

DOI: 10.12086/oe.2019.180506

调频连续波激光干涉光纤 温度传感器

王欢, 郑刚*, 陈海滨, 张雄星

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710072

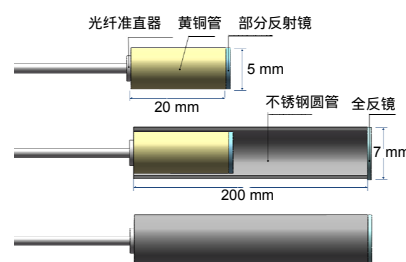
摘要: 本文提出了一种调频连续波激光干涉非本征型法珀腔光纤温度传感器。使用具有较高热膨胀系数的不锈钢圆管封装法珀腔制成温度传感探头。不锈钢圆管作为法珀腔腔体的同时也是温度敏感元件。通过调频连续波干涉测量技术测量法珀腔因受热膨胀所产生的腔长变化量,实现对温度的传感。实验结果表明,该光纤温度传感器测温分辨率达到了 $0.0002\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度测量灵敏度可达 $3022\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。此温度传感器不仅具有较高的灵敏度与分辨率,且结构简单稳定,具有良好的应用前景。

关键词: 光纤传感器; 法布里-珀罗干涉仪; 调频连续波干涉; 温度传感器探头

中图分类号: TN247

文献标志码: A

引用格式: 王欢, 郑刚, 陈海滨, 等. 调频连续波激光干涉光纤温度传感器[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180506



Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor

Wang Huan, Zheng Gang*, Chen Haibin, Zhang Xiongxing

College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

Abstract: This paper presents an extrinsic Fabry-Perot (F-P) cavity optical fiber temperature sensor, which is based on the frequency-modulated continuous-wave laser interference. The temperature sensing probe is fabricated by a stainless-steel tube with high coefficient of thermal expansion to encapsulate the F-P cavity. Stainless steel tube is used as the F-P cavity and also the temperature sensitive component. The variation of cavity length caused by thermal expansion of F-P cavity is measured by frequency-modulated continuous-wave interferometric measurement technique. The experimental results show that the temperature measurement resolution of the fiber temperature sensor reached $0.0002\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the temperature measurement sensitivity reached $3022\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$. The temperature sensor not only has high sensitivity and resolution, but also has a simple and stable structure and a good application prospect.

Keywords: optical fiber sensor; Fabry-Perot interferometer; frequency-modulated continuous wave interference; temperature sensor probe

Citation: Wang H, Zheng G, Chen H B, *et al.* Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180506

收稿日期: 2018-09-28; 收到修改稿日期: 2018-11-26

基金项目: 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室开放基金资助项目(2015SZSJ-60-3)

作者简介: 王欢(1993-), 男, 硕士, 主要从事光电检测与光纤传感的研究。E-mail: 314887833@qq.com

通信作者: 郑刚(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测与光纤传感的研究。E-mail: zhengg@xatu.edu.cn

1 引言

温度测量在日常生活、工业生产和生物医学等诸多领域起着重要的作用。相对于传统的温度传感器，光纤温度传感器由于具有灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰、超高压绝缘、阻燃防爆等优点，受到了人们的广泛关注。现有的光纤温度传感器包括光纤光栅型温度传感器^[1-2]、光纤波长型温度传感器^[3]、光纤强度型温度传感器、光纤偏振态型温度传感器^[4]和光纤干涉型温度传感器等。光纤光栅型温度传感器温度传感探头制作工艺复杂，且对解调技术的要求较为苛刻，解调成本较高。光纤波长型温度传感器、光纤强度型温度传感器和光纤偏振态型温度传感器的测量精度相对较低，而光纤干涉型温度传感器基于光波相位调制与检测机制实现温度传感，测量精度高。

