

一种用于海洋温度快速测量的光纤法布里-珀罗温度传感器

孟华^{1**}, 李海洋², 曹占启^{1*}

¹91388 部队, 广东 湛江 524022;

²中船重工集团第 715 所, 浙江 杭州 310023

摘要 为满足海水温度高精度快速测量的需求,提出了一种基于光纤法布里-珀罗(F-P)传感器的温度传感方案。该传感器由硅片和光纤尾纤组成,硅片作为光纤 F-P 传感器 F-P 腔的腔体,利用硅的热光效应和热膨胀效应实现温度的传感。采用基于二分法的交叉相关快速解调算法对光纤 F-P 传感器进行高精度的快速解调。对制作的光纤 F-P 温度传感器进行测试,结果表明:该传感器可达到 0.15 °C 的温度测量精度,可分辨 0.001 °C 的温度变化,温度响应时间可达到 128 ms。该传感器有望在投弃式测量领域得到应用。

关键词 光纤光学;法布里-珀罗传感器;温度传感器;快速测量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1210001

An Optical Fiber Farby-Perot Temperature Sensor for Rapid Ocean Temperature Measurement

Meng Hua^{1**}, Li Haiyang², Cao Zhanqi^{1*}

¹No. 91388 Troops of PLA, Zhanjiang, Guangdong 524022, China;

²715th Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract In order to meet the requirements of high accuracy and rapid measurement of seawater temperature, we propose a temperature sensing scheme based on optical fiber Farby-Perot (F-P) sensor. The sensor is composed of silicon chip and fiber tail, and the silicon chip acts as the F-P cavity of the optical fiber F-P sensor. Temperature sensing is realized based on the thermal optical effect and thermal expansion effect of silicon. The demodulation algorithm of optical fiber F-P sensor is the fast cross correlation demodulation algorithm based on dichotomy, which can realize high precision and fast demodulation. The experimental results of optical fiber F-P temperature sensor show that the sensor can reach the precision of 0.15 °C and distinguish the temperature change at 0.001 °C, and the temperature response time can reach 128 ms. The sensor is expected to be applied in the field of disposable measurement.

Key words fiber optics; Fabry-Perot sensor; temperature sensor; fast measurement

OCIS codes 060.2370; 050.2230; 030.1640

1 引言

海水温度是海洋环境测量中的一个关键参数,海水在不同的水层间存在温度梯度^[1]。为实现对海水温度剖面的测量,一般对温度传感器的精度有较高要求。采用投弃式仪器获取海洋温度剖面是目前常用的方法之一,该方法操作简单,且能够实现走航

式测量。由于投弃式测量仪器是在探头快速下落过程中对海水温度进行测量的,因此对传感器的响应时间具有极高的要求。

目前,传统的电学式感温元件主要有铂电阻和负温度系数(NTC)热敏电阻。铂电阻温度精度高,线性度好,但其响应时间较慢,一般是十几秒^[2],很难满足要求。热敏电阻响应速度快,可达到毫秒量

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-07-20; 录用日期: 2018-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(11774374)、教育部新世纪优秀人才支持计划、浙江大学引进人才科研启动项目

* E-mail: 13652868159@139.com

级,但其电阻值随温度的变化是非线性的,且一致性较差,在使用中,通过热敏电阻的电流很难控制,电流往往过大,会导致热敏电阻发热,给测量带来较大误差^[3]。

与电学式温度传感器相比,光纤传感器具有灵敏度高、体积小、质量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰等优点。目前在海洋温度传感领域最常见的是光纤光栅传感器。光纤光栅传感器具有结构简单、解调方便、稳定性好等优势。为实现温度的快速响应与高精度传感,需要对光纤光栅进行封装。张登攀等^[4]采用金属套管作为保护壳体,同时在金属管内填充导热液体,实现了 47.1 ms 的响应时间,精度可达到 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,但该方法加大了传感器的制作难度,同时填充导热液体也会给传感器的长期稳定性带来问题。

为简化温度传感器的结构,本课题组提出了一种基于硅片的光纤法布里-珀罗(F-P)温度传感器,该传感器制作简单,只包含硅片的切割以及光纤尾纤与硅片的粘贴。由于硅片的热光系数与热膨胀系数较高,因此传感器具有较高的灵敏度。切割后的硅片尺寸很小,硅片直接与温度场接触,故而不需要封装结构,响应速度很快。结合基于二分法的交叉相关快速解调算法可以实现高精度的快速解调。

