

飞秒激光制备的全单模光纤法布里-珀罗干涉高温传感器

王文轶^{1,2} 文建湘¹ 庞拂飞¹ 陈娜¹ 王廷云¹

(¹上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072)

(²河北联合大学信息工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要 提出了一种全单模光纤的本征型法布里-珀罗干涉(IFPI)高温传感器。光纤 IFPI 传感器由飞秒激光在标准单模光纤上刻写的一对内部反射镜和腔内光纤构成,其反射光谱的干涉条纹对比度达到 10 dB,而插入损耗仅为 0.1 dB。实验结果表明,该传感器的测量温度可达 1000 ℃,温度灵敏度为 14.9 pm/℃。而且在重复测量中,反射光谱具有良好的一致性,可以准确地实现高温传感。飞秒激光制备的光纤 IFPI 高温传感器完全由标准单模光纤构成,结构简单、成本低廉,易于连接现有的光纤器件构成光纤传感网络,在实际工程中有较大的应用价值。

关键词 光纤光学;本征型法布里-珀罗干涉传感器;高温测量;飞秒激光

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1005001

All Single-Mode Fiber Fabry-Pérot Interferometric High Temperature Sensor Fabricated with Femtosecond Laser

Wang Wenyuan^{1,2} Wen Jianxiang¹ Pang Fufei¹ Chen Na¹ Wang Tingyun¹

(¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

(²College of Information Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei 063009, China)

Abstract Fiber-optic intrinsic Fabry-Pérot interferometric (IFPI) sensor, fabricated in standard single-mode fiber with femtosecond (fs) laser, which can be used for high temperature measurements is proposed. The fiber-optic IFPI sensor consists of a pair of internal reflectors inscribed by the femtosecond laser and the in-cavity fiber. The fringe contrast of the reflection spectrum of the sensor reaches 10 dB and the insert loss is only 0.1 dB. The experimental results show that the measurable temperature of this sensor is up to 1000 ℃ and the temperature sensitivity is 14.9 pm/℃. The repeatability of the reflection spectra is very high in many measurements, which indicates that the sensor can achieve accurate measurement of high temperature. The sensor is simple, low-cost and easy to connect to the existing fiber-optic devices, so it suits for fiber-optic sensing network and has a great value in engineering.

Key words fiber optics; intrinsic Fabry-Pérot interferometric sensor; high temperature measurement; femtosecond laser

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 120.6780; 140.3390

1 引言

恶劣环境中物理量的监测在工业场合中往往是不可避免的,例如冶金工业中对温度的监测,核工业中对辐射的监测,油井中对温度与压力的监测等。

其中,高温的监测对生产安全,过程控制以及生产效率都具有极其重要的影响。光纤传感器由于具有体积小、质量轻、抗电磁干扰等优点,在高温传感方面具有普通电类传感器所无法比拟的优势,引起了广

收稿日期: 2012-05-24; 收到修改稿日期: 2012-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(60937003,61107076)资助课题。

作者简介: 王文轶(1978—),男,博士研究生,主要从事光纤传感、特种光纤等方面的研究。E-mail: w3w3y3@shu.edu.cn

导师简介: 王廷云(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事特种光纤、光纤通信器件等方面的研究。

E-mail: tywang@mail.shu.edu.cn(通信联系人)

大科技工作者和工程人员的兴趣。

目前的光纤高温传感器主要有基于光纤光栅和光纤干涉结构两种形式。其中光纤 Bragg 光栅 (FBG) 由于本身不耐高温, 所以其测量温度范围有限, 通常不高于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1,2], 而当用于更高温度的测量时, 往往需要采用特殊的 FBG^[3~5]。对利用周期性残余应力释放的方法制备的长周期光纤光栅 (LPFG) 而言, 虽然其耐温性能较好, 但由于 LPFG 对外界折射率比较敏感, 因此在实际应用中, 会降低其测量的准确性^[6]。基于干涉结构的光纤高温传感器, 由于采用干涉形式来进行传感, 因此灵敏度很高, 受到了广泛的研究^[7,8]。其中, 光纤 Fabry-Pérot (F-P) 干涉传感器由于其结构简单、成本低廉、稳定性高而得到了广泛应用。将其用于高温测量时, 大部分的光纤 F-P 传感器都采用了特种光纤作为传感部件, 如光子晶体光纤^[9~11], 蓝宝石光纤^[12] 或光子带隙光纤^[13], 虽然由特种光纤构成的光纤 F-P 传感器可测量的温度较高, 但它们和单模光纤的结构不同, 所以和单模光纤之间的耦合/熔接比较困难, 通常会造较大的损耗。且这些由特种光纤构成的传感器的成本相对较高, 不适合大范围应用。