在光纤干涉型温度传感器中，法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)光纤干涉温度传感器因其信号臂与参考臂同光路，F-P腔结构的温度探头容易制作等优点而发展迅速。各类F-P光纤干涉温度传感器的差异主要体现在温度传感探头与所采取的干涉测量技术。现有报道的F-P腔结构的温度探头的制作方法主要有以下几种。其一是使用聚焦的紫外激光束照射光纤的两个固定位置，使两处光纤的折射率发生变化，形成两个内在反射面构成F-P腔^[5]。其二是利用飞秒激光在光纤表面刻蚀一个凹槽，利用凹槽的两个端面作为反射面，构成F-P腔^[6]。其三是在光纤端面侵涂有机化合物，光纤端面与有机化合物的端面作为两个反射面构成F-P腔^[7]。其四是熔接两根光纤，利用光纤的熔接面与端面作为两个反射面构成F-P腔^[8]。可以看出，这些温度传感器传感探头普遍由光纤制成，光纤的热膨胀系数不高，其温度测量灵敏度尚待进一步优化。另外，由于光纤本身较为脆弱，尤其是在较高温度下，丧失涂覆层保护的光纤与空气接触会发生脆化，影响温度传感器的可靠性。而且这些温度传感器大都使用白光干涉测量技术对温度进行解调。白光干涉需要使用精密的光谱分析器件采集反射或者透射光谱，由光谱信息解算干涉光束光程差，其测温分辨率一般低于0.01℃，而且其测量范围有限、相对成本高。

本文使用具有较高热膨胀系数、化学性质相对稳定的不锈钢圆管封装F-P腔，使温度传感器的灵敏度达到了3022nm/℃，并且使温度传感器的稳定性得到了进一步增强。同时采用调频连续波干涉测量技术代替传统的白光干涉测量技术进行温度解调，避免了传

统解调方法对温度传感器分辨率与测量范围的制约，使温度传感器的测温分辨率达到了0.0002℃。

2 测温原理

调频连续波(Frequency-modulated continuous-wave, FMCW)干涉^[9-13]是一种新型的激光干涉测量技术。相对于传统的激光干涉测量技术，FMCW干涉测量所得干涉信号是动态信号(即时间连续函数)，其相位细分，分辨相位移动方向以及整周期计数更加容易。如图1所示，调频连续波(FMCW)激光器发出频率线性调制的激光，并通过尾纤耦合进入三端口光纤环形器。光纤环形器2端口出射光通过准直器准直为空间光束进入F-P腔。其中，部分反射镜的反射光为参考光，全反镜的反射光为信号光，两光波在第一个反射镜的反射面处发生干涉。干涉信号通过准直器重新耦合回光纤并由光纤环形器2端口入射，3端口出射至光电探测器，转换为电信号。由于第一个反射镜采用部分反射镜，很大程度减弱了光波在两个镜面之间多次反射所产生的合成波光强，因此两光波之间的干涉可近似为双光束干涉。

在光纤温度传感探头中，信号波与参考波之间的光程差(optical path difference, OPD, 用 φ_{OPD} 表示)为

$$\varphi_{OPD} = 2nl \quad (1)$$

其中： l 为F-P腔腔长； n 为F-P腔中填充介质的折射率，若F-P腔内为真空或者空气，则 $n=1$ 。

如果将F-P腔为空腔(非本征型)的光纤温度传感探头置于温度场中，温度传感探头腔体受热膨胀使两反射镜位置发生移动，造成信号波与参考波光程差发

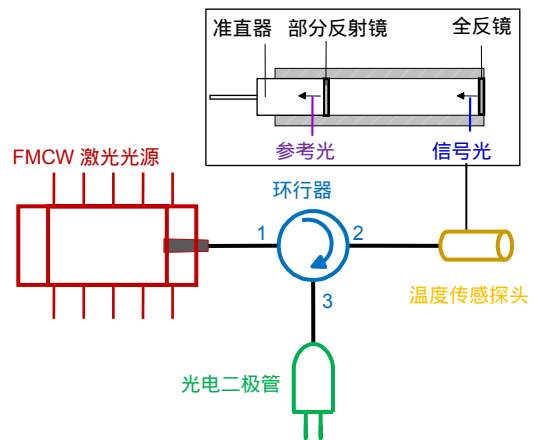


图1 调频连续波激光干涉光纤温度传感器光路原理简图

Fig. 1 Schematic of frequency-modulated continuous-wave laser interference fiber temperature sensor

生变化。光程差的变化量 $\Delta\varphi_{OPD}$ 可以写为

$$\Delta\varphi_{OPD}=2\Delta L=2l \cdot k \cdot \Delta T=2l \frac{\delta l}{l \cdot \delta T} \Delta T \quad (2)$$

