

文章编号: 0258-7025(2005)02-0228-04

# 基于 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤 温度传感器

张桂菊, 于清旭, 宋世德

(大连理工大学物理系, 辽宁 大连 116024)

**摘要** 介绍了一种基于非本征 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器。宽谱光源发光二极管(LED)发出的光经过  $2 \times 2$  耦合器  $C_1$  传给 F-P 传感头, 传感头返回光信号再次经过耦合器  $C_1$  及  $C_2$  后分成两路, 一路直接传给光电探测器  $D_1$ , 另一路经过窄带滤光片再传给  $D_2$ , 光信号经光电转换及放大后由计算机采集处理。给出了采用不同谱宽的两路光信号进行自补偿运算和温度测量的理论模型, 并简单分析了影响这一温度传感器长期稳定性的原因。实验中利用 Levenberg-Marquardt 非线性拟合得到与理论模型符合很好的温度定标曲线。该传感器在  $20 \sim 200^\circ\text{C}$  量程内, 温度变化最小分辨率达到  $0.1^\circ\text{C}$ , 长期测量精度达到  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

**关键词** 光纤光学; 光纤温度传感器; F-P 腔; 干涉/强度调制; 自补偿

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

## Fiber Optic Temperature Sensor Based on F-P Cavity Interferometric/Intensity Modulation Mechanism

ZHANG Gui-ju, YU Qing-xu, SONG Shi-de

(Physics Department, Dalian University of Polytechny, Dalian, Liaoning, 116024, China)

**Abstract** A fiber optic temperature sensor based on extrinsic Fabry-Perot (F-P) cavity interferometric/intensity modulation mechanism is described. The light from a light-emitting diode (LED) is coupled into a  $2 \times 2$  multimode fiber coupler  $C_1$  and propagates to the F-P sensor head. The light reflected from the F-P cavity is recoupled into  $C_1$ , and then through another fiber coupler  $C_2$  the light is divided into two beams. One propagates to optoelectronic detector  $D_1$  and another through narrow filter propagates to detector  $D_2$ . The two signals are transported to the computer through the optoelectronic conversion and amplifier circuit. A theoretical model for the temperature calculation and self-compensation has been worked out, which gives out the compensated intensity expression on the F-P cavity length, spectral width of the light source and band pass filter. The temperature calibration curve was obtained by fitting the experiment data to the theoretical model with Levenberg-Marquardt algorithm. A minimum temperature resolution of  $0.1^\circ\text{C}$  and long term accuracy of  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  were obtained over a temperature measurement range of  $20 \sim 200^\circ\text{C}$ .

**Key words** fiber optics; fiber optic temperature sensor; F-P cavity; interferometric/intensity modulation; self-compensation

### 1 引 言

光纤温度传感器具有抗电磁干扰、电绝缘性能

好等优点, 适用于传统温度传感器难以胜任的某些恶劣环境下的温度测量。近十年来, 各种类型的光纤温度传感器相继出现<sup>[1~3]</sup>, 但多数存在着结构复

收稿日期: 2003-11-10; 收到修改稿日期: 2004-08-30

基金项目: 国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金(60028505)资助项目。

作者简介: 张桂菊(1977—), 女, 江西上饶人, 大连理工大学物理系应用物理所光学工程专业博士研究生, 主要从事光纤传感器与光电器件方面的研究。E-mail: peterssd@student.dlut.edu.cn

杂、测量精度低、易产生长期漂移等问题,难以满足实际应用的要求。

基于非本征 F-P 干涉仪的白光干涉型光纤温度传感器研究近年来有实质性的进展,能够达到很高的测量分辨率和精度<sup>[4]</sup>,但其复杂的波长解调装置使得系统的制造成本十分昂贵。本文从实际应用需要出发,设计研制了一种基于非本征 F-P 腔的干涉与强度调制结合型光纤温度传感器,对该传感器的信号解调和自补偿机理进行了深入的研究。

