

文章编号 1004-924X(2011)09-2006-08

# 镍金属保护光纤布拉格光栅的热处理及高温传感

饶春芳<sup>1,2\*</sup>, 张 华<sup>1</sup>, 冯 艳<sup>1</sup>, 肖丽丽<sup>1</sup>, 叶志清<sup>2</sup>

- (1. 南昌大学 机电工程学院 机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031;
2. 江西师范大学 物理与通信电子学院 光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

**摘要:**为了改善镍保护后光纤布拉格光栅(FBG)的高温传感性能,即降低其回程误差,减少其升温与降温灵敏度的差异,本文研究了产生这些现象的原因,认为其主要源于化学镀结合电镀镍过程中的残余应力。讨论了残余应力产生的机理,提出了适用于镍金属保护 FBG 的热处理方法。三次将金属镍保护后的 FBG 放置在 120℃恒温炉中保温 8 h 后随炉冷却,对热处理前后的镍保护布拉格光纤光栅进行 100~300 ℃的循环温度传感对照实验。结果显示:热处理前回程误差为 6.64%,升温与降温灵敏度有较显著差异,且放置半个月后再次进行传感实验其特性也没有改善;热处理后,回程误差降到 3.62%,升温灵敏度为 22.84 pm/℃,降温灵敏度为 22.76 pm/℃。实验表明,经适当热处理后的镍保护布拉格光纤光栅的实际工作温度可扩展到 300 ℃,且具有较高的传感精度。

**关键词:** 纤维光学; 光纤布拉格光栅; 高温传感; 热处理; 镍涂敷层

**中图分类号:** TN253; TG156.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2006

## Heat treatment on fiber Bragg grating with Ni coating for elevated temperature sensor

RAO Chun-fang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, FENG Yan<sup>1</sup>, XIAO Li-li<sup>1</sup>, YE ZHI-qing<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Robot & Welding Automation, School of Mechanics Engineering Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
  2. Key Laboratory of Optoelectronics & Communication, College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)
- \* Corresponding author, E-mail: rcf0332@163.com

**Abstract:** To improve the sensing characteristics of a Fiber Bragg grating (FBG) temperature sensor with a Ni coating, the causes of the hysteresis error and the difference of sensitivities when it was heated and cooled were researched. Results indicate that the residual stress induced by electroless-electroplating makes the sensor imprecise. The mechanism of the residual stress was discussed, then a heat treatment method was proposed for the metallized FBG (MFBG) with a nickel coating. In treatment, the MFBG sensor was put in a drying oven at 120 ℃ for 8 hours three times, and every time it was cooled with the oven. A comparison experiment for the MFBG with the nickel coating was performed in 100–300 ℃, results show that the hysteresis error of the sensor is 6.64%, and the differ-

收稿日期: 2010-11-24; 修订日期: 2011-01-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61067003, 50905082, 60967002); 江西省自然科学基金资助项目 (No. 2007GQW0158); 江西省研究生创新专项资金立项项目 (No. 20093559060)

ence of sensitivities when it is heated and cooled is more significant before the heat treatment. The sensor characteristics are not be amended even if it is performed temperature cycle again after half a month. However, the hysteresis error of the sensor is descended to 3.62%, and the sensitivities of the MFBG when it is heated and cooled are 22.84 pm/°C and 22.76 pm/°C, respectively, after the heat treatment. The experiments demonstrate that with a higher sensing accuracy, the working range of the MFBG with the nickel coating has expanded to 300 °C after effective heat treatment.