其中： l 为 F-P 腔初始长度， ΔL 为 F-P 腔腔长变化量， ΔT 为温度的变化量， $k=\delta l/(l \cdot \delta T)$ 为 F-P 腔的热膨胀系数。由式(2)可得灵敏度计算公式为

$$\frac{\Delta L}{\Delta T}=lk \quad (3)$$

如果激光光源角频率调制波形为锯齿波，则波形如图 2 所示，其中实线为参考波角频率调制波形，虚线为信号波角频率调制波形。

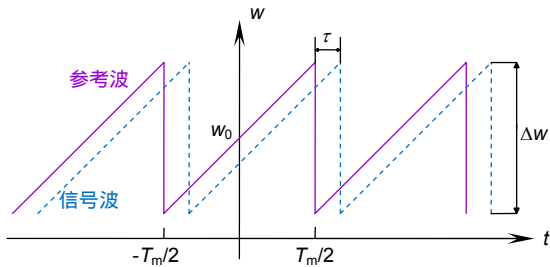


图 2 调频连续波激光频率调制波形

Fig. 2 Frequency modulating waveform of the frequency-modulation continuous-wave laser

参考波 $E_1(t)$ 与信号波 $E_2(t)$ 的波函数为

$$E_1(t)=E_{01} \exp\left(j\left(\frac{1}{2}\alpha t^2+w_0 t+\varphi_0\right)\right) \quad (4)$$

$$E_2(\tau,t)=E_{02} \exp\left(j\left(\frac{1}{2}\alpha(t-\tau)^2+w_0(t-\tau)+\varphi_0\right)\right) \quad (5)$$

其中： E_{01} 、 E_{02} 分别为参考波与信号波的电场振幅， $\tau=nd/c$ 为信号波相对与参考波的延迟时间， n 为光波传播介质折射率， d 为光源到被测点的距离， c 为光速， w_0 为调制中心位置的角频率， $\alpha=\Delta w/T_m$ 为角频率调制率， T_m 为调制信号周期， φ_0 为光源的初相位。

当参考波与信号波发生干涉时，干涉信号光强 $I(\tau, t)$ 可表示为

$$\begin{aligned} I(\tau, t) &= |E_1(t) + E_2(\tau, t)|^2 \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\alpha\tau t + \omega_0\tau) \\ &= I_0 [1 + V \cos(\alpha\tau t + \omega_0\tau)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中： $I_1 = E_{01}^2$ 、 $I_2 = E_{02}^2$ 分别为参考波与信号波的光强， $I_0 = I_1 + I_2$ 为干涉信号的平均光强， $V = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$ 为干涉信号的对比度。

由上式可以得出在一个调制周期内，参考波与信号波光程差 φ_{OPD} 之间的关系如下：

$$I(\varphi_{OPD}, t) = I_0 \left[1 + V \cos\left(\frac{2\pi \cdot \Delta v \cdot v_m \cdot \varphi_{OPD}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} \varphi_{OPD}\right) \right]$$

$$= I_0 \left[1 + V \cos(2\pi \cdot v_b \cdot t + \phi_{b0}) \right] \quad (7)$$

其中： v_b 为干涉拍频信号的频率， Δv 为光学频率调制范围， v_m 为调制信号的频率， c 为光速， ϕ_{b0} 为干涉拍频信号的初相位， λ_0 为光波的中心波长。显然：

$$v_b = \frac{\Delta v \cdot v_m \cdot \varphi_{OPD}}{c} \quad (8)$$

$$\phi_{b0} = \frac{2\pi \varphi_{OPD}}{\lambda_0} \quad (9)$$

结合式(2)与式(9)，可得初相位变化量与温度变化量 ΔT 的关系为

$$\Delta T = \frac{\lambda_0}{4\pi l} k^{-1} \Delta \phi_{b0} = \frac{1}{2l} k^{-1} \Delta \varphi_{OPD} \quad (10)$$

由式(10)看出，可以通过计算干涉信号的相移(初相位)计算出温度的变化量 ΔT 。

3 实验与分析

3.1 测温探头的制作

光纤温度传感器探头的制作过程主要分为两个步骤。首先将一个单模光纤准直器插入一个有一定壁厚的黄铜管中固定，然后在黄铜管的另一个端面粘接一个部分反射镜，该镜面与光纤准直器输出光的光轴严格垂直，如图 3(a)所示。再将该结构整体插入不锈钢管中固定，并在不锈钢管的另一端粘接一个与部分反射镜严格平行的全反射镜，两个反射镜构成一个非本征 F-P 腔，如图 3(b)所示。最终制成的温度传感探头如图 3(c)所示。