## 2 系统组成与工作原理

### 2.1 系统组成

基于 F-P 腔的干涉/强度型光纤温度传感器系统如图 1 所示。系统由四部分组成:宽谱发光二极管(LED)光源及其恒温、恒流控制电路,PIN 光电探测放大电路和计算机信号采集处理系统,传光光路及感知温度信号的微型 F-P 传感头。光源发出的光经过  $2 \times 2$  耦合器  $C_1$  和 200 m 长的光纤传给 F-P 腔传感头,由传感头反射回的信号再次经过  $C_1$  后传至  $2 \times 2$  耦合器  $C_2$ , $C_2$  两路输出中的一路直接送给探测器  $D_1$ ,另一路经过一窄带滤光片后送到探测器  $D_2$ ,光信号经  $D_1$ , $D_2$  转换放大后由计算机采集处理。传感头采用非本征型 F-P 腔结构,利用激光微加工技术将两根多模光纤与石英毛细管熔接在一起,两根光纤的垂直端面 and 空气隙形成 F-P 腔。系统采用发光二极管作为宽谱光源,其中心波长为 850 nm,半峰全宽(FWHM)约 50 nm,最大输出功率约  $100 \mu\text{W}$ 。图中干涉滤光片中心波长与光源相匹配,输出光谱宽约 8 nm。

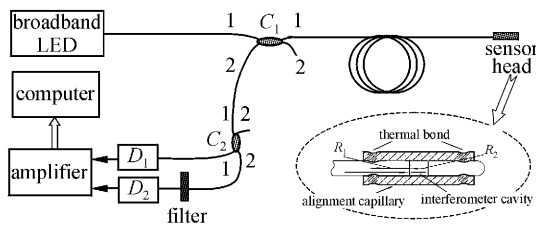


图 1 基于 F-P 腔的干涉/强度型光纤温度传感器系统  
Fig. 1 Schematic diagram of the interferometric/intensity-based F-P temperature sensing system

### 2.2 温度测量和自补偿原理

微型 F-P 腔干涉/强度调制型光纤温度传感器的基本工作原理为:1) 由于构成 F-P 腔传感头的光纤与毛细管的热膨胀系数不同,传感头感受到的温

度与 F-P 腔的空隙长度  $d$  有一定的对应关系。如果温度的改变使得  $d$  的变化范围在多光束干涉强度变化的一个极大值和极小值之间,则温度与干涉强度之间有一一对应关系。2) 利用两束不同干涉特性的光在传感头温度改变时的不同响应特性和相似的传输特性,进行自补偿运算,消除光纤传输损耗和光源功率变化对温度测量的影响。由图 1 可以看出,传感信号来自于 F-P 腔多光束干涉的反射光,由于入射光在石英玻璃光纤端面上的菲涅耳反射率仅为 3.5%,可以将多光束干涉近似为双光束干涉<sup>[5]</sup>,如图 2 所示,对于光功率为  $I_i = P(\lambda)$  的入射光,由 F-P 腔反射回的光强  $I_r$  为

$$I_r = 2R \int_{\lambda} P(\lambda) M_{11} 10^{-\alpha(\lambda)L} (1 - \cos\delta) d\lambda, \quad (1)$$

其中  $\delta = 4\pi nd/\lambda$ ,为产生干涉的相邻光束的相位差, $d$  为 F-P 腔长度,取空气折射率  $n = 1$ , $R$  为光纤端面的反射率; $L$  为耦合器  $C_1$  到传感头的光纤长度, $\alpha(\lambda)$  为光纤的损耗系数; $M_{11}$  为耦合器  $C_1$  由入射端 1 到出射端 1 的分光比,在光源光谱范围内,可认为耦合器的分光比与波长无关。发光二极管发光属于自发辐射,光谱的线型近似于高斯型,其输出功率按频率分布可表示为

$$P(\omega) = P_0 \exp[-(\omega - \omega_0)^2/B^2], \quad (2)$$

其中  $B = \gamma/(2\sqrt{\ln 2})$ ,圆频率  $\omega = 2\pi c/\lambda$ , $\omega_0$  为中心频率。对于谱宽为  $\Delta\lambda$  的输入光,半峰全宽  $\gamma = 2\pi c \Delta\lambda/(\lambda_0^2 - \Delta\lambda^2)$ 。