**Key words:** fiber optics; Fiber Bragg Grating(FBG); elevated temperature sensor; heat treatment; nickel coating

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)由于其径细、质轻、免电磁干扰、以及优良的可埋入性和集信息传输与传感于一体等优良特性,已成为智能结构首选的信息传输与传感的载体<sup>[1-4]</sup>。光纤光栅传感器的放置方式有埋入基体内部和贴于基体表面两种,其中埋入式光纤光栅传感器的突出特点是能感知基体内部的温度、应力等物理量的变化。由于光纤是脆性材料,实际使用过程中必须对其加以保护,而埋入式光纤光栅必须保持其相对径细的优点,否则在光纤光栅周围的基体中会产生应力与应变集中。因此,光纤光栅不能使用诸如金属套管式的铠装保护,而必须使用合适的涂敷层。研究表明,普通带有丙烯酸盐涂层的标准通信光纤的封装不是埋入光纤的理想保护,而金属(如金、银、铝)已被成功地运用于光纤涂层中,其表现出比丙烯酸盐涂层更好的耐力<sup>[5]</sup>。目前大量使用的是利用光敏特性写入的FBG,这种光纤在较高温度下(100 °C以上)会发生退化,产生热衰减,但其使用的高温极限典型值仍可达到300 °C<sup>[6]</sup>。不过在实际应用中,要使FBG传感器的工作温度达到这一极限,值需要其起保护作用的涂层具有比丙烯酸盐涂层更高的温度耐受力。近年来,由化学镀结合电镀方法在FBG包层外形成的Ni保护层受到广泛关注<sup>[7-10]</sup>,这种保护层溶点在800 °C以上,能在高温等恶劣环境下对FBG提供较有效的保护;并且,化学镀结合电镀Ni保护层的形成过程中产生的残余应力相对较小、成本较低。理论及实验研究表明,金属层对FBG起到良好保护的同时,还起了温度增敏的作用<sup>[11]</sup>。但这些研究同时也显示由金属保护后的FBG在进行较高温度

范围的温度传感时,存在较大回程误差,升温及降温过程灵敏度也存在较大差异。本文研究了产生这些现象的原因,分析认为其主要源泉于化学镀及电镀过程中产生的残余应力。本研究通过分析残余应力产生的机理,结合FBG实际条件,探索适合于镍金属保护FBG的热处理方法。经热处理后,其工作温度能达到高温极限值300 °C,传感器的回程误差及升、降温灵敏度差异较之热处理前也有明显减少。

## 2 金属化光纤布拉格光栅温度传感理论

根据光纤模式耦合理论,FBG的中心波长 $\lambda_B$ (反射谱为峰值波长、透射谱为谷值波长)满足以下关系:

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

式中: $n_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效折射率, $\Lambda$ 是光栅周期。应变和温度变化对于布拉格光栅中心波长的偏移为:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_B = & 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial l} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + \\ & 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T, \quad (2) \end{aligned}$$

式中,第一项表示应变对光栅的影响,第二项表示温度对光栅的影响。

金属化保护后的FBG结构示意图如图1所示。

对于金属化保护后的FBG,当温度变化时,光纤本身的热光效应会使得有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 发生变化;热膨胀效应引起栅距 $\Lambda$ 变化,而由于光纤与金属保护层的热膨胀系数不一致、FBG金属化保护过程中产生的残余应力释放等引起的应变,

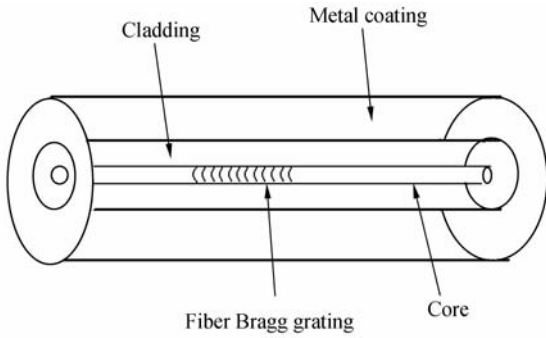


图 1 金属化保护后 FBG 结构示意图  
Fig. 1 Schematic of metal coated FBG

也是 FBG 中心波长发生变化的原因。这时其波长漂移为<sup>[11]</sup>：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta t + \lambda_B\left\{\epsilon_z - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2}[(p_{11} + p_{12})\epsilon_r + p_{12}\epsilon_z]\right\}, \quad (3)$$

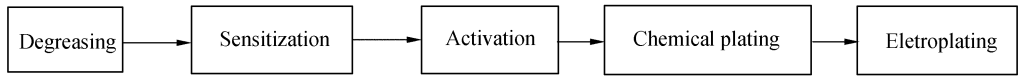


图 2 光纤的化学镀结合电镀保护流程

Fig. 2 Flow chat for optical fiber protection using electroless-electroplating method

