

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.03.02

光谱域光纤白光干涉测量技术

江毅, 高红春, 贾景善

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要: 光谱域光纤白光干涉测量技术(WLI)具有精度高、动态范围大、工程实用性强等优点,在光纤传感和精密测量领域有广泛的应用价值。本文回顾了光谱域光纤白光干涉测量技术的发展历程,重点介绍了本研究组在这一领域所开拓的基于相位测量技术的光谱域光纤 WLI,包括傅里叶变换 WLI 及其相对测量术、波长扫描 WLI、相移 WLI、波数扫描 WLI、互相关 WLI、步进相移 WLI,并展示了该技术在光纤温度、压力、应变等传感器中的应用。

关键词: 光纤传感技术; 光纤白光干涉测量技术; 光谱

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)03-0031-12

Fiber Optical Spectral-Domain White-light Interferometry

JIANG Yi, GAO Hongchun, JIA Jingshan

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Fiber optical spectral-domain white-light interferometry (WLI) has the advantages of high precision, large dynamic range and engineering practicability, and it has been found widely applications in fiber optical sensing and precision measurement. In this paper, we review the development of fiber optical spectral-domain white-light interferometry, and focus on our works about the fiber optical spectral-domain WLI based on phase measurement technology, including the Fourier transform WLI and relative measurement, wavelength scanning WLI, phase-shifted WLI, stepped phase-shifted WLI, wavenumber scanning WLI, and cross-correlation WLI. Applications of this technology in interrogating fiber optic temperature sensors, pressure sensors, and strain sensors are demonstrated.

Key words: fiber optical sensing; fiber optical white-light interferometry; optical spectrum

0 引言

光纤传感技术已经发展了 40 年,其中各种技术已经相继成熟并走向工程应用。点式的光纤传感器按照调制方式的不同分为:强度型、干涉型、波长型和偏振型^[1]。强度调制型的光纤传感器抗干扰能力差,需要采取其它辅助技术来克服外界环境干扰;而干涉型、波长型和偏振型的光纤传感器并不直接调制光功率,所以,几乎所有的光纤传感器都需要对信号进行解调。因此,光纤传感技术的研究分为两大类:传感器技术和信号解调技术。点式的光纤传感器以光纤光栅传感器(FBG)和外腔式法珀干涉型传感器(EFPI)最具代表意义,也获得了最广泛的工程应用。对这两类传感器的信号解调又可以大致分为相对测量信号解调和绝对测量信号解调。一般认为相对测量适合测量高频动态信号,绝对测量适合测量低频静态信号,但随着最新应用需求和技术的发展,高速绝对测量技术已经成为技术发展的前沿。对于 FBG 传感器而言,相对测量是

获得 FBG 波长的变化量,适用于测量振动信号、声信号一类动态信号,并不关心 FBG 的绝对波长;绝对测量需要测量出 FBG 的波长,通过 FBG 的波长,就可以得到被测缓变或静态物理量,如温度、应变、压力、位移等。对于 EFPI,相对测量使用激光干涉测量技术获取法珀(FP)腔长的变化量,一般用于测量振动、声,或者从一个时间到另一个时间内光程差的连续变化;绝对测量使用白光干涉测量获取的是干涉仪的绝对光程差,可以测量缓变或静止变化的物理量,如距离、温度、应变、折射率等参数。光纤中的 FBG 和 EFPI(有点像电路里面的电阻和电容的对应关系),虽然一个是波长调制型、一个是相位调制型,但在绝对测量时均可以具有相同的解调硬件系统,即通过扫描传感器的光谱获得被测物理量。对于 FBG 来说,扫描光谱后可以直接得到 FBG 的反射波长;对于 EFPI 来说,扫描光谱后还需要根据干涉仪的白光光谱获得干涉仪的光程差,即 EFPI 的腔长,才能真正得到被测物理量。因此通过白光光谱来获得被测 EFPI 的腔长成为

一项重要的技术,即光纤白光干涉测量术(WLI)^[2]。由于 EFPI 既可以由两根光纤的端面对准后形成传感器,又可以由一根光纤端面与另一个反射面组成传感器,测量光纤出光端面与反射面之间的距离,因此光纤白光干涉测量技术除了应用于光纤传感领域,还可以应用于微小距离的测量,结合扫描装置,就可以构成纳米精度的三维面形测量系统,能够用于微纳器件的面型测量中。

1 相关技术介绍及其技术进展

1.1 光谱获取技术

光纤光谱域白光干涉测量技术的第一步是要获取干涉仪的光谱。用商用的光谱仪测量光谱是一种最直接的方法,但一般商用的光谱仪体积大、价格昂贵,并且波长测量分辨力不够高,也不便于仪器化,一般只用于实验室中。目前光纤白光干涉测量技术中,获取干涉仪光谱的技术手段与 FBG 解调仪完全一样,主要包括 3 个主流的技术手段: CCD 光谱仪法、扫描可调谐光纤法珀滤波器法和扫描半导体激光二极管法。

第一种获取光谱的技术是用 CCD 光谱仪,即用平面光栅衍射后投射到 CCD 线阵来采集光谱^[3]。由于 CCD 的响应波长一般小于 $1.1\ \mu\text{m}$,与目前主流光纤系统的工作波长($1.55\ \mu\text{m}$, $1.31\ \mu\text{m}$)不合,因此 $1.55\ \mu\text{m}$ 的红外 CCD 像元数较少,一般只有 256 或者 512 个点。对于 $40\ \text{nm}$ 的光谱范围,即使是 512 个像素,每个像素对应约 $80\ \text{pm}$ 的波长范围,也远大于光谱测量中对 $1\ \text{pm}$ 波长测量分辨力的要求。一个解决的方法是采用插值细分的方法,可以得到大约 $1\ \text{pm}$ 的波长测量分辨力,但这样测得的波长受光谱本身的特性影响大,可能经常会出现数个甚至数十个 pm 的波长跳变。基于 CCD 光谱仪的另外一个缺点是不便于复用,实际中采用光开关来切换不同的光纤。基于 CCD 光谱仪的光谱采集技术的优点是采样速度快,甚至可以高达几十 KHz 的扫描速度。CCD 的背景噪音低,可以做到比较大的动态范围。此外 CCD 光谱仪构成的解调系统非常容易实现,对技术人员的要求低。且基于 CCD 阵列的光谱仪可以放入测量仪器内部,便于工程化应用。