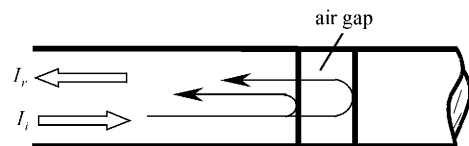


图 2 光纤 F-P 腔模型  
Fig. 2 Scheme of the fiber F-P cavity

耦合器  $C_2$  的其中一路光经过一窄带滤光片到达探测器  $D_2$ ,滤光片的透过光谱呈高斯型分布,峰值透过率为  $F$ ;半峰全宽为  $\gamma_1$ 。引入  $\eta_1, \eta_2$  分别为探测器  $D_1$  和  $D_2$  的光电响应率与对应信号放大率的乘积。由于光纤损耗系数以及光电探测器响应在光源光谱范围内是波长的缓变函数,可作为常量处理。由此可以得到宽谱通道  $V_1$  和窄谱通道  $V_2$  两路电压信号分别为

$$V_1 = 2RP_0 \int_{\omega} \exp[-(\omega - \omega_0)^2/B^2] 10^{-2\alpha(\omega_0)L} \times M_{11} M_{12} N_{11} \eta_1 [1 - \cos(2\omega d/c)] d\omega, \quad (3)$$

$$V_2 = 2RP_0 \int_{\omega} F \exp[-(\omega - \omega_0)^2/B_2^2] 10^{-2\alpha(\omega_0)L} \times$$

$$M_{11}M_{12}N_{12}\eta_2[1 - \cos(2\omega d/c)]d\omega, \quad (4)$$

式中  $B_2^2 = \left(\frac{B_1^2 B^2}{B_1^2 + B^2}\right)$ ,  $B_1 = \gamma_1 / (2\sqrt{\ln 2})$ ;  $M_{12}$ ,  $N_{11}$  和  $N_{12}$  分别指光由传输光纤经  $C_1$  耦合回到 2 端的分光比以及  $C_2$  耦合器 1 端分别到输出端 1 和 2 的分光比。

计算(3), (4) 两式的积分, 得到两路电压信号的表达式

$$V_1 = V_1' \left[ 1 - \exp(-p^2) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda_0}\right) \right], \quad (5)$$

$$V_2 = V_2' \left[ 1 - \exp(-q^2) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda_0}\right) \right], \quad (6)$$

其中

$$V_1' = 2B\sqrt{\pi}RP_0 10^{-2\alpha(\omega_0)L} M_{11}M_{12}N_{11}\eta_1(\omega_0), \quad (7)$$

$$V_2' = 2B_2\sqrt{\pi}FRP_0 10^{-2\alpha(\omega_0)L} M_{11}M_{12}N_{12}\eta_2(\omega_0), \quad (8)$$

$$p^2 = \frac{d^2 \pi^2 \Delta\lambda^2}{\ln 2 (\lambda_0^2 - \Delta\lambda^2)^2}, \quad (9)$$

$$q^2 = \frac{d^2 \pi^2 \Delta\lambda_2^2}{\ln 2 \lambda_0^4}, \quad (10)$$

式中  $\Delta\lambda_2$  是由  $\gamma_1$  和  $\gamma$  决定的折合宽度。由此可以看出, 两路信号随 F-P 腔长  $d$  正弦变化的振幅的增加按平方指数衰减。图 3(a), (b) 分别给出了按(5), (6)式得到的干涉理论计算曲线。

为了对光源功率变化和光纤传输损耗变化进行自补偿, 取(5), (6)两式相除

$$R_a = \frac{V_2}{V_1} = k \frac{\left[ 1 - \exp(-q^2) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda_0}\right) \right]}{\left[ 1 - \exp(-p^2) \cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda_0}\right) \right]}, \quad (11)$$

式中  $k$  为与光源功率及光纤损耗无关的常数, 图 3

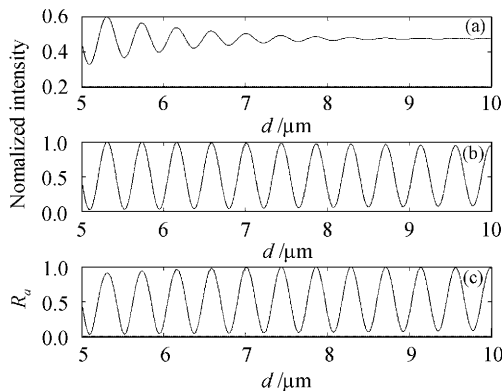


图 3 两路干涉光强及其比值的理论图像

Fig. 3 Normalized intensity and intensity ratio variation with F-P cavity length  $d$