在本次实验中，部分反射镜的反射率为百分之二十。分别选用长度为 100 mm 与 200 mm(F-P 腔长度分别为 80 mm 与 180 mm)的 304 型不锈钢管作为 F-P 腔腔体，并使用高粘接强度的 AB 胶对各个部件进行粘接，制成温度传感探头，实物图如图 4 所示。温度传感探头结合调频连续波光纤法布里-珀罗干涉仪构成调频连续波激光干涉光纤温度传感器。

3.2 实验测试与结果分析

调频连续波干涉光纤温度传感器主要由光学系统、调制信号发生系统、信号采集与处理系统构成，原理图如图 5 所示。其中，光学系统基于光纤法珀干涉仪结构，激光光源采用中心波长为 1550.11 nm 的单模 DFB 半导体激光器。调制信号发生系统、信号采集与处理系统以 STM32F407 微处理器为核心，结合压控电流源电路、温控电路、光电二极管及放大滤波电路实现对单模 DFB 半导体激光器输出激光频率的线性调制、动态拍频干涉信号的采集与处理。

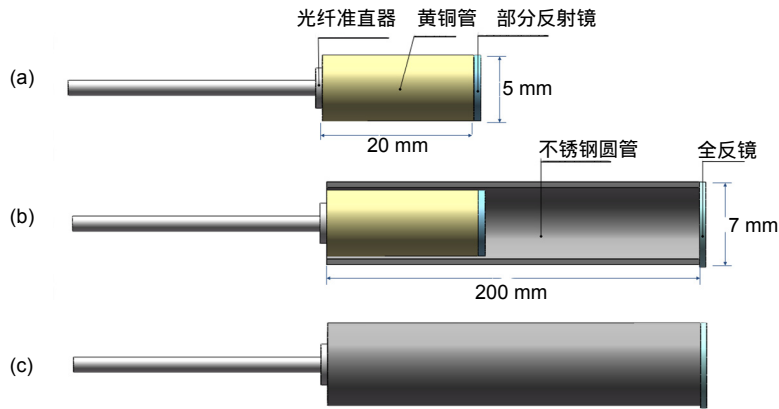


图 3 测温探头制作流程图。(a) 连接准直器与黄铜管并粘接部分反射镜；(b) 插入不锈钢管并粘接全反镜；(c) 温度探头

Fig. 3 Temperature probe production process. (a) The collimator is connected to the brass tube and bonded to the mirror; (b) Socket stainless steel tube and bond mirror; (c) Temperature probe

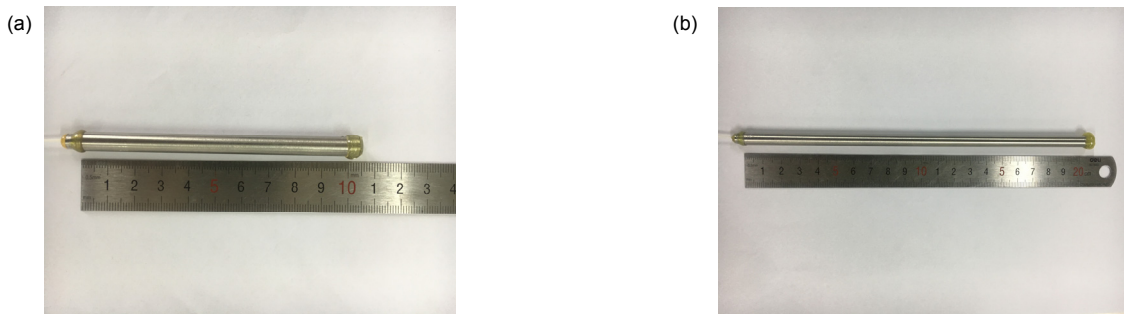


图 4 非本征光纤温度传感头实物照片。(a) 探头长度为 100 mm；(b) 探头长度为 200 mm

Fig. 4 A picture of the real extrinsic fiber temperature probe. (a) Probe length is 100 mm; (b) Probe length is 200 mm

在本次实验中,使用 STM32F407 芯片内置 DA 外设产生调制频率为 50 Hz 的锯齿波电压信号,如图 6 上部信号所示。实际情况下,如果对 DFB 半导体激光器光频率调制速率过快,会造成下一个调制周期光频率调制不稳定,所以锯齿波调制信号下降沿有一定的坡度。锯齿波电压信号经过压控电流源电路转化为电

