

法布里-珀罗薄膜干涉的光纤温度传感器

高晓丹¹, 彭建坤², 吕大娟²

(1. 武汉东湖学院 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430212;
2. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了研制结构简单、成本低、可批量生产的微型光纤温度传感器, 分析了薄膜干涉型光纤温度传感器的原理, 选用 ZrO_2 和 Al_2O_3 两种介质薄膜材料, 采用 TFCalc 膜系设计软件设计了薄膜干涉型光纤温度敏感探头的膜系, 由南光 ZZS1100-8/G 箱式真空镀膜系统采用电子束蒸发技术在普通多模光纤端面蒸镀介质薄膜, 形成法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 薄膜干涉, 并搭建光纤温度传感测试系统, 测试结果表明: 在 200-600 °C 范围内, 所设计的干涉型光纤温度传感器的测试光谱随温度变化产生一定的波长漂移, 且波长漂移的温度特性为线性, 线性相关系数为 99.7%, 灵敏度为 $8.37 \times 10^{-6} / ^\circ C$ 。基于法布里-珀罗干涉的薄膜型光纤温度传感器体积小, 成本低, 结构紧凑, 可批量生产, 适合安装位置狭小或对传感器集成化要求较高的场合。

关键词: 光纤温度传感器; 薄膜干涉; 法布里-珀罗; 波长漂移

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0122002

Optical fiber temperature sensor based on Fabry-Perot coating interference

Gao Xiaodan¹, Peng Jiankun², Lv Dajuan²

(1. Electronic Information Engineering College, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China;
2. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technologies, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to develop a miniature fiber-optic temperature sensor with simple structure, low cost and mass production, the principle of optical coating interference-based temperature sensor was analyzed. The coating formula of temperature sensing probe was designed by TFCalc formula designing software using ZrO_2 and Al_2O_3 materials. The thin film was deposited on the tip of multimode fiber by using electron-beam evaporation in Nanguang ZZS1100-8/G box type vacuum coating machine. The measurement system of coating interference-based temperature sensor was interrogated. The experimental result shows that the wavelength shift of the fiber-optic temperature sensor is linear in the range of 200-600 °C, and the correlation coefficient was calculated to be 99.7%, the sensitivity of temperature is $8.37 \times 10^{-6} / ^\circ C$. The temperature sensor based on Fabry-Perot interference is suitable for mass production with stable performance, accurate point measurement, narrow installation position or higher application requirements for integrated sensor.

Key words: optical fiber temperature sensor; coating interference; Fabry-Perot; wavelength shift

收稿日期: 2017-06-15; 修订日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(61575151); 武汉东湖学院青年基金(2015dhzk06)

作者简介: 高晓丹(1980-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事光学薄膜及传感技术方面的研究。Email: gxd6368@163.com

0 引言

温度是科学技术和工业生产中最基本、最重要的物理量,温度的测量和控制非常重要。传统的测量方式,如热敏电阻、热电偶等类型的温度传感器,技术成熟、结构简单、稳定性强、价格低廉,故被广泛应用于国民经济、国防以及科研领域,然而在一些特殊环境,诸如高温、高压、易燃、易爆、强电磁场干扰等情况下,上述基于电信号测量的传统温度传感器受到很大的限制。

光纤温度传感器自 20 世纪 70 年代开始,以其自身所具有的体积小、重量轻、灵敏度高、耐腐蚀,不受电磁干扰等优点,得到国内外研究学者的特别关注^[1-2]。关于光纤温度传感器的各种研究方法层出不穷,譬如分布式光纤温度传感器^[3-5]、光纤光栅温度传感器^[6-8]、光纤荧光温度传感器^[9]以及干涉型温度传感器^[10-12]等等。相比于其它光纤温度传感器,薄膜干涉型光纤传感器是在光纤端面镀制纳米或微米级的薄膜,传感原件尺寸不超过光纤自身,体积更小,系统结构更紧凑,不需要采用复杂的微制作工艺或刻蚀复杂的微结构,也不需要像光纤布拉格光栅(FBG)测温需要考虑温度和应变的交叉影响。基于以上种种优势,近几年国内外对薄膜干涉型光纤温度传感器研究较多,主要集中在特种光纤如蓝宝石光纤上镀膜以实现其高温传感的特性^[13],但由于蓝宝石光纤没有包层,模式较多,工艺控制非常困难,且蓝宝石光纤制作工艺复杂,材料成本昂贵,实用性推广困难。因此,研究出一种性能稳定、可批量生产、成本低的薄膜干涉型光纤温度传感器具有非常重要的意义。