(a)  $\Delta\lambda = 50$  nm; (b)  $\Delta\lambda_2 = 8$  nm; (c) normalized  $R_a$

(c)给出(11)式的理论计算图像, 由图中可以看到, 只要选取适当的初始 F-P 腔长, 宽谱信号的干涉现象就会趋于消失, 此时, 宽谱信号与窄谱信号的比值可以简洁地表示成余弦函数

$$R_a = k_1 + k_2 \cos(k_3 T + k_4), \quad (12)$$

其中  $(k_3 T + k_4)$  为传感头感应外界温度变化导致的相位差,  $k_4$  为初相位, 由初始腔长决定。

常数  $k_1, k_2$  取决于光源的中心波长、光源与滤光片的谱宽、耦合器的分光比等参数, 这些参数的微小漂移问题可以通过选择低温漂器件或者采取恒温控制解决(恒温控制器件与电路控制部分同做一个机箱内, 作为二次仪表);  $k_3, k_4$  不仅与光源的中心波长有关, 还取决于 F-P 腔初始腔长及其准直毛细管的热膨胀系数、激光熔接长度等参数, 当中心波长一定、传感头制作完成后, 系数  $k_3, k_4$  就是确定的。显然,  $R_a$  不受光源功率和光纤损耗变化的影响。系数值通过实验来标定, 利用 Levenberg-Marquardt 非线性拟合求得。

由式(12)可见, 强度比值  $R_a$  是温度  $T$  的余弦函数, 只要  $d$  随温度变化在  $R_a$  变化的一个极大值和极小值之间,  $R_a$  和  $T$  就有唯一的对应关系, 因而可以实现温度的绝对测量。在传感头制作过程中, 精确控制 F-P 腔长度和毛细管熔接点间的长度, 可以得到不同测量范围和灵敏度的温度传感器。

图 4 给出了测温量程为室温到约 200°C 的  $R_a$ - $T$  标定曲线以及非线性拟合得到的系数。

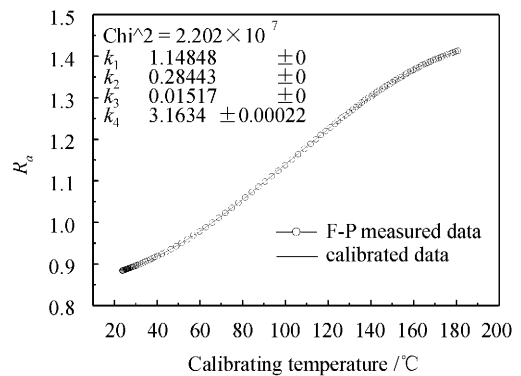


图 4 传感器温度标定曲线

Fig. 4 Temperature calibrating curve of sensor

### 3 实验结果和分析

解调方法和自补偿计算机理可以在很大程度上抑制光源功率和光纤损耗变化对温度测量结果的影响, 图 5 给出了改变光纤传输损耗, 从而改变信号强度的情况下, 测得的宽、窄谱信号比值  $R_a$ 。由图可见

当信号下降到初始强度的一半时,  $R_a$  的变化小于 0.06%。

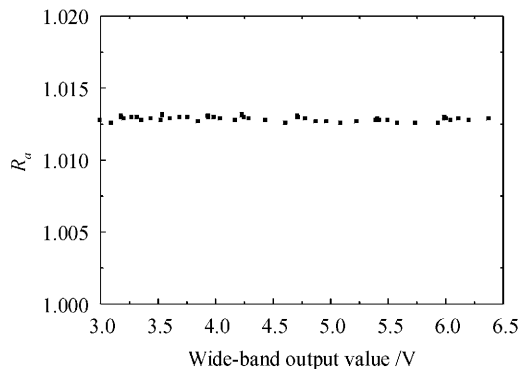


图 5 比值随光纤弯曲损耗变化曲线

Fig. 5 Plot of the system output  $R_a$  as fiber loss was changed through bending of input fiber