光纤属非金属,因此不能直接进行化学镀结合电镀保护,需经镀前预处理,获得适合于化学镀的洁净过渡表面。其步骤为:

(a) 除油:在敏化之前,先将裸光栅及两端需保护的尾纤用超声波酒精清洗 5~10 min,然后再用超声波蒸馏水洗 5~10 min,以除去裸光栅及尾纤表面的油污。

(b) 敏化:在光纤表面吸附一层容易氧化的物质,以便在活化处理时被氧化。配方及工艺条件为:氯化亚锡( $\text{SnCl}_2$ )10~20 g/L,盐酸(HCl)30~40 ml/L,温度:25~35 °C,时间:10~15 min。

(c) 活化:在光纤表面生成一层薄的具有催化性的金属层,作为化学镀时氧化还原反应的催化剂,以便在化学沉积中加速反应。配方及工艺条件为:氯化钯( $\text{PdCl}_2$ )0.1~0.5 g/L,盐酸 1~6 ml/L,温度:25~35 °C,时间:10~15 min。

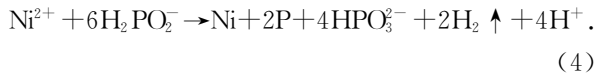
经镀前预处理后,将光纤进行化学镀。具体配方及工艺条件为:硫酸镍( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )20~35 g/L,次亚磷酸钠( $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )15~35 g/L,丙酸( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_2$ )10~25 ml/L,硼酸

其中, $\alpha = d\lambda/\lambda dt$  为线性热膨胀系数; $\xi = dn_{\text{eff}}/(n_{\text{eff}} dt)$  为热光常数; $p_{11}, p_{12}$  是材料的弹光系数; $\epsilon_z, \epsilon_r$  分别为轴向应变和径向应变。在不考虑 FBG 金属化保护过程中产生的残余应力的情况下,本实验室研究证明,金属包层使 FBG 的温度灵敏度增加,且其值开始随着金属层厚度的增加而迅速增加,然后增加缓慢,并趋于一相对稳定值<sup>[7]</sup>。

### 3 光纤布拉格光栅的金属化保护

本实验使用北京基康科技有限公司生产的均匀 FBG,光栅剥皮长度为 30 mm,光栅区长度为 10 mm,尾纤带丙烯酸盐保护层。布拉格光纤光栅金属化保护过程如图 2 所示:

( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )10~30 g/L,pH 值:4~6,温度:80~90 °C,时间:1~2 h。化学镀的机理为:



化学镀后,将光纤放入电镀镍装置中进行电镀镍保护,具体配方及工艺条件为:硫酸镍( $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ):180~300 g/L,氯化镍( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ):30~50 g/L,硼酸:35~40 g/L,十二烷基硫酸钠( $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4\text{Na}$ ):0.05~1 g/L,pH 值:3~5,温度:18~45 °C。保护好的光纤光栅如图 3 所示。