文中采用电子束蒸发技术在普通多模光纤端面蒸镀介质薄膜,形成法布里-珀罗(Fabry-Perot)薄膜干涉,从而实现一种微型薄膜干涉光纤温度传感器,而且可批量生产,性能稳定,能实现更精确的点测量,可应用于大型建筑结构、飞机及复合材料的结构健康监测当中,尤其适合在安装位置狭小或对传感器集成化要求较高的场合应用。

1 薄膜干涉型光纤温度传感器的原理

薄膜干涉型光纤温度传感器是采用物理气相沉积技术沉积温度敏感探头,即在光纤端面镀上单层

或多层薄膜,形成法布里-珀罗(F-P)腔。通过法布里-珀罗干涉性质,从光源发出的光经光纤传输到光纤端面会形成反射干涉光谱,如图 1 所示。

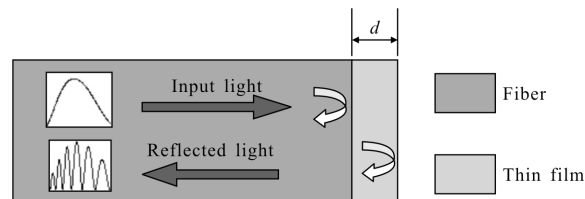


图 1 薄膜干涉温度传感探头的结构及原理

Fig.1 Schematic of thin film interference temperature sensor

根据法布里-珀罗腔双光束干涉理论,反射光谱的强度如下:

$$I_r(\lambda) = I_1(\lambda) + I_2(\lambda) + 2\sqrt{I_1(\lambda)I_2(\lambda)} \cos\left(\frac{2\pi\text{OPD}(T)}{\lambda}\right) + \varphi_0 \quad (1)$$

式中: $I_1(\lambda)$ 和 $I_2(\lambda)$ 分别为膜层两界面的反射光强; φ_0 为初始相位。从公式(1)可以看出,反射光谱干涉条纹的频率取决于薄膜 F-P 腔的光程差(OPD),对于第 m 个干涉极大值有:

$$2\pi\text{OPD}(T)/\lambda + \varphi_0 = 2m\pi \quad (2)$$

所以有:

$$\lambda_m(T) = \frac{\text{OPD}(T)}{m - \frac{\varphi_0}{2\pi}} \quad (3)$$

而

$$\text{OPD}(T) = 2n(T)d(T) \quad (4)$$

式中: n 为薄膜层的折射率; d 为薄膜层的厚度。它们均是关于温度的函数。当环境温度发生改变时(从 T_0 变化到 T),薄膜腔的光程差(OPD)会随之发生变化:

$$\frac{\text{OPD}(T)}{\text{OPD}(T_0)} = \frac{2n(T)d(T)}{2n(T_0)d(T_0)} \approx 1 + (\alpha_n + \alpha_d)(T - T_0) \quad (5)$$

式中: α_n 和 α_d 分别为膜层材料的一阶热光系数和热膨胀系数。传感探头干涉光谱随温度变化的特征波长相对变化量为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_m(T) - \lambda_m(T_0)}{\lambda_m(T_0)} = \frac{2n(T)d(T) - 2n(T_0)d(T_0)}{2n(T_0)d(T_0)} \quad (6)$$

可见,由于薄膜材料自身的热光特性和热膨胀特性,当温度变化时,膜层的折射率 n 和厚度 d 都会随着温度的变化而变化,表现为反射光谱会随着温度的变化而产生波长的漂移。因此,通过对反射光谱干涉条纹的波长漂移量进行标定测量,即可得到相对应的温度。

