

文章编号:1004-4213(2011)10-1490-4

含耐高温涂覆层长周期光纤光栅的温度特性研究

孙伟胜, 施解龙, 陈园园, 杨清

(上海大学 理学院 物理系, 上海 200444)

摘 要:利用逐点写入法在耐高温光纤中用红外飞秒激光直接写入了长周期光纤光栅,研究了光栅的高温温度特性,并做了理论分析.通过对含耐高温涂覆层的长周期光纤光栅进行 20 °C~300 °C 的温度传感实验,结果表明:在高温段光栅的谐振波长漂移量与温度之间仍能保持大的灵敏度(0.060 5 nm/°C)和好的线性度,且光纤耐高温涂覆层不受破坏,光纤耐高温涂覆在高温下不会出现碳化现象,光栅传感性能良好.实验证明该方法制作的光栅适合于长期在高温环境下使用,应用价值巨大.

关键词:长周期光纤光栅;飞秒激光脉冲;耐高温光纤;高温光纤传感

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114010.1490

0 引言

长周期光纤光栅(Long-Period Fiber Grating, LPFG)在光纤通信和传感中有着极为广泛的应用,例如增益均衡器^[1]、梳状滤波器^[2]、多波长光纤光源^[3]以及光纤光栅传感器^[4-6].这些器件具有很强的抗电磁干扰能力,易于采用集成和复用,特别在传感领域,能够实现分布式多点传感,但是关于长周期光纤光栅在温度达到 300 °C 的高温环境下比如油气井下的温度传感的应用却鲜有报道.这首先是因为由于普通的 LPFG 的外部涂覆层材料(丙烯酸树脂)或封装材料在高温环境下容易出现碳化现象,其内部的光栅虽然还有传感作用,但已经不能实际应用^[7];其次是普通的紫外光写入的 LPFG 在高温下容易发生擦除现象^[8].因此,研究可以长期应用于高温环境下工作的 LPFG 具有重大的实际应用意义.

传统制备应用于高温环境下的光纤光栅,一般是将紫外准分子激光通过相位掩膜法在光敏光纤上形成一段长周期光纤光栅,然后在将耐高温涂覆材料(聚酰亚胺)重新涂覆在裸光纤光栅上,这种制作方法有很多不足之处,比如工艺复杂,成本较高,所得的光栅在高温下不稳定,很容易被擦除,失去传感功能.为了克服以上传统制备方法的缺陷,以及基于飞秒激光脉冲刻写光纤光栅,因超快飞秒激光与材料作用时间短,没有热扩散、刻写的光栅具有很好的

高温稳定性和抗老化性^[9]等独特优势,我们首次提出了一种全新的制备方法,即利用红外飞秒激光在耐高温光纤中透过外部的聚酰亚胺涂覆材料直接写入 LPFG.此方法的难点在于由于耐高温涂覆层的存在,怎么将飞秒激光聚焦在纤芯区域以及合适的飞秒激光阈值功率和曝光时间的选择.由于耐高温高分子聚合物聚酰亚胺对于红外飞秒激光具有较低的光学吸收作用和其消融值依赖于激光强度^[10],这就允许我们一方面通过高倍显微镜系统聚焦光束于纤芯位置,使其相互作用,另一方面这种强烈地依赖性可以用来阻止外部材料的消融^[11],避免聚酰亚胺材料受到破坏;后者通过参考 Martinez^[9]等人的方法首先在除去涂覆层的普通单模光纤中成功写入 LPFG,记录下阈值功率,然后在未去涂覆层的普通单模光纤中成功写入 LPFG,记录下阈值功率,最后经过反复调试,最终成功地在耐高温光纤中成功写入 LPFG,与此同时实验研究了耐高温涂覆层 LPFG 的温度传感特性.结果表明有耐高温涂覆层 LPFG 的谐振峰波长与温度之间存在良好的线性关系,这使其在光纤传感和通信领域有着更加广泛的应用前景.