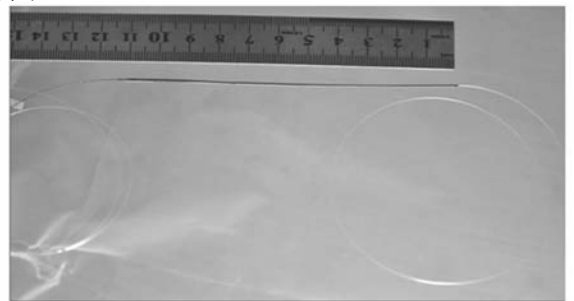


图 3 化学镀和电镀 Ni 后的 FBG 外观

Fig. 3 Outview of FBG after electroless-electroplating Ni

### 4 金属化光纤布拉格光栅(MFBG)的高温传感实验

对 MFBG 进行高温测试,测试装置如图 4 所示。首先对管式高温炉进行炉内温度测试,以确定炉内相对恒温区。将 MFBG 有效部位及热电偶有效部位放在炉内同一恒温位置,将 MFBG 两头尾纤分别连接放大自发辐射 (ASE) 宽带光源及光谱分析仪 (OSA),观察其透射谱。依据热应力理论,环境突变会引起热应力的加速度项<sup>[12]</sup>,这将与本课题组已有理论研究的假设条件<sup>[7]</sup>不符。因此,为使实验结果与已有理论更好地对比,实验中使温度连续缓慢变化,以使升、降温可视为准静态过程。并且,较慢的升降温速度可使热电偶准确跟踪管式高温炉炉内温度。为此,升温过程中管式高温炉输入电压及电流值均保持恒定,且升温速度不超过 0.1 °C/s;升到 350 °C 即关电炉电源,并使光栅随炉冷却。为去除温度突变引起的加速度项,室温到 60 °C 过程中,不做测试记录;同样,降温时,从 350 °C 降到 300 °C,不做测试记录。实验中,首先记录室温下 FBG 镀前后的透射谱,然后做最高到 300 °C 的温度传感实验,并用 MATLAB 软件对实验结果进行拟合分析。

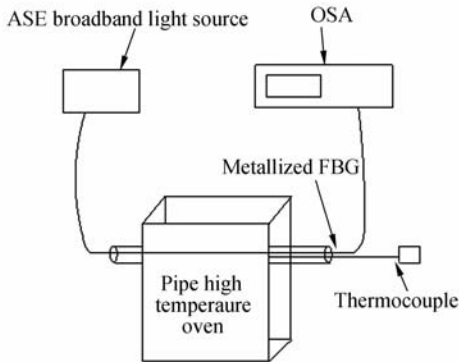
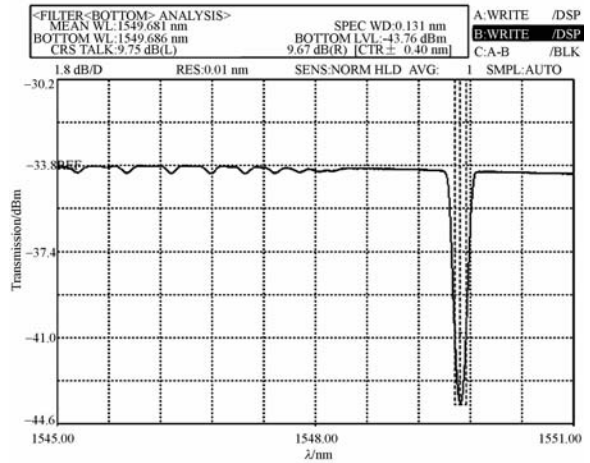