2 基本原理

2.1 温度传感机制

硅膜温度传感器由光纤尾纤和硅片组成,其结构图如图 1 所示,其中硅片作为光纤 F-P 传感器的 F-P 腔。该传感器的温度传感机制是利用硅的热光效应

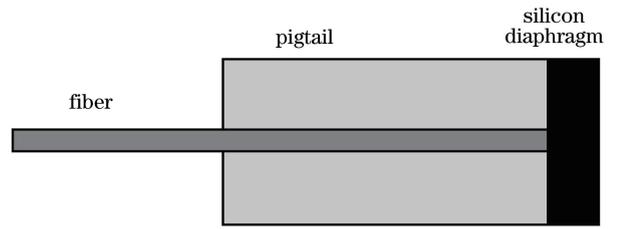


图 1 光纤 F-P 温度传感器结构示意图

和热膨胀效应。在温度作用下,热光效应与热膨胀效应均会使光纤 F-P 传感器腔长发生变化,因此解调出光纤 F-P 传感器的腔长即可获得环境的温度信息。

单晶硅的热光系数和热膨胀系数在室温附近与温度的关系可由(1)式^[5]和(2)式^[6]表示:

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 9.48 \times 10^{-5} + 3.47 \times 10^{-7} T - 1.49 \times 10^{-10} T^2, \quad (1)$$

$$K_{\text{ex}}(T) = 3.725 \times 10^{-6} \{1 - \exp[-5.88 \times 10^{-3}(T - 124)]\} + 5.548 \times 10^{-10} T, \quad (2)$$

式中: n 为硅的折射率; T 为环境温度; K_{ex} 为硅的热光系数。

光纤 F-P 传感器的 F-P 腔的有效腔长为 $L_e = nh$, h 为 F-P 腔的实际腔长。由(1)式和(2)式可以得到有效腔长 L_e 随温度 T 的变化。以厚度为 $497\text{ }\mu\text{m}$ 的硅片为例,其有效腔长与温度的关系如图 2 所示。可以看出,温度与有效腔长的关系是线性的,因此解调出光纤 F-P 传感器的腔长值就可解算出环境的温度。

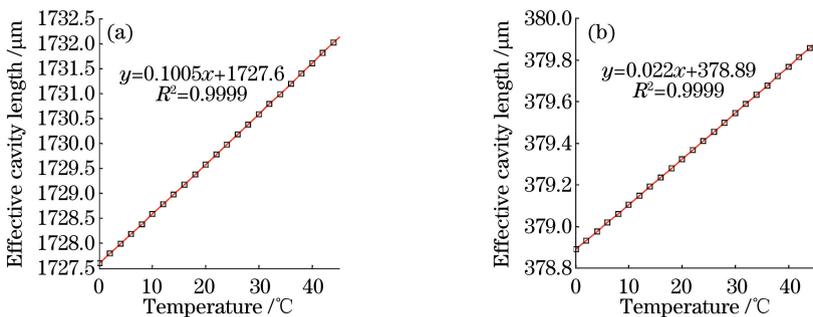


图 2 有效腔长与温度的关系。(a)厚度为 $497\text{ }\mu\text{m}$ 的硅片;(b)厚度为 $109\text{ }\mu\text{m}$ 的硅片

Fig. 2 Relationship between effective cavity length and temperature. (a) Silicon with thickness of $497\text{ }\mu\text{m}$;

(b) silicon with thickness of $109\text{ }\mu\text{m}$

2.2 光纤 F-P 传感器的干涉模型

基于硅片的光纤 F-P 温度传感器实际上就是一种 F-P 干涉仪,可用图 3 所示的平行平板模型分析其工作原理。

当光入射至 F-P 腔的上反射面时,会在两个反射面上分别形成多光束干涉。假设 F-P 干涉仪的两个反射率相同且都为 R ,则反射光的相对光强满足^[7]:

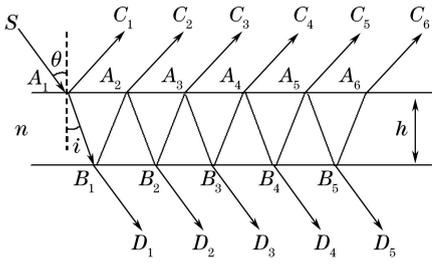


图 3 F-P 干涉仪光波传播模型示意图

Fig. 3 Schematic of light wave propagation model of F-P interferometer

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{F \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (3)$$