1 实验装置与原理

1.1 实验装置

实验采用逐点法写入,就是指沿着光纤每次一

基金项目:国家自然科学基金(No. 60808002)和上海市重点学科建设项目(No. S30105)资助

第一作者:孙伟胜(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为长周期光纤光栅. Email: wssun615@163.com

导师(通讯作者):施解龙(1960-),男,副教授,主要研究方向为光纤光栅、光通信器件等. Email: sjlong@staff.shu.edu.cn

收稿日期:2011-05-16; **修回日期:**2011-08-16

步,逐点诱发光栅区域产生折射率变化.图1为典型的飞秒激光逐点法的实验装置图,实验用的光纤为长飞耐高温光纤 HT2512-A(纤芯直径为 $9\ \mu\text{m}$,包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,涂覆层的材料为聚酰亚胺,其直径为 $155\ \mu\text{m}$).图中的飞秒激光脉冲由钛蓝宝石飞秒激光器产生,其脉冲宽度为 $120\ \text{fs}$,波长为 $800\ \text{nm}$,且重复频率为 $1\ \text{kHz}$.激光输出功率可通过中性密度滤波器来调节.本实验中,光纤被置于计算机控制的高精度三维移动台上,激光光束通过光路被导入显微镜系统,通过 100 倍的显微物镜($\text{NA}=0.9$)聚焦到纤芯中,位置聚焦对准后,在控制三维移动平台的软件中将各参量设置好,如移动周期即光栅周期为 $465\ \mu\text{m}$,每点曝光时间为 $4.5\ \text{s}$,然后通过激光开关 Shutter 控制每个点的写入,每写入一个点后,通过三维控制平台移动进行下一个点的写入,总共周期数为 40 .在光纤光栅的刻写过程中,LPFG 透射谱可由一个宽带光源($1\ 200\sim 1\ 600\ \text{nm}$)和安捷伦光谱仪(HP86142B 型)实时监控.

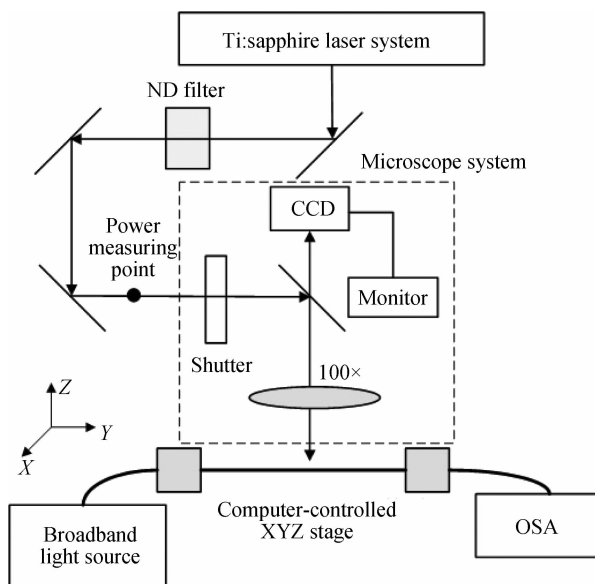


图1 实验装置图

Fig.1 The schematic of the experimental setup

LPFG 的温度传感测试装置如图2.将写好的耐高温光纤光栅放入数字温控箱中,利用温控箱提供环境温度,从宽带光源 SLED 发出的光入射到单模光纤中,从而入射到温控箱中的 LPFG,带有光纤光栅的一端自由悬挂在温控箱内,经受环境温度的变化透射出的光通过另一端的光谱仪可观察到透射光中损耗峰中心波长的变化.