图 4 MFBG 高温传感装置示意图

Fig. 4 Equipment for MFBG elevated temperature sensor experiment

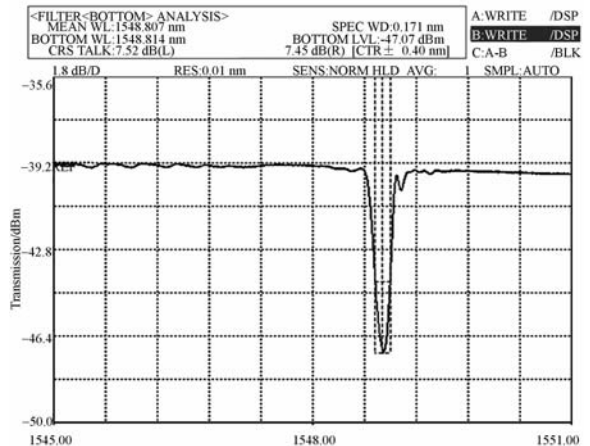
### 5 FBG 镀前后透射谱及 MFBG 高温测试结果

为说明金属保护后的光栅的光谱变化情况,图 5 给出了具代表性的两支 FBG 镀前后镍金属保护 FBG 光谱图,其镀后直径分别为 0.5 mm 和



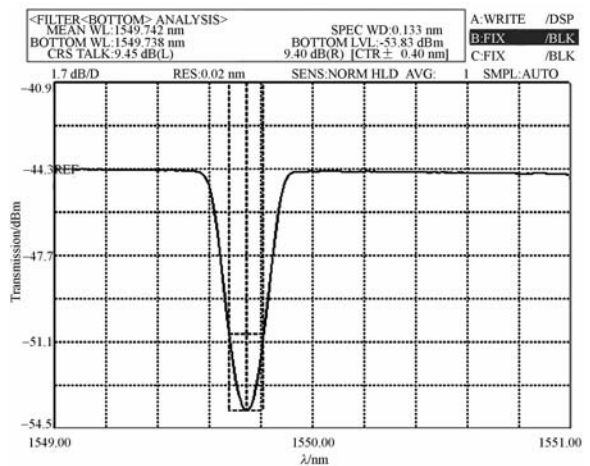
(a) 1号 FBG 金属化保护前透射谱

(a) Transmission spectrum of FBG No. 1 before metallizing protection



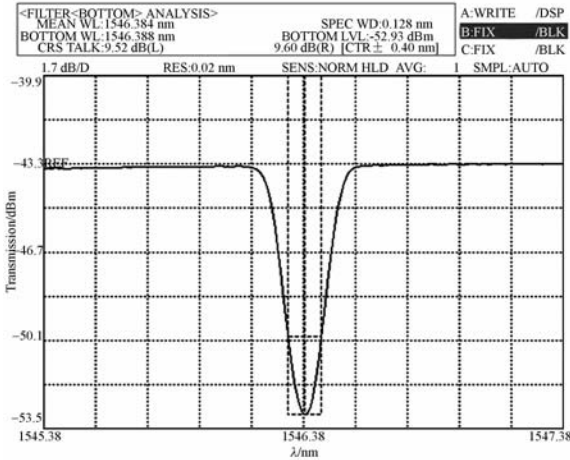
(b) 1号 FBG 金属化保护后透射谱

(b) Transmission spectrum of FBG No. 1 after metallizing protection



(c) 2号 FBG 金属化保护前透射谱

(c) Transmission spectrum of FBG No. 2 before metallizing protection



(d) 2号 FBG 金属化保护后透射谱

(d) Transmission spectrum of FBG No. 2 after metallizing protections

图 5 2支 FBG 在镍金属化保护前后的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of two FBGs before and after metallizing protections

0.8 mm。定义回程误差<sup>[13]</sup>：

$$\gamma_H = \pm (1/2) (\Delta H_{\max} / y_{FS}) \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $\Delta H_{\max}$  为正反行程间输出的最大差值,  $y_{FS}$  为满量程。

以 2 号 FBG 为测试单元, 在 100~300 °C 的温度测试中, 温度与 MFBG 中心波长的关系曲线如图 6 所示。图中升温灵敏度为 23.08 pm/°C, 降温灵敏度为 22.93 pm/°C; 与本课题组进行的理论分析相符<sup>[7]</sup>。复测定系数均大于 0.99, 回程误差为 6.64%, 即最高到 300 °C 的测试中, 最大正反行程差值折算成温度约为 13 °C。

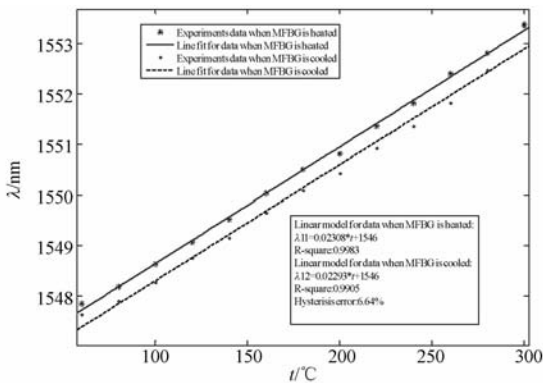


图 6 MFBG 温度传感实验(最高到 300 °C)及拟合结果

Fig. 6 Experimental and fitting results for MFBG as elevated temperature sensor is in the highest temperature of 300 °C