流信号,驱动单模 DFB 半导体激光器发射光频率连续调制的激光。使用温控电路对单模 DFB 半导体激光器的温度进行控制,稳定 DFB 半导体激光器的工作状态与输出中心波长。光电二极管将动态干涉光信号转换为电信号,经过放大滤波电路进行放大滤波后,利用 STM32F407 芯片进行信号处理。图 6 中锯齿波的上升沿所对应的干涉信号为有用信号,通过数字鉴相算法解调出干涉信号的初相位,计算干涉信号的相移。并对相移进行累加得出整个测量过程中总的相移量,进而计算出整个测量过程的温度变化量。其下部为实验所得干涉信号波形图。

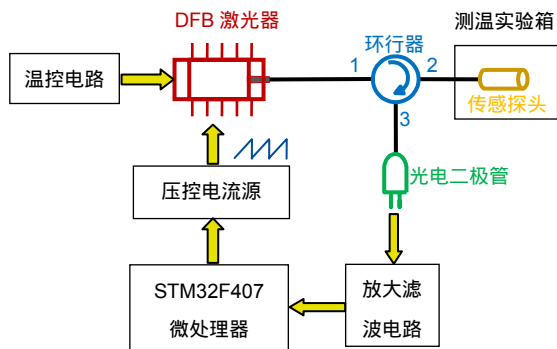


图 5 调频连续波干涉温度传感器原理框图

Fig. 5 Frequency modulated continuous wave laser interference temperature sensor

数字鉴相方法^[14]的流程图如图 7 所示,使用 STM32F407 微处理器 AD 外设对光电二极管输出的电压信号进行采样与模数转换得到数字信号。每个调制周期的采样点数为 5000 点,取 0~4500 点对应的信号为有用信号。寻找数字信号的波峰与波峰均值的位置,利用相邻波峰位置确定干涉信号的周期,波峰均值位置作为干涉信号相位特征点。通过计算相邻采样

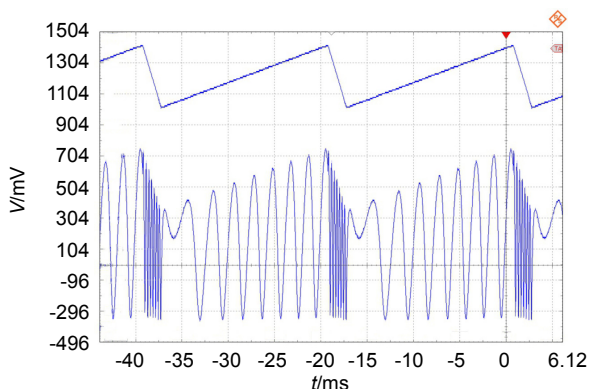


图6 实际锯齿波调制波形与干涉信号波形图

Fig. 6 Actual sawtooth modulation signal and interference signal waveform

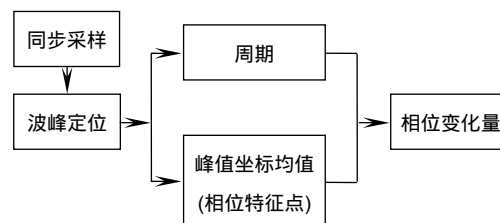


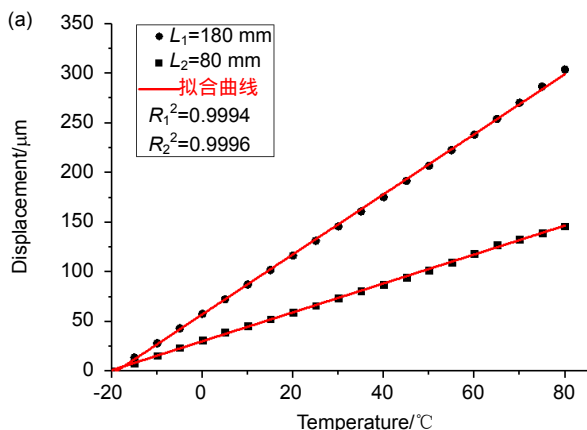
图7 鉴相算法流程图

Fig. 7 Phase discrimination algorithm flow chart

周期相位特征点的变化量除以周期，得到相邻调制周期的干涉信号初相位变化量。并对整个测量过程的初相位变化量进行累加，得到整个测量过程的相移，进而计算出整个测量过程的温度变化量。