本文提出了一种全单模光纤的本征型 F-P 干涉 (IFPI) 高温传感器, 该传感器由两个光纤内部反射镜和腔内光纤构成。其中, 光纤内部反射镜采用飞秒激光在标准单模光纤内部引入折射率变化加工而成。该传感器测量温度可达 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, 具有良好的高温传感特性, 并且重复性高、稳定性好、材料成本低廉。而且, 标准单模光纤和现有的各种光纤器件容易进行连接, 利于构成光纤传感网络, 对于推动光纤高温传感器的实用化将有很大的帮助。

2 光纤 IFPI 高温传感器的结构及温度传感原理

2.1 结 构

制备光纤 IFPI 传感头所采用的飞秒激光由再生放大 Ti 蓝宝石激光器产生, 其波长为 800 nm , 重复率为 1 kHz , 脉冲持续时间为 120 fs 。光纤 IFPI 传感头的显微照片如图 1 所示 (腔长 $1000\text{ }\mu\text{m}$)。

光纤 IFPI 传感头由一对光纤内部反射镜和它们之间的光纤构成, F-P 腔的长度由反射镜之间的距离决定。其中, 光纤内部反射镜采用飞秒激光在标准单模光纤 (G. 652D) 内部引入折射率变化来制备, 折射率改变量约为 0.01 , 因此该反射镜的反射

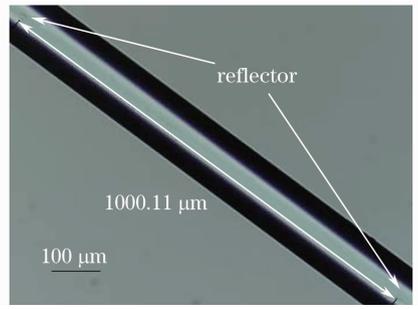


图 1 飞秒激光制备的光纤 IFPI 传感头的显微照片
Fig. 1 Micrograph of the fiber-optic IFPI sensor head fabricated with femtosecond laser

率约为一 49.2 dB 。这里采用平行加工方式来制备光纤内部反射镜^[14], 得到的光纤 IFPI 传感器的干涉条纹对比度可达 10 dB , 而且其插入损耗很小, 仅有 0.1 dB 。

2.2 温度传感原理

对于光纤 IFPI 传感器, F-P 腔的光程差可表示为

$$L = 2nl, \quad (1)$$

式中 n 为腔内介质的有效折射率, 即光纤的纤芯的有效折射率; l 为 F-P 腔的长度。当温度发生变化时, F-P 腔的光程差的变化为

$$\Delta L = \Delta(2nl) = \Delta n 2l + 2n \Delta l = n \xi \Delta T 2l + 2nL \alpha \Delta T = 2nl(\alpha + \xi) \Delta T, \quad (2)$$

式中 $\alpha = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}$ 为光纤的热膨胀系数; $\xi = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT}$ 为光纤纤芯的热光系数; ΔT 为温度变化量。从 (2) 式可以看出, 若 α 和 ξ 视为常数, 光纤 F-P 腔的光程差变化与温度的变化成正比, 比例关系由光纤的热膨胀系数、热光系数、F-P 腔内介质的有效折射率和 F-P 腔的长度共同决定。因此可以通过测量光程差的变化来测量温度。