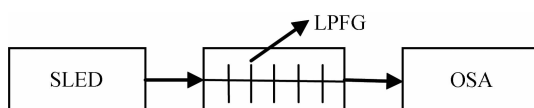


图2 耐高温 LPFG 的温度实验装置

Fig.2 The temperature experimental setup of the temperature resistant LPFG

1.2 实验原理

众所周知,温度主要通过影响 LPFG 的谐振峰处的纤芯模的有效折射率与 m 阶包层模有效折射率之差和光栅周期 Λ 引起谐振峰波长 λ_{res} 的漂移,其相位匹配条件为^[12]

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda \quad (1)$$

由于纤芯基模和包层模有效折射率及光栅周期都是温度的函数,对式(1)两边同时温度微分可得谐振波长的温度灵敏度为^[13]

$$d\lambda_{\text{res}}/dT = (dn_{\text{eff}}^{\text{co}}/dT - dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}/dT)\Lambda + (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})d\Lambda/dT \quad (2)$$

在外界温度变化过程中,光纤热膨胀效应引起的光栅周期变化为 $d\Lambda/dT = \alpha\Lambda$, α 为光纤的热膨胀系数;由热光效应引起的纤芯基模有效折射率变化为 $dn_{\text{eff}}^{\text{co}}/dT = \xi_{\text{co}}n_{\text{eff}}^{\text{co}}$,包层有效折射率变化为 $dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}/dT = \xi_{\text{co}}n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$, ξ_{co} 和 ξ_{cl} 分别为纤芯和包层的热光系数;再考虑到光纤的模式色散和波导色散,式(2)可表示为

$$d\lambda_{\text{res}}^m/dT = \lambda_{\text{res}}^m \gamma^m (\alpha + \tau_{\text{temp}}^m) \quad (3)$$

式中, γ^m 为光纤波导色散因子; τ_{temp}^m 表示温度灵敏度因子,且

$$\tau_{\text{temp}}^m = (\xi_{\text{co}}n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \xi_{\text{cl}}n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) / (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \quad (4)$$

由上述可知,LPFG 谐振波长的温度灵敏度的大小和符号主要由 γ^m 和 τ_{temp}^m 两项决定.在相位匹配曲线波长范围 $800\sim 2\ 000\ \text{nm}$,对于 $m=1$ 至 $m=7$ 次包层模, $d\lambda_{\text{res}}^m/dT$ 在整个波长范围内均正,这里因为对于低阶模时 $\gamma^m > 0$,对于标准单模光纤, $\tau_{\text{temp}}^m > 0$.故本文讨论的耐高温标准单模光纤 $d\lambda_{\text{res}}^m/dT > 0$,即当温度升高时,谐振波长会向其长波方向漂移.再从式(2)看出 LPFG 的温度灵敏度不仅与纤芯的参量有关,而且还与包层的参量有关,这也是为什么 LPFG 相对于光纤 Bragg 光栅对温度更敏感的原因^[12].

2 实验结果与分析

在飞秒激光刻写 LPFG 的装置中,光纤通过高精度三维移动控制,通过计算机上的控制设置参量.本文取光栅长度为 $18.6\ \text{mm}$,光栅周期为 $465\ \mu\text{m}$,考虑到聚酰亚胺涂覆层的直径和材料特性,取激光功率为 $1.5\ \text{mW}$,大概是裸光纤写入功率的 1.5 倍,多出来的功率用于补偿光在聚酰亚胺涂覆层中的损耗,功率测量点在 Shutter 之后,每点曝光时间设为 $4\ \text{s}$,然后逐点对光纤进行照射,通过光谱仪的实时监控,最后得到了如图3的 LPFG 的透射谱.图4(a)是写制光纤后光纤纤芯在 100 倍物镜下的侧面图片,(b)是纤芯作用区域对应的耐高温涂覆层的

侧面图,图中很清楚地显示在光栅写入过程中,耐高温涂覆层没有收到破坏.