## 6 实验结果及分析

由图 5 可知, 镀后的 2 号 FBG 透射谱的峰值宽度、边模抑制比等均没有大的变化, 保持了原 FBG 良好的波长选择性, 除去测试时室温差异的影响外, 中心波长有一定的偏移, 说明金属化保护时产生了一定的残余应力。而对于 1 号 FBG, 其透射谱经金属化保护后, 峰值损耗降低, 且出现了旁瓣, 可能的原因是径向分界面上的应力使光纤产生微弯损耗, 而在光纤轴向产生的残余应力将使光纤产生翘曲, 因而进一步使光纤产生微弯损耗<sup>[14]</sup>, 或是由于金属保护层产生的各向异性产生了辐射模<sup>[15]</sup>。金属化 FBG 产生残余应力主要有两方面的原因: 一, 化学镀和电镀过程中热作用和化学作用的不均匀形成了体积应力; 二, 光纤层、化学镀层和电镀层组织结构的不均匀性造成结构应力<sup>[16]</sup>, 其大小与化学镀层厚度<sup>[17]</sup>、电镀液 pH 值、电流密度和温度、镀液成份及杂质<sup>[18]</sup>均有关系。因此, 经金属化保护后的 FBG 在 100 °C 至 300 °C 温度循环测试中较大的回适误差, 与温度循环过程的残余应力释放有关。

去除或缓和残余应力通常有热作用和机械作用两种方法。机械作用去除法通常用于消除铸造和焊接构件的残余应力。对于镍保护层器件, 适当的热处理是行之有效的缓和残余应力的方法<sup>[18-20]</sup>, 因此, 本文探索使用热作用调整 MFBG 的残余应力, 以改善其传感特性。用热作用消除应力与蠕变和应力松弛有密切的关系, 一般的方法是把构件在较高温度下, 数小时或数日的长时间保温, 然后再进行缓冷的操作。其机理在于: 由于材料的屈服应力是随着加热温度的增加而下降的, 而材料的纵弹性模量也随之下降, 因此, 加热时, 该温度下的残余应力一旦超过此时屈服应力, 材料就会发生塑性变形, 残余应力将会因这种变形而有所缓和, 但被缓和的应力不可能在屈服应力以下; 也有研究认为, 热作用对于残余应力的作用由一般应力松弛造成, 但实施时必须有一定的温度以上, 且维持一定的时间<sup>[16]</sup>。为此, 有必要探索适用于 MFBG 高温传感器的热处理方法。

## 7 MFBG 热处理及热处理后的高温实验

在 2 号 FBG 光栅第一次进行高至 300 °C 的传感实验后,将其在室温下放置半个月后,放入恒温干燥箱中,又从室温匀速加热到 350 °C,并随炉冷却,传感有效数值为 100~300 °C。温度传感特性及拟合结果如图 7 所示,升温灵敏度为 23.76 pm/°C,降温灵敏度为 24.28 pm/°C,回程误差为 5.89%。可见 MFBG 温度传感特性没有因放置时间及测试次数增多而改善,这与残余应力理论分析中,其有效地缓和必须使金属在高温中维持一定时间的结论相符。因此,选择适当的退火温度并保持一定的时间,是有效降低残余应力对 MFBG 影响的关键。由于不希望使 MFBG 因热处理而退化太大,并考虑其尾纤仍由普通的丙烯酸盐涂层包层保护,不能耐受高温,本文经试验 3 次将光栅放在 120 °C 的恒温干燥箱内保温 8 h 并随炉冷却,然后再进行高温温度传感实验,结果如图 8 所示,其升温灵敏度为 22.84 pm/°C,降温灵敏度为 22.76 pm/°C,回程误差为 3.62%,即 100~300 °C 温度测试中最大正行程差值折算成温度约为 7 °C。

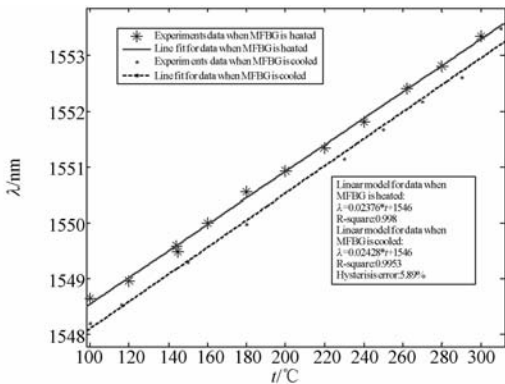


图 7 MFBG 第二次高温传感实验及拟合结果(从 100 °C 到 300 °C)

Fig. 7 Experimental and fitting results for MFBG as elevated temperature sensor in the second experiment (from 100 °C to 300 °C)