2 光纤温度敏感探头的设计及镀制

在光纤端面沉积介质薄膜形成 F-P 腔, 薄膜材料的选取非常重要, 除了需要综合考虑材料的透明度、吸收和散射性、折射率、机械牢固度及材料的化学稳定性以外, 尤其需要关注其各项温度特性, 包括热膨胀系数、热光系数等, 所使用的介质材料需要有相近的热膨胀系数以避免膜层断裂损坏^[14]。通过综合考虑, 选取 ZrO_2 和 Al_2O_3 两种介质材料, 其热膨胀特性如图 2 所示。

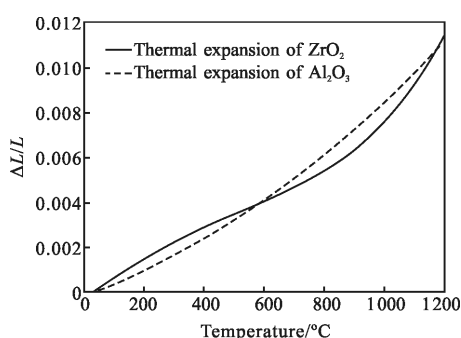


图 2 ZrO_2 和 Al_2O_3 的热膨胀特性

Fig.2 Thermal expansion property of ZrO_2 and Al_2O_3

采用 TFCalc 膜系设计软件设计光纤敏感探头的膜系如下:

$$\text{Fiber} | ZrO_2 - 68 \text{ nm} / Al_2O_3 - 1432 \text{ nm} / ZrO_2 - 68 \text{ nm} | \text{Air}$$

为了降低成本, 选用普通多模光纤 (62.5 μm /125 μm), 取光纤长度大约 80 cm, 用光纤剥线钳剥去镀膜端约 1 cm 长的涂覆层, 将其端面用光纤切割刀切平, 再用去离子水、无水乙醇、丙酮和去离子水按顺序将光纤端面超声清洗 10 min。蒸镀设备采用中国成都南光机械有限公司生产的 ZZS1100-8/G 箱式真空镀膜系统, 清洁后的光纤用高温胶通过夹具固定在镀膜系统的旋转基底上, 保证待蒸镀的光纤端面与旋转基底垂直朝向真空腔内。放入镀件后抽真空至 8.0×10^{-4} Pa 开始按照设计膜系自动镀膜。该真空系统使用 E 型 270 偏转束流电子枪蒸发介质膜料, 采用美国 MAXTEK 公司生产的 SQC-310 型石英晶体膜层监控系统准确监控膜层物理厚度, 辅助霍尔离子源提高膜层致密度。镀膜烘烤温度为 200 $^{\circ}\text{C}$, 镀膜过程充氧气, 充氧流量为 35 sccm, 充氧后腔体真空度为 1.0×10^{-2} Pa, ZrO_2 和 Al_2O_3 材料的蒸发速率分

别为 0.25、0.35 nm/s。

为了稳定薄膜干涉温度敏感探头, 在进行温度测试前, 需要进行退火处理。将镀制的探头放入高温炉中, 第一轮退火从常温以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温到 400 $^{\circ}\text{C}$ 保持 4 h 后自然冷却降至室温; 第二轮从常温以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温到 600 $^{\circ}\text{C}$ 保持 4 h 后自然冷却降至室温。

3 光纤温度传感器的测试

薄膜干涉型光纤温度传感器测试系统如图 3 所示, 测试系统的光源为卤钨灯宽带光源, 发光范围为 400~2 000 nm, 耦合器 (OC) 采用的是分光比为 50:50 多模光纤耦合器, 光谱仪为杭州赛曼科技有限公司的 S3000-UV-NIR 型小型光谱仪, 波长范围为 200~1 050 nm, 波长分辨率为 0.3 nm, 高温装置为合肥科晶材料技术有限公司生产的 GSL1600 真空管式高温烧结炉, 控温精度为 1 $^{\circ}\text{C}$ 。