由于飞秒激光在光纤内部引起的折射率变化为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$, 因此采用飞秒激光制备的光纤内部反射镜的反射率较低, 光纤 IFPI 传感器的干涉情况可用双光束干涉来等效, 反射信号可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi nl}{\lambda} + \varphi_0\right), \quad (3)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为 F-P 腔两个端面处的反射光强; λ 为光源的波长; φ_0 为干涉信号的初始相位。此时反射信号呈余弦分布, 其干涉条纹波谷处的波长 λ_m 满足

$$\frac{4\pi nl}{\lambda_m} + \varphi_0 = (2m + 1)\pi, \quad (4)$$

式中 m 是一个整数,表示干涉的级次。对(4)式作变换可以得到

$$2nl = \frac{[(2m+1)\pi - \varphi_0]\lambda_m}{2\pi} = \left(m + \frac{1}{2} - \frac{\varphi_0}{2\pi}\right)\lambda_m. \quad (5)$$

从(5)式可知,当 m 不变时,式中等号右侧括号中的部分为一常数。因此对某一个干涉级次,光纤 F-P 腔的光程差与干涉条纹波谷处的波长成正比,有

$$\frac{\Delta(2nl)}{2nl} = \frac{\Delta\lambda_m}{\lambda_m}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\lambda_m$ 为干涉条纹波谷处的波长的移动量。将(2)式代入(6)式,可得

$$\Delta T = \frac{1}{(\xi + \alpha)\lambda_m} \Delta\lambda_m. \quad (7)$$

从(7)式可知,通过测量干涉条纹波谷处的波长的移动量,就可以对温度进行测量。

3 高温传感实验及讨论

3.1 实验系统

光纤 IFPI 高温传感实验系统如图 2 所示,光纤 IFPI 传感头放置在管式气氛炉的中心区域,测量高温区的温度。传感头的一端接入到光传感分析仪 si725 (Micron Optics Inc.),用来对反射光谱进行测量。光传感分析仪 si725 的光源扫描范围为 1510 ~ 1590 nm,扫描频率为 2 Hz,波长分辨率为 0.005 nm。传感头的另一端浸入到折射率匹配液中,以消除其端面反射对传感头反射信号的影响。在高温传感实验中,令管式气氛炉的温度从室温上升到 1000 °C,每隔 100 °C 测量一次光谱数据,然后进行降温,同样每隔 100 °C 测量一次光谱数据,并进行重复实验。

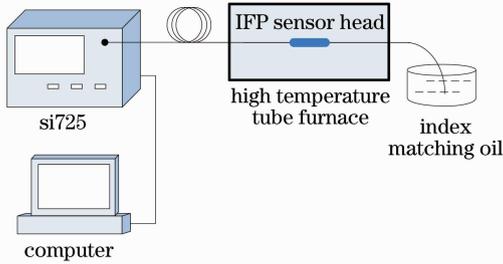


图 2 高温实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of high temperature experimental system

3.2 实验结果及讨论

在高温传感实验中,采用的是腔长为 1080 μm 的光纤 IFPI 传感头,其反射光谱如图 3 所示。从图中可见,在波长 1572 nm 处,其干涉条纹对比度可达 12 dB,较高的对比度有利于对波峰/波谷位置的

确定,并可方便后续的信号处理。在波长 1570 nm 处,光纤 IFPI 传感头的自由光谱范围(FSR)为 0.77 nm,根据腔长计算公式 $l = \frac{\lambda^2}{2n\lambda_{\text{FSR}}}$,取 $n = 1.456$,得腔长为 1099 μm ,与设计长度相符。此外,图 3 同时也画出了光传感分析仪光源的扫描光谱,其功率约为 -7.2 dBm。由图 3 可见,光源的谱线比较平坦,因此反射光谱的绝对功率基本可以反映光纤 IFPI 传感器的特性。