第二种获取光谱的方法是基于可调谐法珀滤波器(FFP-TF)的技术。可以在宽带光源的输出后接 FFP-TF,形成波长扫描光,也可以将 FFP-TF 做到激光器里面,形成波长扫描激光器。例如使用我们自己研制的 FFP-TF 的线宽 $0.12\ \text{nm}$, $\text{FSR} = 80\ \text{nm}$,损耗 $1.5\ \text{dB}$,在 $1550\ \text{nm}$ 上对应的相干长度为 $20\ \text{mm}$,即能够测量

干涉仪的最大光程差为 $20\ \text{mm}$ 。以之为基础开发的可调谐光纤激光器的输出功率超过 $10\ \text{mW}$,线宽小于 $1\ \text{pm}$,对应的相干长度超过 $2.4\ \text{m}$,不仅可以测量非常大的光程差,而且由于输出功率高还便于空分复用多路传感光纤。图 1 是用 FFP-TF 获取白光光谱的原理图,由于 FFP-TF 存在非常大的非线性,且重复性差,因此部分波长扫描光经耦合器分光后进入由标准具和光纤光栅(FBG)组成的波长校正器,对光源的输出波长进行校正。文献[4]详细介绍了这种波长获取技术。这种波长获取技术不仅小巧、便于仪器化、便于多路空分复用,而且能够获得等时间间隔(采样间隔)、等波长间隔的光谱,这样的一维数据组对于后续的数据处理(如傅里叶变换)非常方便。图 2 比较了用光谱仪和用图 1 所示方法采集到同一只 EFPI 干涉仪的光谱。可见两个光谱在同一波长范围内有相似的光谱形状。

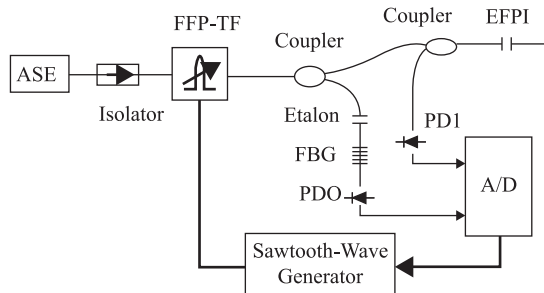
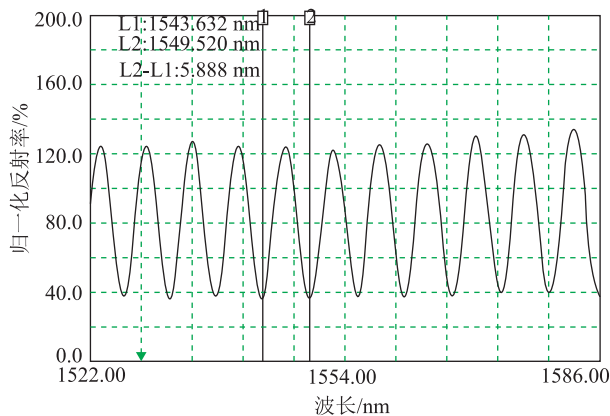
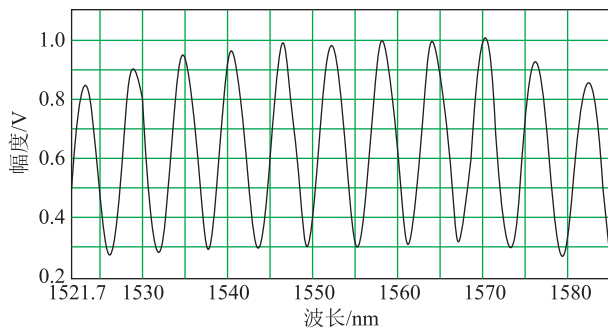


图 1 测量 EFPI 光纤白光干涉测量系统

第三种获取光谱的方法是使用可调谐 DBR 半导体激光器,通过改变激光器的注入电流实现波长调谐,将此波长调谐的光注入干涉仪来获取干涉仪的白光光谱。可调谐激光器一般需要做成模块的形式,使用时由 FPGA 控制电流源给到激光器,通过串口与外部通讯,可以设定波长扫描起点、终点、步进量,两个触发信号分别为点触发和周期触发,每完成一个波长输出(比如 $1\ \text{GHz}$)则点触发输出一个上升沿,每完成一个周期波长扫描(比如 $40\ \text{nm}$)则触发输出一个上升沿,通过统计一段时间内脉冲的个数就知道当前激光器的输出波长。此类激光器波长调谐速度快(可达 $2\ \text{kHz}$),波长调谐范围宽(可达 $40\ \text{nm}$),输出光功率高(可达 $20\ \text{mW}$),线宽小于 $10\ \text{MHz}$,并且调谐波长的位置固定,不需要进行波长校正。缺点是波长调谐不连续,如波长扫描范围为 $40\ \text{nm}$,最小步进 $1\ \text{GHz}$,则每个周期对应 5100 个点,每个点对应 $8\ \text{pm}$,大于光谱测量中对 $1\ \text{pm}$ 波长测量分辨力的要求;另外,目前还不能满足更宽调谐范围的应用需要。