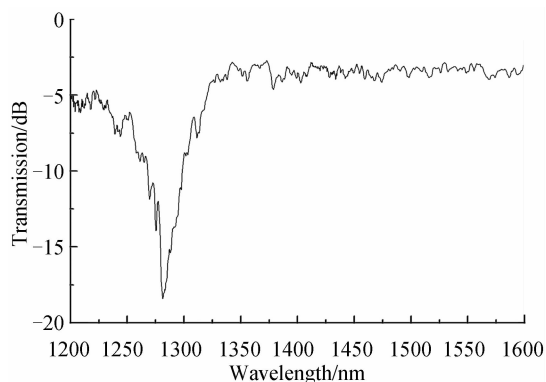


图3 含耐高温涂覆层 LPFG 透射谱
Fig. 3 The transmission spectrum of LPFG with the temperature resistant coating

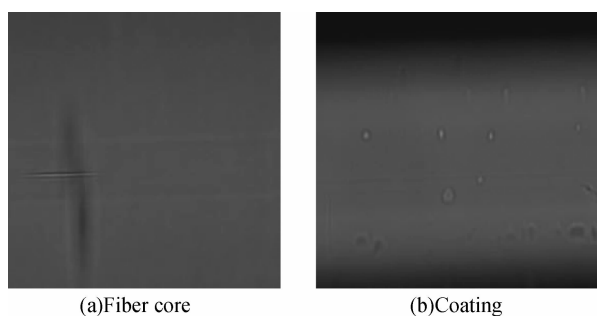


图4 纤芯调制区域和对应的涂覆层区域的侧面图
Fig. 4 The side of the core modulation and coating

如图3所示,该光栅的附加插入损耗较大,约为-5 dB,造成这一现象的原因可能有两个:一是光纤耐高温涂覆层吸收激光能量造成的消融部分可能影响了光纤内部所受的应力以及纤芯与包层模式间的耦合,使得光在通过光纤光栅段出现了较大的量损失;二是飞秒激光在光纤中引起结构的不均匀从而导致光的散射效应造成部分能量的损失. 所得到光栅其谐振峰波长约在1280 nm附近,谐振深度为-16 dB. 由于本文透过聚酰亚胺涂覆直接在单模光纤中写入LPFG,这样不仅提高了光栅段的机械强度,而且还省去了传统制作耐高温光纤中先剥去涂覆层,写好光栅后再涂上聚酰亚胺涂覆这一过程,大大降低了应用成本.

在LPFG温度传感实验中,从常温开始测量,数字温控箱的温度每变化10℃,待温度恒定以后采集数据. 最终得到20℃~300℃范围内耐高温LPFG的谐振波长的漂移量与温度变化之间的响应曲线,如图4. 从图可以看出,耐高温光纤LPFG在20℃~300℃范围内有着良好的线性关系. 且经过计算,其温度灵敏度为0.0605 nm/℃,且漂移方向与理论相符,尤其在高温段100℃~300℃,由于耐高温涂覆层的存在,光栅依然有良好的灵敏度和线性度,而含普通涂覆层LPFG已经出现碳化现象,

使得LPFG失去应有的传感作用. 同时,还做了降温实验,如图5三角点线所示,发现耐高温光纤LPFG的重复性和稳定性很好,在升温 and 降温过程中,光栅谐振波长随温度的变化关系一致,没有迟滞效应. 对于普通丙烯酸树脂涂覆的单模光纤,在温度超过达到300℃时,涂覆层就会变黑变脆,涂覆层和纤芯分不出来且特别容易损坏,虽然还有传感特性,但已经不能够用于实际. 而本文直接用飞秒激光透过耐高温光纤写入LPFG,不但在工艺能够大大简化,降低成本,而且在温度达到300℃时依然能正常工作,而且性能良好,不会出现碳化现象.

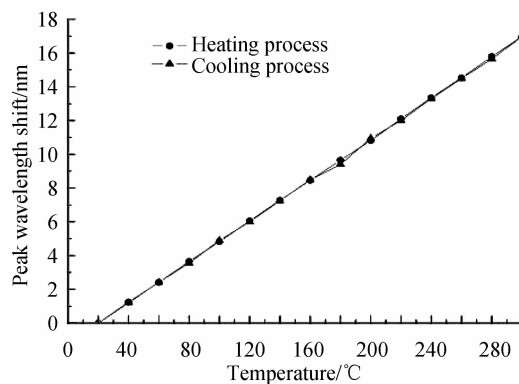


图5 耐高温 LPFG 峰值波长漂移量随温度变化曲线
Fig. 5 Peak wavelength shift versus temperature for the temperature resistant LPFG