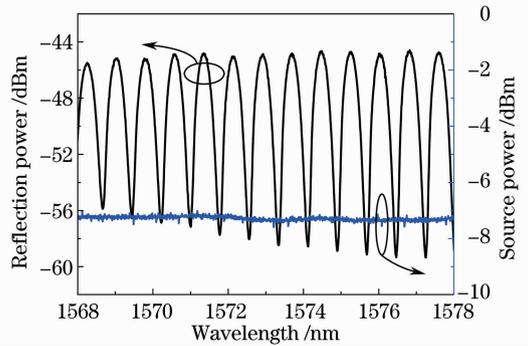


图 3 光纤 IFPI 传感器的反射光谱(腔长 1080 μm)和光源光谱

Fig. 3 Reflection spectrum of the fiber-optic IFPI sensor (cavity length of 1080 μm) and the spectrum of optical source

在进行高温传感测试之前,首先对传感头进行退火处理,让温度从室温缓慢升高到 1000 °C,并在 1000 °C 下保持 300 min,然后再缓慢降低到室温,用来消除光纤拉制时产生的残余应力以及采用飞秒激光制备光纤内部反射镜时在光纤内产生的应力,得到一致性良好的温度传感特性。高温传感过程中,采用反射光谱在波长 1570 nm 处的波谷作为观测点,得到反射光谱随温度的变化情况,如图 4 所示。

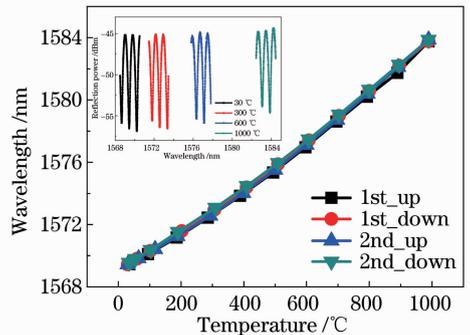


图 4 反射光谱随温度的变化情况(波长 1570 nm 处)

Fig. 4 Reflection spectrum against temperature (at wavelength of 1570 nm)

从图中可以看到,在两次升降温过程中,飞秒激光制备的光纤 IFPI 传感器的反射光谱随温度的变

化情况具有良好的重复性和稳定性。反射光谱随温度的升高向长波方向移动,在 1570 nm 处的灵敏度为 14.9 pm/°C。在 0~1000 °C 的范围内,反射光谱对温度的灵敏度比 0~100 °C 时的情况要高 (10.6 pm/°C)^[14],认为这是由于光纤纤芯的热光系数随温度升高而增大所造成的^[15]。此外,从实验结果中可以看到,反射光谱的移动相对于温度的变化没有出现滞后现象,表明光纤 IFPI 传感器的温度传感特性良好,可以实现准确的高温测量。

由于石英材料不会对 800 nm 的飞秒激光产生线性吸收,因此飞秒激光在玻璃材料内部引起的折射率变化是由非线性效应引起的。当采用高强度飞秒激光辐照时,非线性效应在材料内部产生多光子吸收/电离,导致材料结构发生变化,从而引起折射率变化^[16]。此种折射率变化具有很高的温度稳定性,在温度低于石英的转变温度时,所引起的折射率变化是不可擦除的^[16,17],利用这种折射率变化形成的光纤内部反射镜具有极好的耐热性,可以承受 1000 °C 的高温。

图 4 中的插图 of 光纤 IFPI 传感器在 30 °C、300 °C、600 °C 和 1000 °C 四个不同温度下的反射光谱,从图中可以看到,不同温度下,反射光谱都保持良好的干涉条纹形状。在 30 °C、300 °C、600 °C 时,干涉条纹的对比度基本没有发生变化,当温度达到 1000 °C 时,干涉条纹的对比度减小了 1.3 dB。这是由两方面原因导致的:1) 在高温下,F-P 腔内光纤的传输损耗增大,导致发生干涉的两束光之间的强度差增大,使得干涉条纹的对比度下降;2) 飞秒激光制备的反射镜的反射率在高温下会发生变化,引起干涉条纹对比度的变化。在随后的降温过程中,观测到上述的干涉条纹对比度的变化是可逆的,其对比度又恢复到原来的大小。说明飞秒激光制备光纤内部反射镜具有很好的热稳定性,在 1000 °C 的高温下仍能实现有效的反射效应,使得由该反射镜构成的光纤 IFPI 传感器具有良好的耐热性,在高温传感过程中稳定性良好,可用于 1000 °C 的高温测量。这里需要说明的一点是,尽管飞秒激光制备的光纤 IFPI 传感器在 1000 °C 下工作 300 min 没有出现失效现象,但其在 1000 °C 下更长时间的工作情况还有待进一步的研究。