(a) 光谱仪AQ6317C采集的归一化光谱



(b) 扫描FFP-TF方案采集的光谱

图2 白光干涉光谱

1.2 WLI 测量技术的原理及问题

光纤 WLI 技术又分为光程扫描 WLI 和光谱扫描 WLI。传统上的光程扫描 WLI 需要一套机械装置来扫描光程, 在一个干涉仪(传感干涉仪)的光程差为零, 或两个干涉仪(传感干涉仪和补偿干涉仪)的光程差相等时出现干涉条纹最大值^[6]。但这种技术的缺点是精度低、测量速度慢、体积大、稳定性差。这种测量手段一般分辨力是几个 μm , 最好能够达到零点几个 μm 的分辨力, 这主要是因为受机械扫描装置的分辨力和机械扫描时振动影响的限制。如文献[6]中使用机械扫描来完成扫描镜的位移技术, 位移扫描的分辨力达到 $0.54 \mu\text{m}$ 。

相比机械式扫描的本地接收干涉仪, 基于 Fizeau 干涉仪和线性 CCD 阵列的电扫描白光干涉测量系统不需要机械式的移动扫描部件, 但也是基于光程补偿原理, 结构更加紧凑, 工作稳定且扫描速度快^[7]。基于菲佐(Fizeau)干涉仪的白光干涉测量系统原理如图3所示。

其中, Fizeau 腔由两个玻璃平面或者楔块构成, 使得 Fizeau 干涉仪中不同位置处的光程差不同。透镜组由准直透镜和汇聚镜构成: 准直透镜对光纤传感器调制后的光信号进行准直, 以形成等厚干涉的平行光

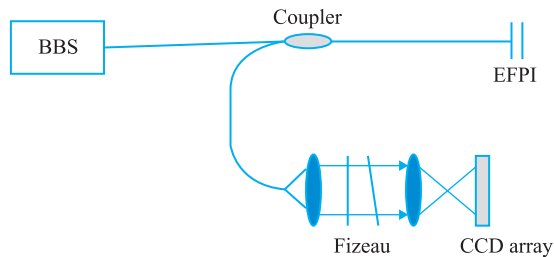


图3 基于 Fizeau 干涉仪的白光干涉测量系统原理图

入射条件; 汇聚镜把平行光转换为汇聚光线以获得足够的光强度。用光电探测器阵列(如线阵 CCD)接收 Fizeau 干涉仪对应点的输出光强, 就可以获得本地接收干涉仪不同光程差位置处的干涉条纹信号, 从而形成对传感干涉仪光程差的空间扫描。为了实现高精度的信号解调, 对电扫描白光干涉仪系统中光学器件的加工和装配精度提出了极高的要求。而且测量范围比机械式扫描光纤白光干涉测量系统的测量范围小。

光谱域白光干涉术, 即通过测量干涉仪的输出光谱就可以测量出干涉仪的光程差, 最显著的优点是系统中没有机械扫描装置, 稳定性、可靠性有了极大的提高。测量所用的标准公式如式(1)。

$$d = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{2\pi(\lambda_2 - \lambda_1)n} \cdot \Delta\varphi \quad (1)$$

式中: n 为介质的折射率; λ_1 和 λ_2 分别为光谱中的 2 个波长; $\Delta\varphi$ 为光波长从 λ_1 变化到 λ_2 时, 干涉条纹的相位变化。

因此, 直接测量光谱中两相邻峰(相位相差 2π)的波长 λ_1 和 λ_2 , 就可以得到空气腔 EFPI 干涉仪的绝对腔长

$$d = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (2)$$

这种方法最大的问题是, 由于光谱的波形成接近正弦分布, 在波峰或波谷的位置光强变化率为 0, 而信号中的噪音也使波峰或波谷的位置波动大, 使得不能精确测量出相位相差 2π 的波峰或波谷的波长, 波长测量存在着很大的随机性, 从而大大降低了波长测量的分辨力, 因此在测量干涉仪的光程差时, 测量精度较低。必须清楚, 分辨力为 $1 \mu\text{m}$ 的光谱测量并不意味着条纹峰位置测量的分辨力也是 $1 \mu\text{m}$ 。这是两个完全不同的概念。波长测量变化 $8 \mu\text{m}$, 对于 $3000 \mu\text{m}$ 的腔长, 测量误差就高达 $25 \mu\text{m}$ ^[4]。

在式(1)原理的基础上, 提出了基于相位测量技术的光纤白光干涉测量技术。其基本思路是在式(1)中, 如果能够精确地知道光谱中一段信号的起始和终止波

长, 则测量出这段信号的相位变化 $\Delta\varphi$, 就可以利用式(1)测量出干涉仪的光程差, 这样就把光纤白光干涉测量的问题转换为了一段信号的相位测量问题。而在获取光谱的过程中, 使用光纤标准具来校准光谱, 标准具的峰呈尖锐状, 因此, 能够精确的确定标准具峰的位置, 即能够精确确定光谱扫描的起始和终止波长。在此思路下, 我们发展出系列基于相位测量技术的光谱域光纤白光干涉测量技术。

1.3 基于相位测量技术的光谱域光纤干涉测量技术 (WLI)

1.3.1 傅里叶变换白光干涉测量术

傅里叶变换光纤白光干涉测量术^[8]是最具有代表性的 WLI。其工作原理是: 先将采集到的光谱数据做等波长或等波数处理, 再快速傅里叶变换 (FFT), 滤波, 提取主频再反 FFT 变换, 做对数运算, 取虚部, 并进行相位反包裹运算扩展相位范围, 最后获得相位, 再由式(1)求得干涉仪的光程差。由于可以精确地确定扫描的初始波长 λ_1 和终止波长 λ_2 , 因而能够达到很高的测量分辨力。这一技术另一个优势是不需要人工干预, 对信号质量要求也不高。