将 F-P 腔腔长为 180 mm 与 80 mm 的测温探头置于高低温箱中，从 -20 °C~80 °C 持续加热，每升高 5 °C 记录一次 F-P 腔腔长的变化量，并对 F-P 腔腔长为 180 mm 测温探头在 -20 °C~80 °C 做重复往返实验，实验结果如图 8 所示。从图 8(a)可以看出，温度与腔长变化量成良好的线性比例关系。对实验数据进行线性拟合，可以得出法珀腔腔长为 180 mm 与 80 mm 的温度传感器的灵敏度分别为 3022 nm/°C 与 1455 nm/°C。两个腔长对应的灵敏度之间的比例关系约为 2.1，与两腔长的比例关系近似相等。从图 8(b)可以看出，四次测量曲线之间具有良好的重合度，说明此温度传感器具有良好的重复性。

将腔长为 80 mm 的测温探头置于恒温环境中(使用隔热保温材料包裹温度传感探头并置于恒温箱中)，



每隔 3 s 对 F-P 腔腔长变化量测量一次，测量时间共计 100 min，得到的腔长变化量随机误差及其分布如图 9 所示。

从图 9(b)可以看出，腔长变化量随机误差呈正态分布，且其标准差为 0.23 nm，说明温度传感器具有良好的稳定性。已知，F-P 腔腔长为 80 mm 的温度传感器的灵敏度为 1455 nm/°C。则可以得出，当 F-P 腔腔长变化 0.23 nm 时，温度变化约为 0.0002 °C，即温度传感器分辨率约为 0.0002 °C。误差主要来源于激光器噪声与 DFB 半导体激光器频率调制的非线性。

温度传感器的测温范围取决于温度传感探头所使用的材料，本温度传感器使用高粘接性的 AB 胶与高热膨胀系数的不锈钢管制成温度传感探头，AB 胶的熔点约为 90 °C，并且由图 8 可以看出，在 -20 °C~80 °C 内温度传感器具有良好的线性度，说明不锈钢圆管的热膨胀系数保持不变。综上所述，此温度传感器在 -20 °C~80 °C 范围内，具有良好的线性度、重复性、稳定性以及极高的灵敏度与分辨率。另外，如果使用高

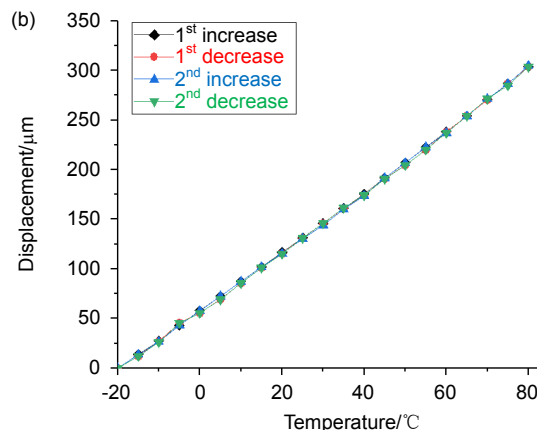


图8 腔长变化量与温度之间关系。(a) 拟合曲线; (b) 重复测量

Fig. 8 Relationship between cavity length change and temperature. (a) Fitting curve; (b) Repeated measurement

