

文章编号: 1674-2869(2016)02-0200-04

# 飞秒激光耐高温光纤光栅传感器的制备

夏巨江, 李 芳\*

武汉工程大学理学院, 湖北 武汉 430205

**摘 要:**针对传统光纤光栅传感器由于折射率调制量导致温度稳定性差的缺点, 利用了飞秒激光诱导折射率变化的机理制备了一种耐高温的光纤光栅温度传感器. 首先采用 800 nm 飞秒激光结合相位掩模板法在标准通信光纤上写制了光纤布拉格光栅传感器, 然后通过高温退火实验对该传感器在 900 ℃ 下的温度稳定性进行了测量, 最后采用线性拟合的方法得到了传感器的温度灵敏度系数. 实验结果表明, 该传感器在 900 ℃ 下具有较好的温度稳定性, 在温度为 100 ℃ 到 900 ℃ 范围内温度灵敏度系数达到  $1.27 \times 10^{-11}$  m/℃.

**关键词:** 光纤传感器; 光纤光栅; 高温测量; 飞秒激光

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2016.02.018

## Fabrication of High-Temperature-Resistant Fiber Grating Sensor by Femtosecond Laser

XIA Jujiang, LI Fang\*

School of science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract:** Aimed at the poor temperature stability of traditional fiber grating sensors, a heatresistant fiber bragg grating (FBG) sensor was fabricated by the femtosecond laser based on the mechanism of induced refractive index change. Firstly, the 800nm femtosecond laser combined with the phase mask plate method was adopted to write FBG sensors in the standard telecommunication fiber. Then the temperature stability of the sensor was measured by the high temperature annealing experiment under 900℃. Finally, the temperature sensitivity of the sensor was obtained by using linear fitting. The experimental results show that the sensor has a very high temperature stability under 900 ℃, and the sensitivity coefficient can achieve  $1.27 \times 10^{-11}$  m/℃ in the range of 100 -900 ℃.

**Keywords:** fiber sensors; fiber gratings; high-temperature measurement; femtosecond laser

## 1 引 言

光纤布拉格光栅是利用光纤存在光敏性, 用特殊方法引起光纤芯层的折射率发生周期性的调制形成的, 它能够对满足 Bragg 条件的入射光产生反射. 光纤光栅具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、易波分复用、使用周期长等优点, 在光纤通信领域<sup>[1-3]</sup>和光纤传感领域<sup>[4-6]</sup>具有不可忽视的地位.

普通型光纤光栅只能工作在室温到 200 ℃, 当

外界温度高于 200 ℃, 其反射光谱随着温度升高而急剧下降, 当温度达到 350 ℃, 光栅就会被完全擦除<sup>[7]</sup>. 为了满足光纤光栅在高温领域的应用, 国内外在耐高温光纤光栅的研制方面开展了大量工作. Groothoff<sup>[8]</sup>提出使用非稳态腔准分子激光器刻写出了 II 型光纤光栅, 它能够承受 700 ℃ 以上的高温, 但当温度在 700 ℃ 以上时, 光谱才发生变化. Fokine<sup>[9]</sup>采用氩离子激光器在载氢的掺氟光纤上刻写种子光栅, 然后使用高温炉将种子光栅进行

收稿日期: 2015-11-27

作者简介: 夏巨江, 硕士研究生. E-mail: jiangxia@163.com

\*通讯作者: 李 芳, 博士, 教授. E-mail: lifang\_wit@hotmail.com

高温退火实验.种子光栅在温度达到950℃时光栅完全被擦除,之后又生长出一个反射率约25%的再生光纤光栅.这种再生光栅称为化学组分光纤光栅(chemical composition gratings,简称CCG),它能够工作于高温.随后,研究人员在掺铒<sup>[10]</sup>及碲锗共掺<sup>[11-12]</sup>的光纤中制作了CCG,并证明了CCG能够在1000℃的高温环境下正常工作.Martinez<sup>[13]</sup>等采用飞秒激光脉冲结合逐点法在单模光纤上写制得II型光纤光栅,并发现光栅能够工作于1000℃以上的高温环境.Mihailov等<sup>[14]</sup>采用飞秒激光在普通单模光纤上采用相位掩模板法写制了II型光纤光栅,发现其能够承受1295℃的高温.为了进一步探索光纤光栅的耐高温特性,Grobnic等<sup>[15]</sup>用飞秒激光在蓝宝石光纤上制作能够正常工作于1500℃的II型光纤光栅.结合上述分析,采用飞秒激光器结合相位掩模板法,在标准通信光纤上制作出能够承受高温的II型光纤光栅,把传感器置于高温环境进行退火实验,测试了这种光纤光栅的温度稳定性和灵敏度.