4 结 论

采用飞秒激光制备的光纤 IFPI 传感器进行高温传感,通过高温退火,得到温度特性良好的高温传

感器。实验结果表明,该传感器可用于 1000 °C 的高温测量当中。在 0~1000 °C 的范围内,温度的灵敏度为 14.9 pm/°C,而且在重复测量中,反射光谱具有良好的重复性和稳定性,表明飞秒激光制备的光纤 IFPI 传感器高温传感特性优良。在传感温度范围内,反射光谱均呈现明显的干涉条纹,说明光纤 IFPI 传感头在高温下稳定性良好。飞秒激光制作的光纤 IFPI 传感器完全由单模光纤构成,成本低廉、结构稳定,易于和现有的各种标准光纤器件进行连接,从而构成光纤传感网络,在工程领域中具有较强的实用价值。

参 考 文 献

- 1 H. Patrick, S. L. Gilbert, A. Lidgard *et al.*. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**(5): 2940~2945
- 2 Zhou Li, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Mechanism and experimental research on performance degeneration of fiber Bragg grating affected by temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0405007
周 丽, 梁大开, 曾 捷 等. 温度影响光纤光栅传感器性能蜕化机理及实验研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0405007
- 3 G. Brambilla, V. Pruneri. Enhanced photorefractivity in tin-doped silica optical fibers (review)[J]. *IEEE Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(3): 403~408
- 4 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
- 5 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
- 6 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 389~392
王久玲, 饶云江, 朱 涛. 截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 389~392
- 7 Y. Wang, Y. H. Li, C. R. Liao *et al.*. High-temperature sensing using miniaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(1): 39~41
- 8 T. Zhu, T. Ke, Y. J. Rao *et al.*. Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high temperature measurement[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(19): 3683~3685
- 9 Y. N. Zhu, P. Shum, H. W. Bay *et al.*. Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 367~369
- 10 C. A. Wu, H. Y. Fu, K. K. Qureshi *et al.*. High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(3): 412~414
- 11 Xu Laicai, Deng Ming, Zhu Tao *et al.*. Fabry-Perot interferometer sensor for high temperature measurement based on photonic crystal fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(2): 21~25

- 许来才, 邓明, 朱涛等. 光子晶体光纤 F-P 干涉式高温传感器研究[J]. 光电工程, 2012, **39**(2): 21~25
- 12 Y. Z. Zhu, Z. Y. Huang, F. B. Shen *et al.*. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(7): 711~713
- 13 Y. F. Geng, X. J. Li, X. L. Tan *et al.*. Sensitivity-enhanced high-temperature sensing using all-solid photonic bandgap fiber modal interference[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(4): 468~472
- 14 T. Y. Wang, W. Y. Wang, N. Chen *et al.*. Fiber-optic intrinsic Fabry-Perot interferometric sensors fabricated by femtosecond lasers[C]. *SPIE*, 2011, 8034: 80340I
- 15 G. Adamovsky, S. F. Lyuksyutov, J. R. Mackey *et al.*. Peculiarities of thermo-optic coefficient under different temperature regimes in optical fibers containing fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(5): 766~773
- 16 S. J. Mihailov, C. W. Smelser, D. Grobncic *et al.*. Bragg gratings written in all-SiO₂ and Ge-doped core fibers with 800-nm femtosecond radiation and a phase mask [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 94~100
- 17 D. Grobncic, C. W. Smelser, S. J. Mihailov *et al.*. Long-term thermal stability tests at 1000 °C of silica fibre Bragg gratings made with ultrafast laser radiation[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2006, **17**(5): 1009~1013

栏目编辑: 王晓琰