傅里叶变换光纤白光干涉测量术的数学描述如下。干涉仪的白光光谱可以写为

$$g(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda) \cos(2\pi f_0 \lambda + \pi) \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{l}{\lambda^2} \quad (4)$$

式中: f_0 为信号的主频; l 为干涉仪的光程差。做傅里叶变换后, 式(3)的频谱写为

$$G(f) = A(f) + C(f-f_0) + C^*(f+f_0) \quad (5)$$

对频谱中的主频滤波, 相当于提取出式(5)中的 $C(f-f_0)$ 项, 再对 $C(f-f_0)$ 做反傅里叶变换, 得到

$$h(\lambda) = -\frac{1}{2}b(\lambda) \exp(j2\pi f_0 \lambda) \quad (6)$$

对式(6)求对数, 再取虚部, 就可以获得相位信息

$$\varphi(\lambda) = 2\pi f_0 \lambda = \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (7)$$

式(7)中, 光程差 l 携带在相位中, 因此解调出相位 $\varphi(\lambda)$ 后, 可以直接求出 l 。图 4 是实际测量中, 波长从 1525.139 nm 扫描到 1565.491 nm 时, 一只腔长为 2298.7 μm 的 EFPI 输出光谱的相位变化。

能够空频分复用干涉型的光纤传感器是傅里叶变换光纤白光干涉测量术一个很大的优势^[9]。将各个传感器的光程差之间的间距设置得足够大, 如大于 280 μm , 傅里叶变换后的每个光谱的频谱就可以分得

足够开, 用滤波器能够将它们分别滤出, 再分别计算出每个干涉仪由于波长扫描所产生的相位变化, 就可以分别求出每个干涉仪的绝对光程差。2 只腔长分别为 1007 μm 和 3000 μm 的 EFPI 传感器, 通过一只耦合器并联连接到图 1 中, 所采集到的复合白光光谱如图 5(a)所示, 图中的横坐标实际上是波长, 因为采样间隔为 1 pm, 即一个 pm 采样一个点。傅里叶变换后得到的白光光谱的频谱如图 5(b), 图中两个频率位置分别由两个 EFPI 的光程差所决定, 腔长越长空间频率越高。分别滤波出各个频率分量后, 再计算相位, 即可解调出每个干涉仪由于波长扫描所产生的相位变化, 进而求出每个干涉仪的光程差。

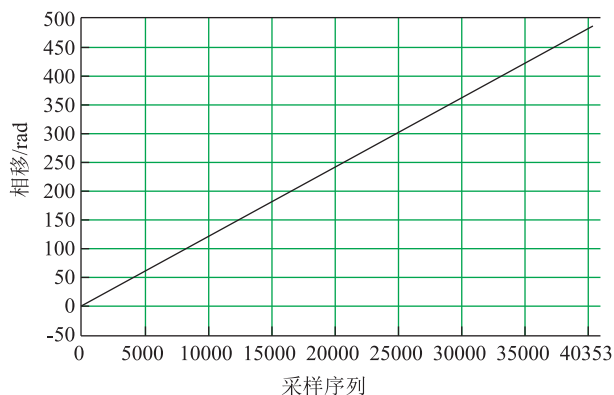
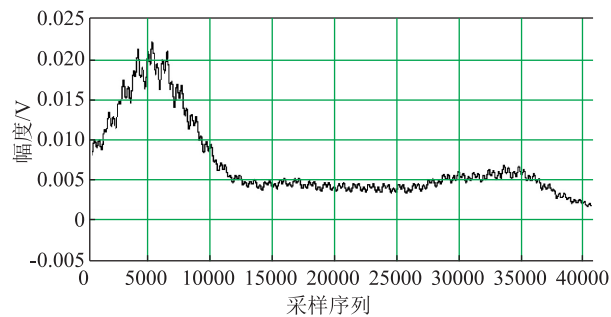
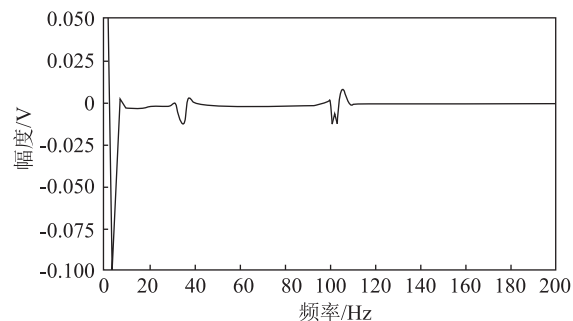


图 4 相位随采样顺序(即波长)变化曲线



(a) 白光光谱



(b) 光谱傅里叶变换后的频谱

图 5 两个 EFPI 传感器的空频分复用

1.3.2 傅里叶变换白光干涉相对测量法

对傅里叶变换白光干涉测量术做一个变化,通过测量一个干涉仪光谱信号的相位变化,可以得到在两个不同状态下干涉仪的相位差,从而测得干涉仪光程差的变化量。例如在传感器的初始状态采集一次光谱,以此作为参考信号,再次采集传感器的光谱,测量出再次采集光谱与初始光谱的相位差,就可以得到从初始状态开始后被测量的变化量^[11]。

利用相位测量技术还可以直接获得两个传感器之间的相位差。将其中一个传感器作为参考传感器,用于感受被测环境的随机波动(如温度和测量系统抖动),另一个传感器做为测量传感器,在外界扰动相同的条件下同时感受被测物理量,用光纤白光干涉相对测量的方法计算出两个传感器之间的相位差,就可以在测量出被测量的同时,去除其它外界扰动对测量的影响^[12]。