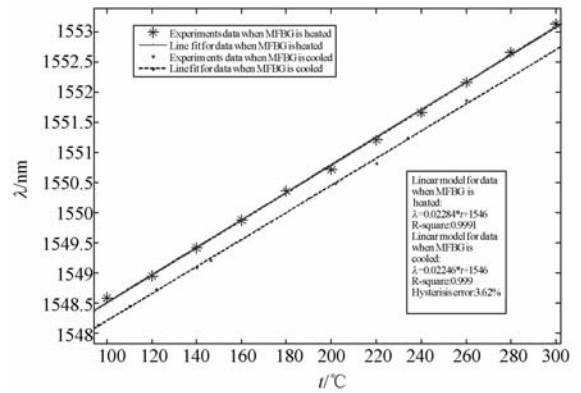


图 8 MFBG 经热处理后的高温传感实验及拟合结果(从 100 °C 到 300 °C)

Fig. 8 Experimental and fitting results for MFBG after high temperature sensor is treated (from 100 °C to 300 °C)

## 8 结 论

本文研究了经化学镀结合电镀镍的光纤布拉格光栅的高温传感特性。在传感最高值达到 300 °C 的温度传感实验中,由于化学镀结合电镀过程中产生的残余应力,升温 and 降温过程的灵敏度存在较明显差异,回程误差也较大。为此,综合分析 MFBG 的特点,本文将将其放入恒温箱中持续 8 h 进行 120 °C 热处理 3 次,再进行温度传感实验,发现其升温 and 降温过程的灵敏度差异、回程误差均明显降低。热处理后的 MFBG 升温灵敏度为 22.84 pm/°C,降温灵敏度为 22.76 pm/°C,回程误差为 3.62%。因此,化学镀结合电镀镍保护后的布拉格光纤光栅温度传感器经过恰当热处理后,其实际使用温度可以达到其典型极限值 300 °C,并且具有良好的传感特性。此研究为将 FBG 温度传感器实际传感温度扩展至其极限值,并为其作为埋入式智能结构传感器(特别的埋入金属结构中)提供了基础。

## 参考文献:

- [1] HIROSHI T. Fiber Bragg grating vibration-sensing system insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser [J]. *Optic Letters*, 2010, 35 (14):2349-2351.
- [2] 尹霄丽,张琦,余重秀,等. 相移超结构光纤布拉格光栅 3C-H 编解码器及其相关特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9):1608-1613.  
YIN X L, ZHANG Q, YU CH X, *et al.*. OCDMA encoder/decoder based on phase shifted super structure fiber Bragg grating and its correlation property [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (9): 1608-1613. (in Chinese)
- [3] 王为,林玉池,朱萍玉. 光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17 (3):488-492.  
WANG W, LIN Y CH, ZHU P Y. Application of FBG sensor to measurement of dynamic performance of low impedance material [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):488-492. (in Chinese)
- [4] 涂兴华,刘逢清,徐宁. 非连续线性啁啾取样布拉格光栅型多信道光纤滤波器设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9):1965-1971.  
TU X H, LIU F Q, XU N. Design of high channel-count optical of fiber filters based on sampled bragg grating with discrete linear chirp structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):1965-1971. (in Chinese)
- [5] 饶云江,王义平,朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 2005, 153-154, 185.  
RAO Y J, WANG Y P, ZHU T. *The Theory and Application of Fiber Bragg Grating* [M]. Beijing: Science Press, 2005, 153-154; 185. (in Chinese)
- [6] 涂亚庆,刘兴长. 光纤智能结构[M]. 北京:高等教育出版社, 2005:82-83.  
TU Y Q, LIU X CH. *Intelligent Structured Based on Optical Fibers* [M]. Beijing: Advanced Education Press, 2005:82-83. (in Chinese)
- [7] LI Y L, ZHANG H, FENG Y, *et al.*. Metal coating of fiber bragg grating and the temperature sensing character after metallization [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15: 391-397.
- [8] SHEN R S, ZHANG J, WANG Y, *et al.*. Study on high-temperature and high-pressure measurement by using metal-coated FBG [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50 (5): 1138-1140.
- [9] SHIUE S T. Effect of the coating thickness and roughness on the mechanical strength and thermally induced stress voids in nickel-coated fibers prepared by electroless plating method [J]. *Thin Solid Film*, 2005, 485: 169-175.
- [10] SANDLIN S, KINNUNEN T, RÄMÖ J, *et al.*. A simple method for metal re-coating of optical fibre Bragg gratings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201: 3061-3065.
- [11] 冯艳,张华,李玉龙,等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. 光学学报, 2009, 29 (2): 336-341.  
FENG Y, ZHANG H, LI Y L, *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29 (2):336-341. (in Chinese)
- [12] 王洪刚. 热弹性力学概论[M]. 北京:清华大学出版社, 1989:199.  
WANG H G. *Introduction to Thermoelasticity* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989: 199. (in Chinese)
- [13] 程德福,王君,凌振宝,等. 传感器原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2008.  
CHEN D F, WANG J, LIN ZH B, *et al.*. *The Theory and Application of Sensor* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [14] SHIUE S T. Effect of coating thickness on thermal stresses in tungsten-coated optical fibers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87 (8): 3759-3762.
- [15] SHIUES T, YANG C H, CHU R S, *et al.*. Effect of the coating thickness and roughness on the mechanical strength and thermally induced stress voids in nickel-coated optical fibers prepared by electroless plating method [J]. *Thin Solid Film*, 2005, 485:169-174.
- [16] 米谷茂[日]. 残余应力的产生及对策[M]. 北京:机械工业出版社, 1983:308-309.  
YONETANI S. *Produce and Counter Measure of Residual Stress* [M]. Beijing: China Mechine Press, 1983:308-309. (in Chinese)
- [17] SHIUE S T, LIN Y S. Thermal stress in metal-coated optical fibers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(11): 5719-5723.
- [18] 刘仁志. 影响镍镀层内应力的因素及排除方法[J]. 电镀与精饰, 2004, 10: 64-66.  
LIU R ZH. Factors affecting innerstress of nickel