## 2 实验部分

### 2.1 传感器制作

实验装置图如图1所示.实验中采用的飞秒激光器是输出中心波长为800 nm、重复频率为1 kHz、脉冲宽度为50 fs、单脉冲能量输出达到1.2 mJ,输出光斑的高斯半径为4 mm的钛宝石飞秒激光再生放大系统.光栅的刻写系统是由一个平凸透镜(柱透镜焦距60 mm)、一个三阶相位掩模板(Stocker Yale,相位掩模板周期为3200 nm)和一对高精密三维光纤调整架组成.光纤通过一个3 dB耦合器分别连接宽带光源和光谱分析仪,可以实时观察光谱变化.

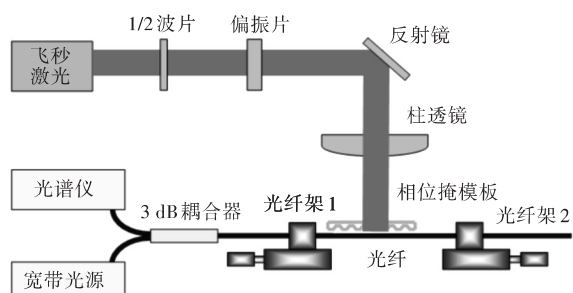


图1 飞秒激光刻写光纤光栅的光路图

Fig. 1 Optical path diagram of FBG fabricated by femtosecond laser pulses

800 nm飞秒激光经过一个半波片和格兰棱镜组合的光强调节装置,再经过一个柱透镜聚焦经

过相位掩模板形成级衍射光,在衍射区域产生的干涉条纹会诱导光纤纤芯折射率周期性的调制,从而制备出光纤Bragg光栅.实验中,光纤样品通过在一对高精度的三维调节台上被固定,通过仔细调节和聚焦,可以在光纤内部快速制备质量比较好的光栅.同时,通过光谱分析仪可以实时的观察监测光栅中心波长的生长过程.

实验中采用上述加工系统,使用加工功率为500 mW,曝光时间为2 min 30 s,制作出了反射强度为14 dB,中心波长在1543.85 nm附近的光栅样品,反射光谱如图2所示.

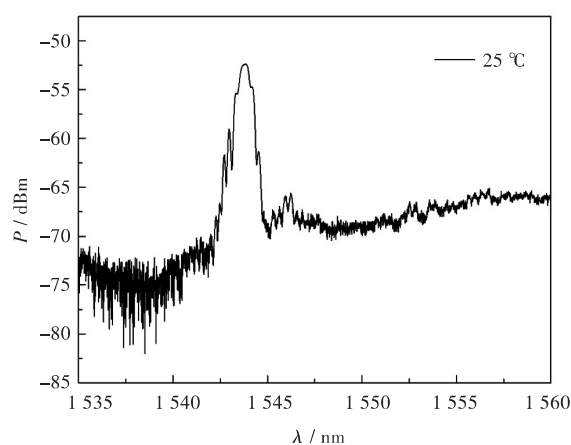


图2 光纤光栅反射光谱图

Fig. 2 Reflective spectrum of FBG

### 2.2 理论分析

由光纤耦合模理论分析可知,当宽带光源的光入射光纤布拉格光栅时,满足相位条件的光会发生反射,其中反射光的中心波长为

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

式(1)中, $n_{\text{eff}}$ 为光纤光栅的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅的周期.当光栅周边温度改变时,由于热膨胀引起周期的改变和热光效应使光纤纤芯的有效折射率的变化,从而导致中心波长发生变化:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\zeta + \alpha) \Delta T \quad (2)$$

式(2)中, $\zeta$ 代表热光系数,表示的是温度对光纤纤芯折射率的变化,而光纤光栅的热膨胀系数为 $\alpha$ ,由式(2)可知,当材料一定,光纤光栅的温度灵敏度系数基本上是只与材料系数相关,这就保证了光纤光栅作为温度传感器可以得到良好的线性输出<sup>[16]</sup>.对于熔融石英光纤,在1550 nm中心波长处可得到温度灵敏度为10.8 mp/℃<sup>[17]</sup>.

## 3 结果与讨论

将光栅样品悬空置于高温管式炉中,研究光

栅的波长对温度变化的灵敏度. 温度响应实验装置图如图3所示, 光栅的输入端通过3 dB耦合器与光源和光谱分析仪相连, 光栅区域置于高温管式炉中, 进行短周期退火实验.