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2}, \quad (4)$$

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n h \cos i, \quad (5)$$

式中: I_r 为反射光强度; I_i 为入射光强度; F 为条纹细度; δ 为相邻两束反射光之间的相位差(不考虑反射光的相位跃变); λ 为光波长; i 为入射光的折射角。

基于硅片的光纤 F-P 温度传感器在海水中使用时, 两个反射面的反射率相差较小, 两个反射面的反射率均近似为 20%。假设入射光 S 的光强为 100%, 考虑到光是垂直入射的, 则第 1 条反射光线的强度 C_1 为 20%, 第 2 条反射光线 C_2 的强度为 12.8%, 第 3 条反射光线 C_3 的强度为 0.5%, ……。可以看出, 第 1、第 2 条光线的光强较为接近, 但第 3 条光线的光强降低了 3 个数量级, 因此可以忽略第 3 条及其以后各条光线的影响, 可认为 F-P 干涉仪是双光束干涉。因此, (4) 式中的 F 可用 $4R$ 代替。将 $4R$ 代入 (3) 式, 可以得到光纤 F-P 传感器近似的反射光强表达式为

$$I_r = 2I_i R \left(1 - \cos \frac{4\pi n h}{\lambda} + \pi \right). \quad (6)$$

考虑到腔内损耗以及反射面的相位跃变, 反射光强度为

$$I_r = 2R \left(1 + \gamma \cos \frac{4\pi n h}{\lambda} + \pi \right), \quad (7)$$

式中: γ 为考虑了腔内损耗的反射光强条纹对比度。

3 光纤 F-P 传感器的解调

光纤 F-P 传感器解调的目的是从传感器反射回的光谱信号中提取出传感器的腔长信息, 进而利

用腔长信息与待测量(压力、温度、应变等)的线性关系还原出待测量。为实现高精度的快速解调, 本课题组采用基于二分法的交叉相关快速解调算法^[8]进行解调。

交叉相关解调算法^[9]通过对已检测到的反射光谱信号进行互相关处理来实现对 F-P 绝对腔长的计算。光纤 F-P 传感器的反射光谱如 (7) 式所示, 进行归一化并滤除直流量后的简化形式为

$$I_r = 2\gamma \cos \left(\frac{4\pi L_c}{\lambda} \right). \quad (8)$$

对该信号进行交叉相关计算得到的互相关函数为

$$C(L) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 2\gamma \cos \left(\frac{4\pi L_c}{\lambda} + \pi \right) \cos \left(\frac{4\pi L}{\lambda} + \pi \right) d\lambda \approx R \left(\frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} \right) \cos \left[2\pi(L - L_c) \left(\frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left[2\pi(L - L_c) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \right], \quad (9)$$

式中: λ_1 和 λ_2 分别为光谱采集设备获得的反射光谱波长范围的下限和上限; c 为光速; L 为模拟的有效腔长。

可以看出, 交叉相关函数为一个低频包络 sinc 函数调制的高频余弦振荡函数, 高频余弦振荡函数的振荡周期为

$$T' = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_1}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \approx \frac{\lambda_0}{2}, \quad (10)$$

式中: $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$, 为中心波长。

低频包络和高频余弦振荡函数都在 L_c 处出现最大值, 因此, 求得互相关函数最大值即可解调出光纤 F-P 传感器的腔长值。光纤 F-P 传感器的腔长对应于互相关函数的最大值, 基于该原理可以实现对光纤 F-P 传感器的解调。为了提高分辨率, 可以降低腔长的扫描间隔, 但这样会导致计算量大幅增加, 严重影响解调的实时性。

为同时满足高分辨率和快速解调的要求, 可采用二分法来降低计算量。从前面的讨论可以知道, 互相关函数具有很多极大值, 且极大值之间的间距为一个周期 $\lambda_0/2$ 。因此可利用傅里叶变化粗略估计腔长的位置, 确定实际腔长的范围。采用二分法找到粗估腔长附近的互相关函数的一个极大值, 然后利用极大值周期性的特征, 找到实际腔长范围内的所有极大值。在这些极大值中, 必然存在一个最大值对应的实际腔长, 从而可以快速解调出腔长。