傅里叶变换白光干涉相对测量法还可以用于测量光纤器件的相位关系,例如直接测量出光纤耦合器每个输出端的相位差。理论上 2×2 耦合器的两个输出端之间相位相差 180° , 3×3 耦合器的 3 个输出端之间互成 120° 相位差。但实际值会偏离理想值,在做干涉仪时,相位的偏差可能会引入测量的误差。用傅里叶变换光纤白光干涉相对测量法可以直接测量出任意两个输出脚之间的相位关系^[13]。由于是基于波长扫描的技术,还可以直接显示出相位差与波长之间的关系。

1.3.3 波长扫描白光干涉测量术

应用 3×3 耦合器及其解调技术,可以直接解调出相位的变化,结合光纤白光干涉测量技术,发展出波长扫描光纤白光干涉测量技术^[14]。其测量系统如图 6 所示,与傅里叶变换白光干涉测量术不同的是,这个系统中同时采集干涉仪的 3 路白光干涉光谱,利用 3 路信号互成 120° 的相位差关系,直接解调出由于波长扫描所引起的相位变化。图 7 是其中 2 路信号的李萨如图,该图显示,两路输出信号间存在 120° 的相位关系。考虑到光源的不平坦和对比度的变化,3 路干涉白光光谱可以写为

$$I_i = a(\lambda) + b(\lambda) \cos[\varphi - (i-2)\frac{2\pi}{3}] \quad (i=1, 2, 3) \quad (8)$$

信号解调的方法采用对称解调技术^[15],这一解调不需要做傅里叶变换,而且可以用硬件实现,因此

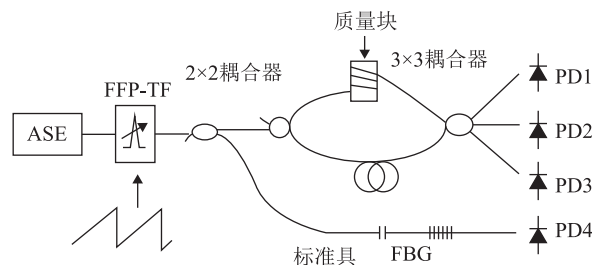


图 6 波长扫描光纤白光干涉测量技术测量原理

可以满足高频率测量的要求。图 8 是傅里叶变换光纤白光干涉测量术与波长扫描白光干涉测量术测量结果的比较,两种解调方法的获得了完全相同的测量结果。

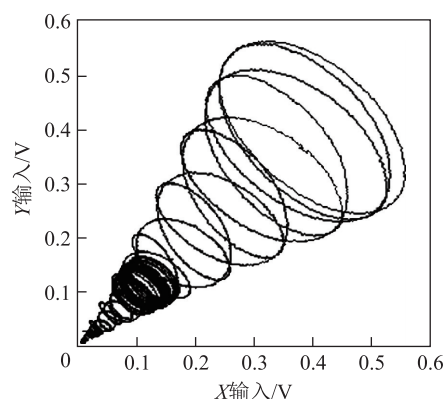
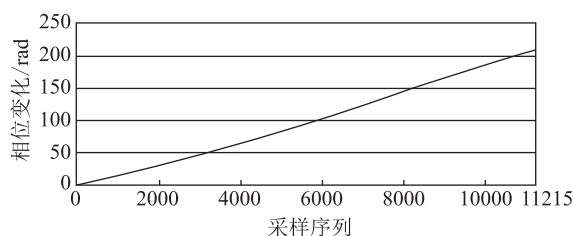
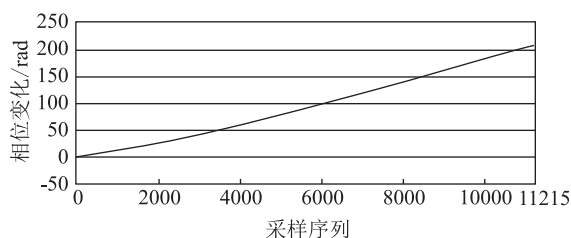


图 7 波长扫描光纤白光干涉测量技术的李萨如图



(a) 傅里叶变换白光干涉术的测量结果



(b) 波长扫描白光干涉术的测量结果

图 8 傅里叶变换光纤干涉术与波长扫描白光干涉术测量结果的比较

1.3.4 相移光纤白光干涉测量术

利用相移的概念,将干涉仪的多路输出信号间具

有不同的相位差理解为多次移相的结果, 形成相移光纤白光干涉测量术。例如 3×3 耦合器的 3 路相位相差 120° 的信号, 可以看成是第 1 路信号移相 120° 得到第 2 路信号, 再移相 120° 得到第 3 路信号, 因此波长变化引起的相位变化可以由式(9)解调出

$$\varphi = \arctan\left(-\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3}\right) \quad (9)$$

另外, 还可以由式(8)构筑出 2 路正交的信号

$$g_1 = -\frac{I_1 - I_3}{\sqrt{3}} = b(\lambda) \sin\varphi \quad (10)$$

$$g_2 = \frac{2I_2 - I_1 - I_3}{3} = b(\lambda) \cos\varphi \quad (11)$$

再用正交相位解调法就可以解调出相位^[16]。图 9 是由 3 路白光光谱构造出的 2 路正交信号的李萨如图, 可见两路信号的相位差是 90° 。图 10 是两种相移白光干涉测量术解调得到的相位变化与傅里叶变换白光干涉测量法得到结果的比较, 三种方法的测量结果完全重叠在了一起, 说明得到了完全相同的结果。