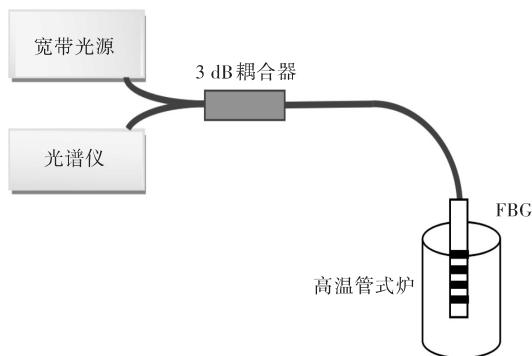


图3 实验装置图

Fig. 3 Experimental device

由于温度的改变会使光栅的反射光谱发生偏移, 所以对光栅样品的温度响应做了实验研究. 将Bragg光栅置于高温加热炉中, 对其进行温度响应测试, 其温度变化范围为100℃到900℃, 变化步长为100℃, 停留30 min待光谱稳定后, 记录其在不同温度下的光谱变化和中心波长的偏移情况, 结果如图4所示.

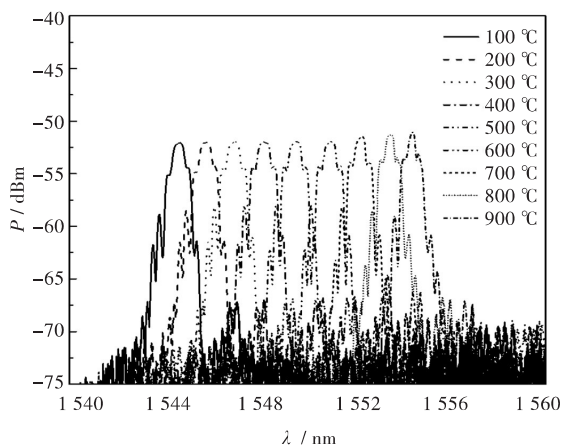


图4 光谱随温度的变化图

Fig. 4 Variation of spectrum with temperature

由图4可知, 随着温度的升高, 反射光的中心波长往长波方向漂移(即红移). 反射强度随着温度变化基本保持稳定, 即使在温度为900℃的高温, 反射强度也未下降. 为了验证光栅对温度的稳

定性, 实验中把温度增加至1000℃, 光栅强度也未发生严重退化. 表明此种方法制作的布拉格光栅能够在高温环境下正常工作. 为了得到光栅在100℃到900℃的温度灵敏度, 对此范围内的中心波长进行了线性拟合, 结果如图5所示. 线性拟合后, 光栅在100℃到900℃的范围内, 温度灵敏度为 $1.27 \times 10^{-11} \text{ m/}^\circ\text{C}$ , 线性相关系数达到0.998.

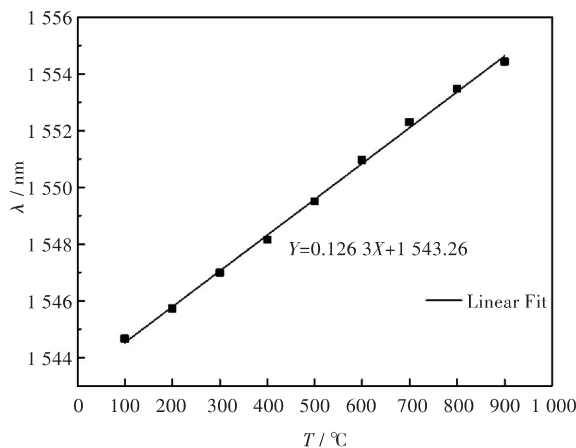


图5 中心波长随温度的变化图

Fig. 5 Variation of FBG wavelength with temperature

由上述实验分析可知, 设计的光纤光栅传感器相比于传统的光纤光栅传感器有效的避免了光栅的衰退效应, 不仅保证了传感器的灵敏度和稳定性, 而且提高了光纤光栅温度测量范围. 同时, 由于光纤的抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、重量轻等优点, 此光纤光栅传感器可以有效的工作于航空航天、导弹制导、冶炼等特殊的高温测量领域.