4 实验结果与分析

制作的硅基光纤 F-P 温度传感器的实物图如图 4 所示。为检测基于硅片的光纤 F-P 温度传感器的性能,分别对传感器的温度系数、响应时间、温度

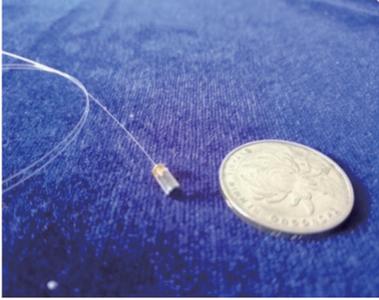
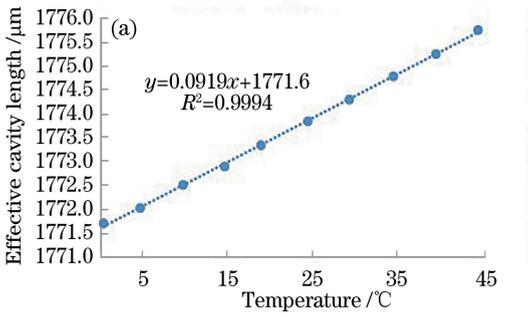


图 4 硅片式光纤 F-P 温度传感器实物图
Fig. 4 Picture of silicon based optical fiber F-P temperature sensor



精度和分辨能力进行实验测试。实验中采用 MICRON OPTICS 公司的 SI155 解调仪采集光纤 F-P 传感器的反射光谱,其工作波长范围为 1500~1600 nm,波长间隔为 10 pm。测得传感器的反射光谱后,通过网线发送到计算机进行解调处理。

4.1 温度系数测试

将厚度分别为 497 μm 和 109 μm 的硅片制作的光纤 F-P 温度传感器和铂电阻 Pt100 一起置于低温恒温试验箱中,以 5 °C 的温度步长将温度从 0 °C 升至 45 °C,记录中间各点的反射光谱信息和 Pt100 测量的温度。经交叉相关快速解调算法解调出的结果如图 5 所示,可以看出:硅基光纤 F-P 温度传感器的有效腔长与温度具有较好的线性度,两个传感器的灵敏度均比 2.1 节计算得到的理论值偏低一些。这可能是因为在采用的硅片为低掺杂硅,不是纯硅。另外传感器采用胶固定,也会对其产生一定的影响。

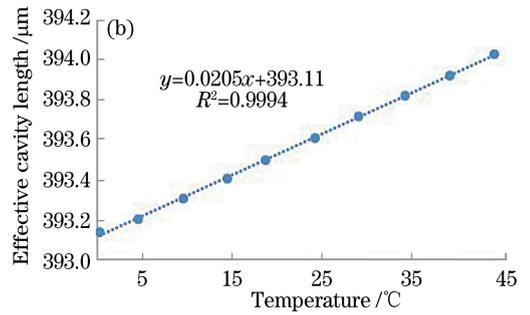


图 5 硅片式光纤 F-P 温度传感器温度灵敏度实验结果。(a)厚度为 497 μm 的硅片;(b)厚度为 109 μm 的硅片
Fig. 5 Experimental results of temperature sensitivity of silicon based optical fiber F-P temperature sensor.

(a) Silicon with thickness of 497 μm; (b) silicon with thickness of 109 μm

4.2 温度响应时间测试

将采用 497 μm 厚的硅片制作的光纤 F-P 温度传感器放在空气中,与解调仪连接后,开始记录数据,然后将传感器迅速投入 45 °C 的恒温水槽中,一段时间后,停止记录数据。由于 SI155 解调仪全谱采样率只有 10 Hz,无法满足温度响应时间测量的需求,而该解调仪的波长采样率可达到 1000 Hz,因此可采用分辨率相对较低的双峰解调法进行解调,从而可以计算响应时间。解调后的结果如图 6 所示,响应时间用温度阶跃量的 22% 和 73% 对应的时间差表示,结果为 128 ms。

4.3 温度精度与分辨能力测试

将 497 μm 厚的硅片制作的光纤 F-P 温度传感器与标准温度计(精度为 0.001 °C)一起置于恒温水槽中,记录光纤 F-P 温度传感器测量的温度与标准温度计测量的温度,最后得到硅膜光纤 F-P 温度传

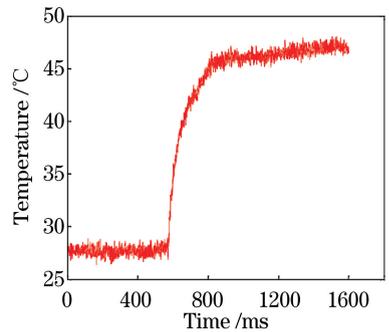


图 6 光纤 F-P 温度传感器的温度响应实验结果
Fig. 6 Experimental temperature response of optical fiber F-P temperature sensor