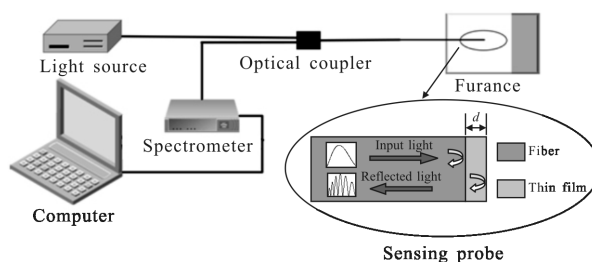


图 3 薄膜干涉温度传感器测试系统

Fig.3 Optical inspection system for the thin film interference temperature sensors

经两轮退火后, 薄膜干涉型光纤温度传感器的反射光谱随温度变化的测试结果如图 4 所示, 为了便于观察, 放大 560 nm 附近波谷 A 的光谱如图 5 所示。

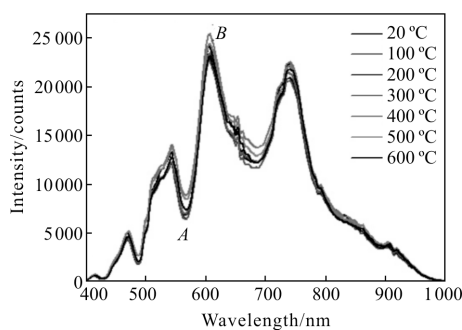


图 4 不同温度下温度传感器的反射光谱测试曲线

Fig.4 Reflection spectrum of the temperature sensor at different temperatures

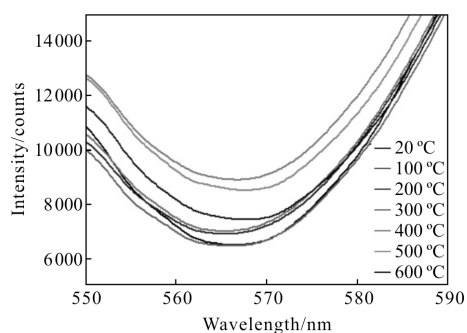


图 5 波谷 A 放大的反射光谱

Fig.5 Enlarged reflection spectrum at wave trough A

由图 5 可知,从 200 °C 开始,随着温度的升高,光谱的波长逐渐向长波方向漂移。采用峰-谷波长监控数据处理方法,将测试光谱波谷 A 和波峰 B 作为特征点,在 200~600 °C 温度范围内,所有特征点的波长漂移情况进行监控取平均,其平均波长相对变化量随温度变化的测试数据及其线性拟合直线如图 6 所示,拟合直线的线性相似度达到 99.7%。由图中的拟合直线可得出:该薄膜干涉型光纤温度传感器在 200~600 °C 温度范围内的温度灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\lambda \cdot \Delta T} = \frac{0.003349}{600 - 200} = 8.37 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (7)$$

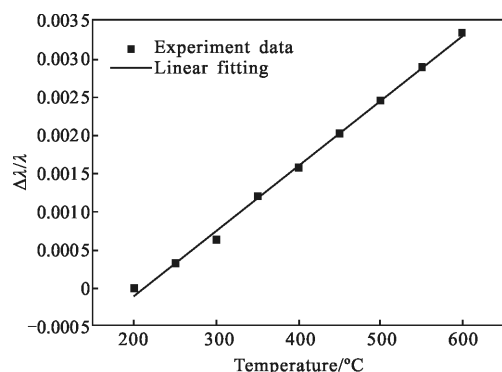


图 6 不同温度下波长相对变化量的线性拟合

Fig.6 Linear fitting of relative wavelength shift at different temperatures

在参考文献[13]中采用蓝宝石光纤制作的温度传感器,灵敏度为 $1.26 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,对比可以发现,二者灵敏度性能区别不大,但蓝宝石光纤加工工艺复杂,材料较昂贵,使用成本高。