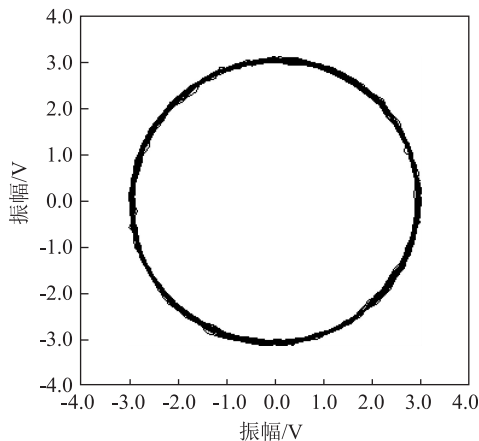


图 9 由 3 路白光光谱构造出的 2 路正交信号的李萨如图

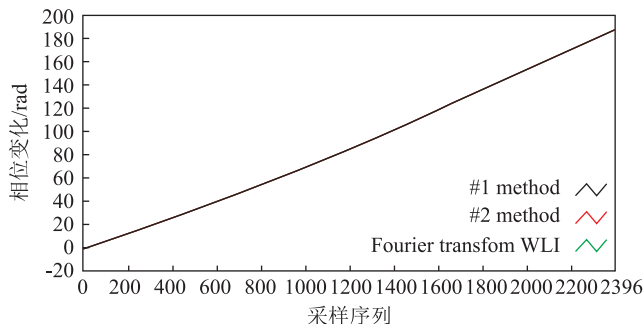


图 10 两种相移白光干涉测量术解调得到的相位变化与傅里叶变换白光干涉测量法所得结果的比较

1.3.5 波数域傅里叶变换白光干涉测量术

对于白光干涉光谱, $\varphi(\lambda) = 2\pi l/\lambda + \pi$, 其中 l 为干涉仪的光程差, 相位 φ 与波长 λ 成反比。波数 $k = 1/\lambda$, 波数与相位是线性关系, 因此可以对白光干涉光谱进行等波数重采样^[17]。波数域白光干涉光谱可以表示为

$$g(k) = a(k) + b(k) \cos(2\pi l k + \pi) \quad (12)$$

在波数域, 白光干涉光谱的周期 $T = 1/l$, 只与干涉仪的光程差有关, 不随波数改变。当干涉仪的光程差一定时, 光谱周期为定值, 因此波数域的白光干涉光谱信号是一个固定周期信号, 没有啁啾, 傅立叶频谱不会展宽。利用傅里叶白光干涉测量法, 对白光干涉光谱做快速傅里叶变换 (FFT), 自适应带通滤波提取 FFT 主频, 反 FFT 变换, 做复对数运算, 再取虚部, 就得到干涉条纹的相位信息。然后进行相位反包裹运算, 得到相位信息 $\varphi(k)$ 。在波数域中白光干涉光谱的相位 $\varphi(k)$ 与波数 k 成线性关系, 如图 11 所示。

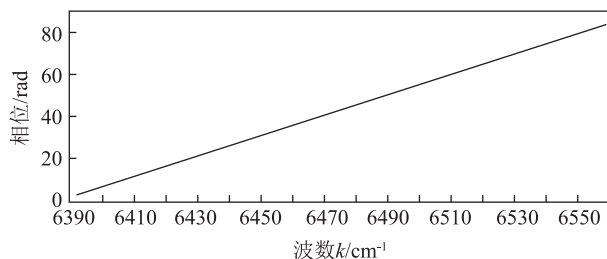


图 11 相位展开运算后的沿波数分布的干涉光谱相位 $\varphi(k)$

干涉仪的光程差 l 可以由起止波数 k_1 , k_2 及其对应的相位变化量 $\Delta\varphi(k)$ 计算得到。

$$l = \frac{\Delta\varphi(k)}{2\pi(k_2 - k_1)} \quad (13)$$

1.3.6 互相关白光干涉测量术

解调光纤干涉仪的光程差还可以采用互相关方法^[18], 利用数值模拟的方法生成一个白光干涉光谱信号, 并将之与实测的白光干涉信号进行互相关运算, 得到互相关系数。改变模拟光程差的值, 模拟生成的白光干涉光谱随之变化, 因此互相关系数也随之改变。当设定的模拟光程差与被测干涉信号的光程差相等时, 互相关系数最大。这种方法近似于机械扫描式的白光干涉测量系统, 通过数值模拟不同的光程差, 起到了对传感干涉仪的光程差进行扫描的作用。可以通过缩小数值模拟光程差的变化步长来提高测量的分辨力。这种互相关测量法需要大量的数值计算, 效率低, 在实际测量时应用较少。

经过小波降噪和平坦化的白光干涉光谱信号可以表示为

$$S(\lambda) = b(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda} + \pi\right) \quad (14)$$

根据公式(14)利用数值模拟生成一个白光干涉光谱 S_v , S_v 中的模拟光程差用 l_v 表示, S_v 随着 l_v 变化。

对白光干涉的实测光谱 $S(\lambda)$ 与模拟光谱 S_v 做互相关计算, 与模拟光程差 l_v 对应的互相关系数 C 用式(15)表示

$$C(l_v) = \sum_{n=1}^N S(n) S_v(n) = \sum_{n=1}^N S(n) \cos\left(\frac{2\pi l_v}{\lambda_n} + \pi\right) \quad (15)$$

式中: $S(n)$ 和 $S_v(n)$ 分别是白光干涉光谱信号的实测采样序列和模拟采样序列; N 为采样点数; λ_n 是与 $S_v(n)$ 对应的采样波长序列。互相关系数 C 为对 $S(n)$ 和 $S_v(n)$ 做内积, 即实测序列与模拟序列对应相乘后再相加求和。当模拟光程差 l_v 与被测光程差 l 相等时, 模拟干涉光谱 S_v 与实测干涉光谱 S 相位分布相同, 互相关系数 C 最大。为了计算出实际的光程差 l , 不断改变模拟白光干涉光谱信号的光程差 l_v , 计算互相关系数及其最大值 $C_{\max}$, 与 $C_{\max}$ 对应的模拟光程差 l_v 就等于实际的被测光程差 l 。