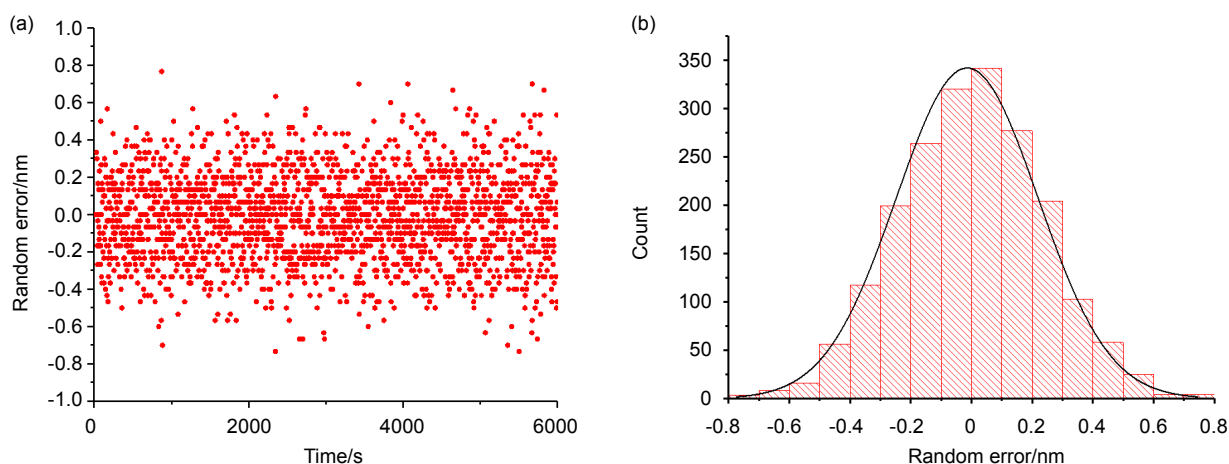


图9 恒温情况下腔长变化量随机误差及其分布。(a) 恒温情况下腔长变化量随机误差; (b) 随机误差分布图
 Fig. 9 Random error and its distribution of cavity length variation under fixed temperature. (a) Random error of cavity length variation under fixed temperature; (b) Random error distribution

熔点的胶水进行粘接，或用机械方法定位，可以大幅度提高温度传感器的测温范围。

4 结论

本文提出并实现了一种调频连续波激光干涉光纤温度传感器。使用具有较高热膨胀系数、化学性质相对稳定的不锈钢圆管作为 F-P 腔腔体，并在其内部与一端分别安装一个部分反射镜与一个全反镜，构成 F-P 腔。利用出射光光轴与 F-P 腔两镜面严格垂直的单模光纤准直器实现该腔与光纤的耦合，制成非本征型光纤 F-P 腔温度传感探头。通过调频连续波干涉测量技术测量 F-P 腔因受热膨胀所产生的腔长变化量，实现对温度的传感。实验结果表明，该温度传感器的测量分辨率可达 $0.0002\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。F-P 腔长度为 180 mm 与 80 mm 时，温度传感器的灵敏度分别为 $3022\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 与 $1455\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。可以看出，相对于现有的光纤温度传感器，此温度传感器的分辨率与灵敏度有了很大的提高。而且相对于光纤材料的温度传感探头，此类温度传感器温度传感探头更加稳定且易于制作，适合在工业生产等领域推广使用。