3 结论

综上所述,借助高倍显微镜系统,本文成功地在耐高温光纤中用红外飞秒激光逐点直接写入了LPFG,且耐高温涂覆没有受到破坏,同时本文还对该LPFG作了高温传感方面的实验,实验证实,在高温段其谐振峰漂移量与温度变化能保持好的灵敏度和线性度,灵敏度达到0.0605 nm/℃,没有明显的迟滞效应,可以长期的广泛的应用在高温恶劣环境中.

参考文献

- [1] PAUL F W, JUSTIN B J. Broad-band Erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter[J]. *IEEE Photonics Technology Lett*, 1997, **9**(10): 1343-1345.
 - [2] LEE B H, KIM Y J, CHUNG Y, et al. Analytic solution for cascaded long-period fiber gratings[J]. *IEICE Trans Electron*, 2001, **E84-C**(5): 3540-3549.
 - [3] GU X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(7): 509-510.
 - [4] BHATIA V, VENGSARKAR A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(9): 692-694.
 - [5] YU You-long, TAN Ling, ZOU Li-gang, et al. Piezoelectric ceramic characteristics using fiber grating sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 994-997.
- 余有龙, 谭玲, 邹李刚, 等. 用光纤光栅传感器研究压电陶瓷的性质[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 994-997.

- [6] DAI Ji-xiang, YANG Ming-hong, CHENG Yun, *et al.* Hydrogen sensor based on D-shaped fiber bragg grating coated with WO₃-Pd composite films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7):1003-1007.
代吉祥,杨明红,程芸,等.基于WO₃-Pd复合膜的D型光纤光栅氢气传感器[J].光子学报,2011,**40**(7):1003-1007.
- [7] QIAO Xue-guang, LI Ting, WANG Hong-liang, *et al.* Response characteristics of high temperature resistant fiber Bragg grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(2): 209-211.
乔学光,李婷,王宏亮,等.耐高温光纤 Bragg 光栅的响应特性研究[J].应用光学,2007,**28**(2):209-211.
- [8] BAKER S R, ROUKE H N, BAKER V, *et al.* Thermal decay of Fiber Bragg gratings written in Boron and Germanium codoped silica fiber[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**: 1470-1477.
- [9] 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.
- [10] BAUDACH S, BONSE J, KAUTEK W. Ablation experiments on polyimide with femtosecond laser pulse [J]. *Applied Physics A*, 1999, **69**(Sup):S395-S398.
- [11] AMOS M, IGOR Y. Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2006, **31**:1603.
- [12] ZHANG Zhi-rong, ZHANG Guan-mao, ZHANG Xiao-ping. Strain and temperature sensitivities of long period fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1):103-106.
张志荣,张冠茂,张晓萍.长周期光纤光栅应变和温度传感灵敏度的研究[J].光子学报.2009,**38**(1):103-106.
- [13] 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,2006:279.

Temperature Characteristics of Long Period Fiber Gratings Contained High Temperature Resistant Coating Layer

SUN Wei-sheng, SHI Jie-long, CHEN Yuan-yuan, YANG Qing
(Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Using Point-by-Point method, long period fiber gratings were inscribed in the high temperature resistant fiber by an infrared femtosecond laser. Characteristics of the high temperature resistant fiber was analyzed theoretically. The experiment with long period fiber gratings contained high temperature resistant coating layer indicates that the shift of resonant peak at the temperature range from 20 °C ~ 300 °C keeps a good linearity and the temperature sensitivity is 0.060 5 nm/°C. The coating of the long period fiber gratings is not carbonized due to the existence of the high temperature resistant polyimide materials and grating sensor with good performance. The result shows that the high temperature resistant long period fiber gratings can be used in the high temperature environment for long term application.

Key words: Long period fiber grating; Femtosecond laser; High temperature resistant fiber; High temperature fiber sensing