为了减小运算量, 同时保证高的测量分辨力, 引入多级分层的概念, 对模拟光程差 l_v 的取值半径和间隔步长 Δl_v 分多级赋予不同的值。图 12 所示为三级互相关计算得到的互相关系数沿模拟腔长 $\Delta l_v/2$ 的分布。

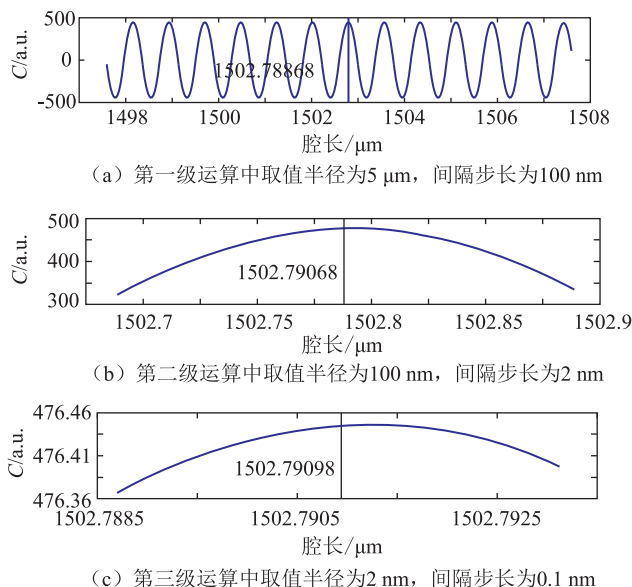


图 12 三级互相关计算得到的互相关系数沿模拟腔长 $\Delta l_v/2$ 的分布

1.3.7 步进相移白光干涉测量术

为了解决微型传感器小光程差的测量需求, 我们提出一种步进相移光纤白光干涉测量方法, 无需频率分析, 避免了在测量小光程差时引入较大误差的问题, 扩大了测量范围, 能够满足不同光程差(50 ~ 10000 μm)的法珀光纤干涉仪绝对测量的要求, 尤其是解决目前微型传感器光程差 100 μm 以内不能精确测量的问题。步进相移测量法无需探测峰值、波长追踪, 避免操作人员实时观察, 实现系统高精度自动测量。

白光光谱信号的相位 ϕ 与波数 k 成线性关系, 按照等波数间隔重采样得到新的白光光谱 $I(k) = a(k) + b(k) \cos(kl + \pi)$, 相邻采样点间的波数间隔为 Δk_0 , 相位差为 $\Delta\phi_0$ 。对白光光谱进行归一化处理, 去除直流分量和光源轮廓的影响, 获得归一化的白光光谱为

$$I(k) = \cos(kl + \pi) \quad (16)$$

在归一化的白光光谱上截取长度相等、步进相等的五段信号, 如图 13, 可以表示为 $I_1 = \cos(\phi + 2\delta)$, $I_2 = \cos(\phi + \delta)$, $I_3 = \cos(\phi)$, $I_4 = \cos(\phi - \delta)$, $I_5 = \cos(\phi - 2\delta)$ 。利用这五段信号得到相位 ϕ 的正切值

$$\tan \phi = -\frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_2 - I_4} \sqrt{1 - 2\frac{I_1 - I_5}{2I_3 - I_1 - I_5} \frac{2I_3 - I_2 - I_4}{I_2 - I_4}} \quad (17)$$

然后取反正切并进行相位解包裹运算, 得到原始相位 ϕ , 根据 ϕ 与 k 的线性关系 $\phi = kl + \pi$, 干涉仪的光程差 $l = \Delta\phi/\Delta k = \Delta\phi/(W-1)k_0$ 。

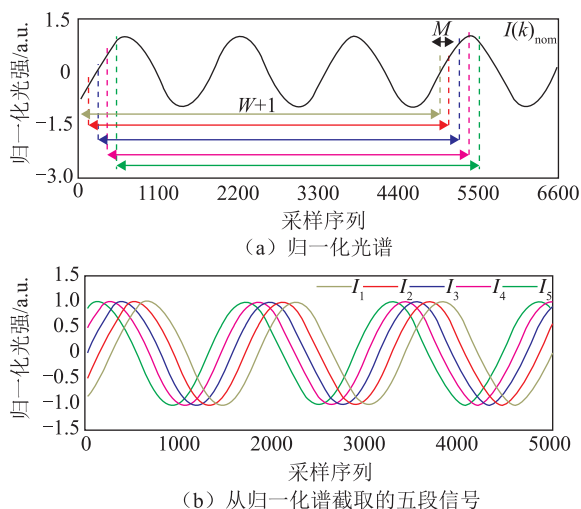


图 13 步进相移测量

2 WLI 在光纤传感器中的应用

光谱域光纤 WLI 的提出为干涉型光纤传感器的绝

对光程差测量打开了一扇门,使得绝对测量干涉仪的光程差变得简单、可靠、且精度高,基于干涉仪结构的静态物理量如距离、位移、温度、压力、折射率、应变等参数都可以简便且高精度地测量出来。

1) 光纤 MEMS 压力传感器

光纤 MEMS-P 压力传感器结构如图 14 所示。传感器由传感头、光纤准直器和光纤三部分构成,其中传感头由硅、F-P 腔、玻璃三部分组成。硅与玻璃之间形成 F-P 腔,传感头与光纤准直器用 UV 胶粘合构成 F-P 压力传感器。光源发出入射光通过光纤耦合进入到传感器中,从传感器 F-P 腔的硅、玻璃表面反射来形成双光束干涉。当压力作用在硅膜表面使其发生形变时,F-P 腔的空气间隙发生变化,即腔长 L 变化,导致干涉信号发生变化,通过光纤白光干涉解调技术可获得导出腔长,从而得到压力值。