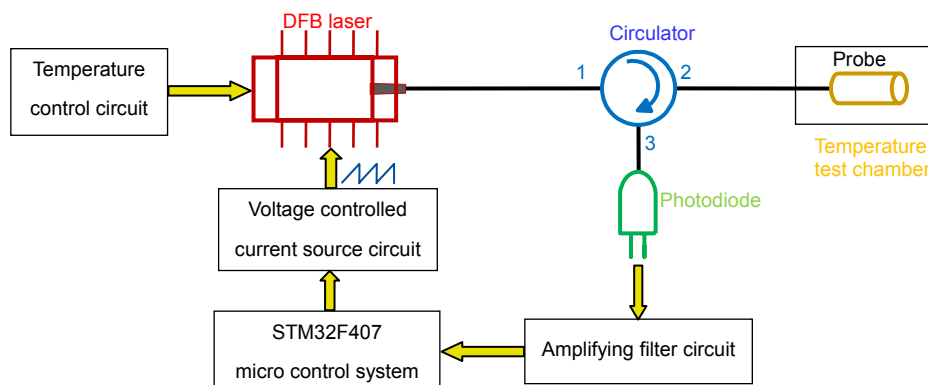
参考文献

- [1] Raghuwanshi S K, Kumar M, Priya A. High-sensitive fiber bragg grating sensor for different temperature application[M]//Janyani V, Tiwari M, Singh G, et al. *Optical and Wireless Technologies*. Singapore: Springer, 2018: 75–81.
- [2] Palumbo G, Tosi D, Iadicco A, et al. Analysis and design of chirped fiber bragg grating for temperature sensing for possible biomedical applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7103015.
- [3] Xu Z B, Ye H N, Ye M. Semiconductor absorption fiber-optic temperature sensor[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(1): 62–64.
- [4] 许忠保, 叶虎年, 叶梅. 半导体吸收式光纤温度传感器[J]. *光电技术应用*, 2004, 25(1): 62–64.
- [5] Sun S H, Wang Y Y, Xu Y. *Optical Fiber Measurement and Sensing Technology*[M]. 3ed. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.
- [6] 孙圣和, 王廷云, 徐影. *光纤测量与传感技术*[M]. 3 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- [7] Shen F B, Peng W, Cooper K L, et al. UV-induced intrinsic Fabry-Perot interferometric fiber sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5590: 47–56.
- [8] Rao Y J, Deng M, Zhu T. Visibility-enhanced in-Line Fabry-Pérot Interferometers by the use of femtosecond lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1459–1462.
- [9] 饶云江, 邓明, 朱涛. 飞秒激光加工的高对比度法布里-珀罗干涉传感器[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1459–1462.
- [10] Zhang G L, Yang M H, Wang M. Large temperature sensitivity of fiber-optic extrinsic Fabry-Pérot interferometer based on polymer-filled glass capillary[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 618–622.
- [11] Ding W H, Jiang Y. Miniature photonic crystal fiber sensor for high-temperature measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(3): 786–789.
- [12] Zheng J. Analysis of optical frequency modulated continuous wave interference[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(21): 4189–4198.
- [13] Zheng J. Continued analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(5): 765–769.
- [14] Zheng J. Coherence analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3681–3687.
- [15] Zheng J. Multiplexed reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(8): 084401.
- [16] Zheng J. *Optical Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Interferometry*[M]. Canada: Springer, 1980.
- [17] Zheng G, Gao M, Liu W G, et al. High-precision digital phase discrimination method: CN108318737A[P]. 2018-07-24.
- [18] 郑刚, 高明, 刘卫国, 等. 一种高精度数字鉴相方法: CN108318737A[P]. 2018-07-24.

Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor

Wang Huan, Zheng Gang*, Chen Haibin, Zhang Xiongqing

College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710072, China



Frequency modulated continuous wave laser interference temperature sensor

Overview: Optical fiber temperature sensors have received widespread attention because of its high sensitivity, fast response, anti-electromagnetic interference, ultra-high voltage insulation, anti-combustion and anti-explosion. However, the temperature sensing probes of the available interferometric optical fiber temperature sensors are generally made of optical fibers, and most of them use the white light interference measurement technology. Because the thermal expansion coefficient of optical fiber is not high, the sensitivity of temperature measurement needs to be further optimized. In addition, because the optical fiber is relatively fragile, especially at higher temperature, the loss of coating-protected fibers can be embrittled in contact with air, which will affect the reliability of the temperature sensor. The white light interferometry uses a broadband light source and a spectral analysis device to collect the reflection or transmission spectrum. White light interference solves the optical path difference from the interference beam by spectral information, but its measurement range is limited, and requires a sophisticated spectral analysis device or module, which is relatively high in cost.

This paper presents an extrinsic Fabry-Perot (F-P) cavity optical fiber temperature sensor, which is based on the frequency-modulated continuous-wave (FMCW) laser interference. Compared with the traditional laser interferometry technology, since the signal of optical FMCW is a dynamic signal (i.e., a time continuous function), to calibrate the fractional phase, distinguish the phase-shift direction and count the number of full periods is quite easy. The proposed FMCW laser interference temperature sensor mainly composed of an optical system, a modulation signal generation system and a signal acquisition and processing system. The temperature sensor uses a stainless-steel tube with a higher expansion coefficient and better chemical stability as the F-P cavity. The extrinsic fiber F-P cavity temperature sensing probe is fabricated by coupling the cavity with the fiber using a single mode fiber collimator with output direction is strictly perpendicular to the two mirrors of the F-P cavity. The temperature is determined by measuring the change in cavity length caused by thermal expansion of the F-P cavity, and the cavity change is found out by using the frequency-modulated continuous wave interferometry. In this experiment, the F-P cavity is a stainless-steel tube, and the temperature probes with lengths of 100 mm and 200 mm (the length of the Faber cavity are 80 mm and 180 mm) are used for the experiment. The experimental results show that the temperature measurement resolution of the optical fiber temperature sensor reached of 0.0002 °C and the temperature measurement sensitivity reached 3022 nm/°C.

Citation: Wang H, Zheng G, Chen H B, *et al.* Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180506

Supported by Shaanxi Provincial Key Laboratory of Photoelectric Testing and Instrument Technology Open Fund Project (2015SZSJ-60-3)

* E-mail: zhengg@xatu.edu.cn