4 结论

在对介质薄膜材料的热光特性和热膨胀特性分

析的基础上,通过南光 ZZS1100-8/G 箱式真空镀膜系统采用电子束蒸发技术,在普通多模光纤端面设计并镀制 $\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 三层纳米量级的介质薄膜,形成 Fabry-Perot 薄膜干涉型光纤温度传感器,在 200~600 °C 的温度范围内,该温度传感器的光谱随温度升高向长波方向漂移,且波长漂移的温度变化特性为线性,线性相关系数为 99.7%,灵敏度为 $8.37 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。该薄膜干涉型光纤温度传感器采用普通多模光纤,易于组建传感网络,结构简单,不需要复杂的微加工工艺,可批量生产,成本低,光纤敏感探头的尺寸即为光纤自身的尺寸,体积小,结构非常紧凑,适合在安装位置狭小或对传感器集成化要求较高的场合。

参考文献:

- [1] Jun He, Liao Changrui, Yang Kaiming, et al. High-sensitivity temperature sensor based on a coated single-mode fiber loop [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (19): 4019-4026.
- [2] Jinesh Mathew, Oliver Schneller, Dimitrios Polyzos, et al. In-fiber fabry-perot cavity sensor for high-temperature applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (12): 2419-2425.
- [3] Trung D Vo, He Jiakun, Eric Magi, et al. Chalcogenide fiber-based distributed temperature sensor with sub-centimeter spatial resolution and enhanced accuracy [J]. Optics Express, 2014, 22(2): 1560-1568.
- [4] Liu Tao, Zhang Wenping, Chen Huifang, et al. Reduction of system noise in distributed optical fiber Raman temperature sensor by Kalman filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1643-1647. (in Chinese)
刘涛, 张文平, 陈慧芳, 等. 卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1643-1647.
- [5] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement [J]. Chinese Optics, 2015, 8(4): 629-635. (in Chinese)
徐宁, 戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 629-635.
- [6] Li Yuhua, Yang Minwei, Liao Changrui, et al. Prestressed fiber bragg grating with high temperature stability [J]. IEEE Journal Light-wave Technology, 2011, 29(10): 1555-1559.
- [7] Jiang Shanchao, Sui Qingmei, Wang Jing, et al. FBG turbine

- flow rate sensor for acquiring flow rate and temperature simultaneously [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2611-2616. (in Chinese)
- 蒋善超, 隋青美, 王静, 等. 流速/温度共采的光纤布拉格光栅涡轮流速传感器 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2611-2616.
- [8] Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
- [9] Li Lijing, Wang Ying, Yang Hui, et al. Control of temperature dynamic characteristics of SFS light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 539-546. (in Chinese)
- 李立京, 王颖, 杨慧, 等. 超荧光光源温度动态特性的分析及控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 539-546.
- [10] Huang Chujia, Lee Dongwen, Dai Jixiang, et al. Fabrication of high-temperature sensor based on dielectric multilayer film on Sapphire fiber tip [J]. *Sensors and Actuators*, 2015, A232: 99-102.
- [11] Lee Dongwen, Tian Zhipeng, Dai Jixiang, et al. Sapphire fiber high-temperature tip sensor with multilayer coating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(7): 741-743.
- [12] Wang Siyuan, Lou Shuqin, Liang Sheng, et al. Pattern recognition method of fiber distributed disturbance sensing system based on M-Z interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2613-2618. (in Chinese)
- 王思远, 娄淑琴, 梁生, 等. M-Z 干涉仪型光纤分布式扰动传感系统模式识别方法 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2613-2618.
- [13] Wang Jiajun, Evan M Lally, Wang Xiaoping, et al. ZrO₂ thin-film-based sapphire fiber temperature sensor [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2129-2134.
- [14] Dominik Martin, Matthias Grube, Wenke Weinreich. Macroscopic and microscopic electrical characterizations of high -k ZrO₂ and ZrO₂/Al₂O₃/ZrO₂ metal-insulator-metal structures [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 2011, B29: 01AC02.