## 4 结 语

为了提高光纤光栅的温度稳定性, 采用飞秒激光结合相位掩模板法, 在标准通信单模光纤上制备出能够承受高温的Ⅱ型光纤光栅, 制备方法简单, 传感器尺寸小, 耐高温稳定性好. 实验结果表明, 随着温度的升高, 光纤光栅的中心波长会往长波方向漂移, 当工作温度为100℃到900℃范围时, 实验所得温度灵敏度为 $1.27 \times 10^{-11} \text{ m/}^\circ\text{C}$ , 线性相关系数达到0.998. 因此, 这种光纤光栅传感器能够满足航空航天、导弹制导、冶炼等一些高温领域的测量需求, 具有良好的应用前景.

## 参考文献:

- [1] 陈小刚, 黄德修, 元秀华, 等. 基于超连续谱和超结构光纤光栅的波分复用/光码复用系统[J]. 中国激光, 2008, 35(1): 77-81.  
CHEN X G, HUANG D X, YUAN X H, et al. Wavelength division multiplexing/optical code division multiplexing system based on supercontinuum and superstructured fiber bragg grating [J]. Chinese journal of lasers, 2008, 35(1): 77-81.
- [2] 裴丽, 简水生, 延凤平, 等. 4×10Gb/s 400 km 啾啾光纤光栅色散补偿研究[J]. 物理学报, 2003, 52(3): 615-619.  
PEI L, JIAN S S, YAN F P, et al. Research on the 4×10 Gb/s 400 km d dispersion compensation by chirped optical fiber grating [J]. Acta physica sinica, 2003, 52(3): 615-619.
- [3] 裴丽, 宁提纲, 李唐军, 等. 高速光通信系统中光纤光栅色散补偿研究[J]. 物理学报, 2005, 54(4): 1630-1635.  
PEI L, NING T G, LI T J, et al. Research on PMD compensation of cfbg in high speed optical communication system [J]. Chinese journal of lasers, 2005, 54(4): 1630-1635.
- [4] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子, 2002, 13(4): 421-430.  
JIANG D S, HE W. Review of application for fiber bragg grating sensors [J]. Journal of optoelectronics laser, 2002, 13(4): 421-430.
- [5] 田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 1-5.  
TIAN S Z, CAO C C, WANG D P. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete [J]. Chinese journal of lasers, 2013, 40(1): 1-5.
- [6] 贾子光, 任亮, 李宏男, 等. 应用光纤光栅传感器监测符合材料固化过程[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1299-1303.  
JIA Z G, REN L, LI H N, et al. Application of fiber bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite [J]. Chinese journal of lasers, 2010, 37(5): 1299-1303.
- [7] BAKER S R, ROURKE H N, BAKER V, et al. Thermal decay of fiber bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber [J]. Journal of lightwave technology, 1997, 15(8): 1470-1477.
- [8] GROTHOFF N, CANNING J. Enhanced type gratings for high-temperature operation [J]. Optics letters, 2004, 29(20): 2360-2362.
- [9] FOKINE M. Growth dynamics of chemical composition gratings in fluorine-doped silica optical fibers [J]. Journal of the optical society of America B, 2002, 19(8): 1759-1765.
- [10] TRPKOVSKI S, TRPKOVSKI D, KITCHER J, et al. High-temperature-resistant chemical composition bragg gratings in -doped optical fiber [J]. Optics letters, 2002, 27(22): 1974-1976.
- [11] CANNING J, STEVENSON M, BANDYOPADHYAY S, et al. Extreme silica optical fiber gratings [J]. Sensors, 2008, 8(10): 6448-6425.
- [12] ZHU J J, ZHANG A P, ZHOU B, et al. Effects of doping concentrations on the regeneration of Bragg gratings in hydrogen loaded optical fibers [J]. Optics communication, 2011, 31(1): 2808-2811.
- [13] MARTINEZ A, KHRUSHCHEV I, BENNION Y I. Thermal properties of fiber bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser [J]. Electronics letters, 2005, 41(4): 224-225.
- [14] MIHAILOVS J, SMELSER C W, GROBNIC D, et al. Bragg gratings written in all and Ge-doped core fibers with 800 nm femtosecond radiation and a phase mask [J]. Journal of lightwave technology, 2004, 22(1): 94-100.
- [15] GROBNIC D, MIHAILOV S, SMELSER J W, et al. Sapphire fiber bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications [J]. IEEE photonics letters, 2004, 16(11): 2505-2507.
- [16] 乔学光, 贾振安, 傅海威, 等. 光纤光栅温度传感理论与实验[J]. 物理学报, 2004, 53(2): 494-497.  
QIAO X G, JIA Z N, FU H W, et al. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. Acta physica sinica, 2004, 53(2): 494-497.
- [17] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.

本文编辑: 陈小平