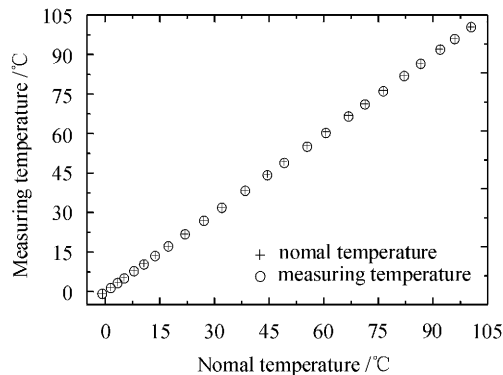


图 6 光纤 F-P 腔传感器与电传感器温度测量比较

Fig. 6 Comparison of F-P sensor results with Pt100 sensor results

实际上,影响传感器长期测量精度的主要因素是发光二极管光源中心波长的漂移。当发光二极管的驱动电流和环境温度变化时,其光谱分布和中心波长将产生漂移;实验结果表明,发光二极管结温上升时,谱带中心波长以  $0.2 \sim 0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  的比例向长波方向移动。由前面的分析可以看出,光源的中心波长和光谱宽度的改变将使公式(12)中的标定系数改变,直接影响传感器的长期测量精度。因此该传感器系统对发光二极管进行了高精度的恒温恒流控制,电流长期稳定度为  $\pm 0.02 \text{ mA}$ ,温度控制精度达到  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。

传感器系统的温度测量范围和分辨率主要取决于微型 F-P 传感头的激光熔接间距及 F-P 腔间隙初始位置  $d_0$  的选择,通过选取不同的参数,在实验

中制作出  $-20 \sim 180^\circ\text{C}$ ,  $20 \sim 200^\circ\text{C}$ ,  $100 \sim 300^\circ\text{C}$  等不同测温范围的传感器,温度测量分辨率达到  $0.1^\circ\text{C}$ 。经过准确定标后的温度传感器在测温过程中显示出良好的温度测量重复性和稳定性。图 6 给出了该传感器经定标后,温度测量值与标准铂电阻 Pt100 温度测量值的比较曲线,横坐标记录的是 Pt100 的测量结果,纵坐标是光纤 F-P 传感器测量值,结果表明在全量程范围内温度测量偏差仅为  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。

实验中还对该系统进行了一周以上的长期稳定性考核,结果表明该系统长期温度测量精度达到  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。

## 4 结 论

对基于非本征 F-P 腔干涉/强度调制机理的光纤温度传感器进行了理论和实验研究。该传感器具有解调方法简单,对光源功率和光纤损耗变化能够自补偿的优点。利用激光熔接的 F-P 传感头结构小巧、温度测量重复性好、长期稳定性好。实验表明,在温度测量范围为  $20 \sim 200^\circ\text{C}$  时,测量分辨率达到  $0.1^\circ\text{C}$ ,长期测量精度达到  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。由于该传感器的小巧、耐高温、高精度和抗干扰的特点,在诸如深油井下、大型电力装置等特殊环境的温度测量中将有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Anbo Wang, George Z. Wang, Kent A. Murphy *et al.*. Fiber-optic temperature sensors based on differential transmittance/reflectivity and multiplexed sensing systems [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13):2295~2300
- 2 Jin Xiaodan, Liao Yanbiao, Lai Shurong *et al.*. An optical fiber temperature sensor system based on the birefringent effect with high accuracy and compensation function [J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(5):465~469  
金晓丹,廖延彪,赖淑蓉等. 一种高精度补偿式双折射型光纤温度传感系统[J]. *中国激光*, 1996, **A23**(5):465~469
- 3 Zhao Yong, Rong Min, Liao Yanbiao. Reflex optical fiber sensor and compensation technique for temperature measurement under offshore oil well [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):75~78  
赵勇,荣民,廖延彪. 用于海洋井下温度检测的反射式光纤传感器及补偿技术[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):75~78
- 4 T. Liu, G. F. Fernando, Z. Y. Zhang *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurements in composites using extrinsic Fabry-Perot interferometric and intrinsic rare-earth doped fiber sensors [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, **80**:208~215
- 5 K. T. V. Grattan, B. T. Meggitt. *Optical Fiber Sensor Technology (Fundamentals)* [M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2000. 175~176