deposits and their trouble-shootings[J]. *Electroplating & Finishing*, 2004, 10: 64-66. (in Chinese)

- [19] 谢华,陈文哲,钱匡武. 热处理对 Ni-P 镀层内应力及结合强度的影响[J]. *电镀与环保*, 2004, 24(3): 13-15.

XIE H, CHEN W ZH, QIAN K W. Effects of heat treatment on the internal stress and adhesion

of Ni-P coating [J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2004, 24(3): 13-15. (in Chinese)

- [20] 尚学军. 镍-磷合金化学镀及热处理[J]. *机械研究与应用*, 1998(1): 37-38.

SHANG X J. Electroless Ni-P and its heat treatment [J]. *Mechina Research and Application*, 1998(1): 37-38. (in Chinese)

#### 作者简介:



**饶春芳**(1975—),女,江西进贤人,博士研究生,副教授,1995年于中国计量学院获学士学位,2005年于江西师范大学获硕士学位,主要从事光纤智能金属结构及光波导传感方面研究。E-mail: rcf0322@163.com



**冯艳**(1976—),女,江西南昌人,博士,副教授,1997年于浙江大学获学士学位,2006年、2010年于南昌大学分别获硕士、博士学位,主要从事光纤传感及光纤涂覆层的研究。E-mail: confirmfyan@163.com



**肖丽丽**(1983—),女,江西南昌人,硕士研究生,2005年于南昌大学获学士学位,主要从事 FBG 传感器的研究。E-mail: liudongcheng\_@126.com



**叶志清**(1960—),男,浙江建德人,教授,硕士生导师,1984年于江西师范大学获学士学位,1990年北京邮电大学获工学硕士学位,主要从事光纤光栅、光纤激光器、光纤传感方面的研究。E-mail: yezhiqing2008@163.com

#### 导师简介:



**张华**(1964—),男,江西余干人,教授,博士生导师,1987年于江西大学获学士学位,1990年于哈尔滨工业大学获硕士学位,1997年于清华大学获博士学位,目前主要从事光纤智能金属结构,焊接自动化,工业机器人智能化和 underwater mobile welding robot technology方面的研究。E-mail: Zhanghua\_lab@163.com