 ± 5 °C。

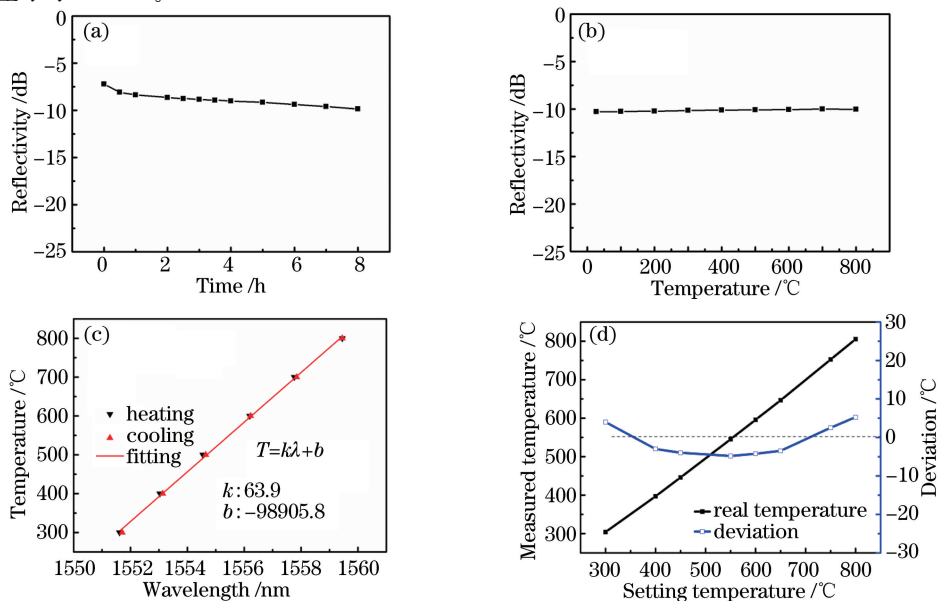


图 7 (a) 800 °C 下 FBG 反射率随退火时间的变化;(b)退火后不同温度下 FBG 的反射率;
(c)升温 and 降温过程的标定拟合图;(d) FBG 传感器解调出的温度及测量偏差

Fig. 7 (a) Reflectivity of the FBG under 800 °C versus annealing time; (b) reflectivity of the FBG after annealing under different temperatures; (c) results of the calibration fitting for heating and cooling; (d) demodulated temperature of the FBG and the deviation

实验中利用飞秒激光加工技术制备的准分布式温度传感器测量仍存在较大误差,这可能与未对传感器进行封装有关。对传感器进行封装也是耐高温 FBG 传感器实用化的需要。目前,工作温度在 400 °C 时的传感器封装技术仍然在研究阶段。对于更高的工作温度,金属化封装有可能成为一种实用的 FBG 传感器封装技术^[23-24]。对实验中制备的裸 FBG 高温传感器进行金属化封装不仅能大大提高其机械强度,更重要的是可以起到增敏作用。此外,利用 SL8308 等耐高温胶封装也是耐高温 FBG 传感器实用化的方法之一。目前,该课题组正在进行耐高温准分布式 FBG 传感器的封装研究。

5 结 论

利用飞秒激光相位掩模板扫描法制备了光纤布拉格光栅,获得了反射率高于 93% 的 FBG;采用重物拉伸光纤的方法调控 FBG 的周期,得到了不同布拉格波长的 FBG,并建立了准分布式耐高温光纤布拉格光栅传感器及其解调系统,实现了两点处的准分布式温度传感测量。研究表明:飞秒激光刻写的 FBG 布拉格波长对温度的响应曲线具有很好的线性拟合相关度,FBG 在 800 °C 长时间退火后具有稳定的反射率,可实现 800 °C 内的准分布式高温传感,进行金属化封装后的 FBG 传感器的机械强度以及温度灵敏度将进一步提高。

参 考 文 献

- 1 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, *et al.* Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405005.
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405005.
- 2 Zhan Yage, Xiang Shiqing, He Hong, *et al.* Study on high temperature optic fiber grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1235-1238.
詹亚歌, 向世清, 何红, 等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1235-1238.
- 3 Peng B J, Zhao Y, Yang J, *et al.* Pressure sensor based on a free elastic cylinder and birefringence effect on an FBG with temperature-compensation[J]. Measurement, 2005, 38(2): 176-180.
- 4 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.* High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. Chinese J 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.
- 5 Liu Xiong. On the application of fiber optical sensor to geomechanics and geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 588-591.
刘雄. 光纤传感技术在岩土力学与工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 588-591.
- 6 Tennyson R C, Coroy T, Duck G, *et al.* Fibre optic sensors in civil engineering structures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 880-889.
- 7 Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- 8 Hill K O, Malo B, Bilodeau F, *et al.* Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. Applied Physics Letters, 1993, 63(3): 1035-1037.
- 9 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. 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.
- 10 Rathje J, Kristensen M, Pedersen J E. Continuous anneal method for characterizing the thermal stability of ultraviolet Bragg gratings[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88(2): 1050-1055.
- 11 Smelser C W, Mihailov S J, Grobnc D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask[J]. Optics Express, 2005, 13(14): 5377-5386.
- 12 Kondo Y, Nouchi K, Mitsuyu T, *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses[J]. Optics Letters, 1999, 24(10): 646-648.
- 13 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.
- 14 Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, *et al.* Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2505-2507.
- 15 Zhan C, Kim J H, Yin S, *et al.* High temperature sensing using higher-order-mode rejected sapphire fiber gratings[J]. Optical Memory and Neural Networks, 2007, 16(4): 204-210.
- 16 Busch M, Eeke W, Latka I, *et al.* Inscription and characterization of Bragg gratings in single-crystal sapphire optical fibres for high-temperature sensor applications[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(11): 115301.
- 17 Tahir B, Ali J, Rahman R A. Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2006, 8(4): 1604-1609.
- 18 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.* Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- 19 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.
- 20 Othonos A, Lee X, Measures R M. Superimposed multiple Bragg gratings[J]. Electronics Letters, 1994, 30(23): 1972-1974.
- 21 Wang Min, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.* Research on demodulating techniques for fiber Bragg grating sensor system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(12): 54-58.
王敏, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤布拉格光栅传感系统信号解调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(12): 54-58.
- 22 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.* Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405004.
- 23 Feng Y, Zhang H, Li Y L, *et al.* Temperature sensing of metal-coated fiber Bragg grating [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(4): 511-519.
- 24 Bubel G M, Krause J T, Bickta B J, *et al.* Mechanical reliability of metallized optical fiber for hermetic terminations[J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(10): 1488-1493.