感器的测量误差结果如图 7 所示。温度测量误差用最大测量误差表示,结果为 0.15 °C。

分辨率一般用在恒定情况下连续多次测量的标准偏差 $\pm \delta$ 、 $\pm 2\delta$ 或 $\pm 3\delta$ 来表示。恒温水槽的温度

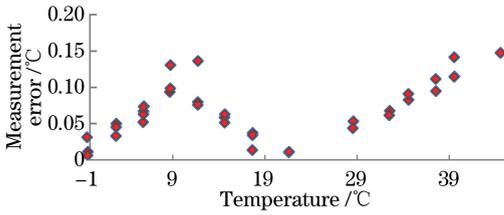


图 7 光纤 F-P 温度传感器的测量误差

Fig. 7 Measurement error of optical fiber F-P temperature sensor

控制精度有限,很难做到温度恒定,为测试硅膜温度传感器的分辨能力,将传感器放置于恒温水槽中,并用标准温度计记录温度。恒温水槽的温度在 29.887~28.895 °C 之间变化,变化范围小于 0.008 °C。硅膜温度传感器测量的结果如图 8 所示,可以看出,硅膜温度传感器可以分辨出 0.001 °C 的变化。

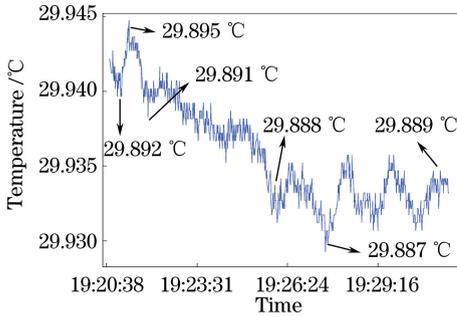


图 8 近恒温下光纤 F-P 温度传感器的测量结果

Fig. 8 Measured temperature using optical fiber F-P temperature sensor at near constant temperature

5 结 论

对基于硅片的光纤 F-P 温度传感器的温度传感进行了理论分析与实验研究。该传感器的制作方法简单,结合微机电加工技术可实现批量化生产;传感器可实现 0.15 °C 的温度测量精度,响应时间可达到 128 ms,可实现温度的高精度快速测量。但本研究工作还存在较多不足,如采用的硅片为掺杂硅,固定方式为胶粘,这对传感器精度的提高不利。后续拟通过静电键合工艺及选用单晶硅等措施来提交传感器的精度,使其能更好地满足海洋环境中高精度快速温度测量的需求。

参 考 文 献

[1] Ren G X, Wang X Y, Du L B. Design of high-precision and fast-response temperature measurement system for ocean [J]. Instrument Technique and

Sensor, 2011(2): 45-47.

任国兴, 王晓影, 杜立彬. 高精度快响应海洋测温系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2011(2): 45-47.

[2] Zhou S Z, Cui W D. Influences of the packaging structure of platinum resistance temperature sensor on response time [J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(3): 29-31.

周绍志, 崔文德. 铂电阻温度传感器封装结构影响响应时间的因素[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(3): 29-31.

[3] Zheng X W, Zheng H. The thermometric error of thermal resistor effected by working current [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2001, 21(4): 44-52.

郑晓文, 郑红. 工作电流对热敏电阻测温的影响[J]. 宇航计测技术, 2001, 21(4): 44-52.

[4] Zhang D P, Wang J, Wang Y J. Fast response properties of ocean temperature sensors based on fiber Bragg grating [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(3): 7-12.

张登攀, 王璠, 王永杰. 光纤光栅海洋温度传感器的快速响应特性[J]. 光电工程, 2015, 42(3): 7-12.

[5] Della Corte F G, Esposito Montefusco M, Moretti L, et al. Temperature dependence analysis of the thermo-optic effect in silicon by single and double oscillator models [J]. Journal of Applied Physics, 2000, 88 (12): 7115-7119.

[6] Cocorullo G, Corte F G D, Rendina I. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550 K at the wavelength of 1523 nm [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(22): 3338-3340.

[7] Jiang Y, Tang C J. Principle and application of optical fiber Fabry-Perot interferometer [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

江毅, 唐才杰. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

[8] Li H Y, Hao F H, Li D M, et al. Optical fiber Fabry Perot pressure sensor cross correlation fast demodulation algorithm [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2017(4): 4-7.

李海洋, 郝凤欢, 李东明, 等. 光纤珐珀压力传感器交叉相关快速解调算法[J]. 声学与电子工程, 2017(4): 4-7.

[9] Jing Z G. Study on white light extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor and its applications [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

荆振国. 白光非本征法布里-珀罗干涉光纤传感器及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.