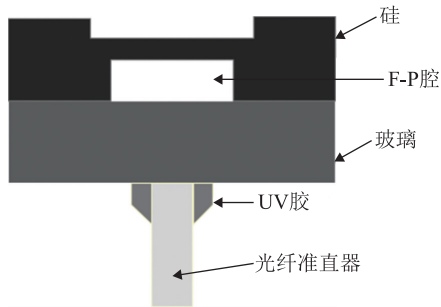


图 14 光纤 MEMS 压力传感器结构图

制作完成后的光纤 F-P 压力传感器干涉光谱如图 15 所示,可以看出,干涉条纹平滑,条纹对比度为 5 dB。室温标准大气压下,对传感器进行了稳定性测试,该光纤 F-P 压力传感器的初始腔长测量结果如图 16 所示,可以看出腔长最小值为 163.2395 μm ,最大值为 163.2423 μm ,密集分布在 163.2410 μm ,故认定初始腔长为 163.2410 μm 。多次测量数据表明,腔长变化只有 1.5 nm,测量腔长分辨力约为 0.4 nm。

对该传感器进行压力特性测试实验,该压力传感器的测量范围为 5 MPa,由于测试设备的原因只测试了 1 MPa 以内的压力,压力由 0 MPa 逐次增压至 0.956 MPa 过程中,每次增压约 0.1 MPa 记录一次数据,实验结果如图 17 所示,腔长随压力增加呈线性递减关系,压力由 0 MPa 到 0.95 MPa 范围内,腔长减小了 4.9001 μm ,传感器的灵敏度为 5.14 $\mu\text{m}/\text{MPa}$,拟合直线表达式为 $y = -5.14x + 163.31$,线性度为 99.97%。压力由 0.873 MPa 逐次减压至 0 MPa 过程中,

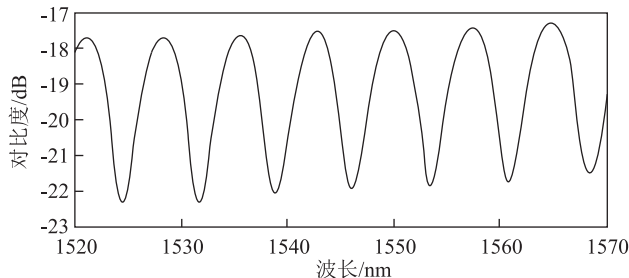


图 15 光纤 MEMS 压力传感器光谱图

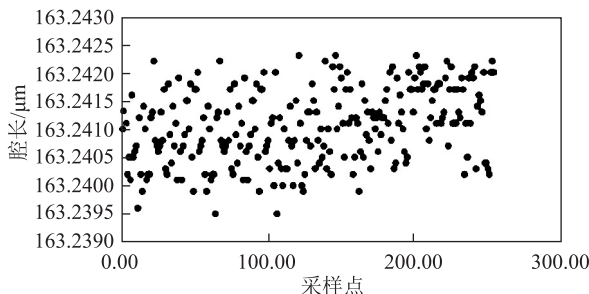


图 16 光纤 MEMS 压力传感器初始腔长

每减压约 0.1 MPa 记录一次数据,腔长随压力减小呈线性递增关系,压力由 0 MPa 增加到 0.873 MPa,腔长减小了 4.4754 μm ,硅膜的灵敏度为 5.14 $\mu\text{m}/\text{MPa}$,拟合直线表达式为 $y = -5.14x + 163.29$,线性度为 99.92%。增压和减压实验中,由实验数据拟合的直线斜率相同,即灵敏度相同,由于实验压力腔有轻微泄露导致腔长读取有误差,使得正反两次读数的截距存在稍微差距。考虑腔长的测量分辨力为 0.4 nm,因此该压力传感器在 5 MPa 的测量范围内的压力测量分辨力为 78 Pa。

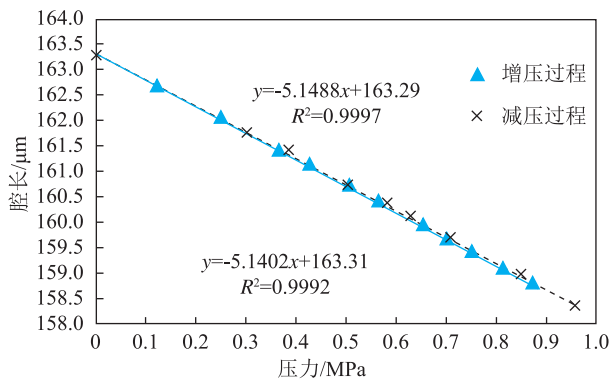


图 17 腔长与压力关系拟合曲线

2) 光纤白光干涉高温温度测量系统

光纤白光干涉高温温度测量系统包括光纤白光干涉温度解调仪和 EFPI 光纤高温传感器。光纤白光干涉温度解调仪基于光纤白光干涉测量技术,通过测量光

学腔长, 经过腔长/温度转化, 得到待测温度^[20-21]。EFPI 光纤高温传感器结构如图 18 所示。高温光纤 EFPI 温度传感器由光子晶体光纤与无芯纯石英光纤构成。用飞秒激光在光子晶体光纤的端面打出一个凹槽, 再与无芯光纤焊接, 入射光在其焊接处形成第一次反射, 透射光在无芯光纤与空气间的界面形成第二次反射, 两次反射在后向形成双光束干涉。当温度变化时, 无芯光纤的热膨胀和热光效应分别引起 EFPI 的腔长 d 和折射率 n 发生变化, 从而使光学腔长 D 发生变化, $D = nd$ 。

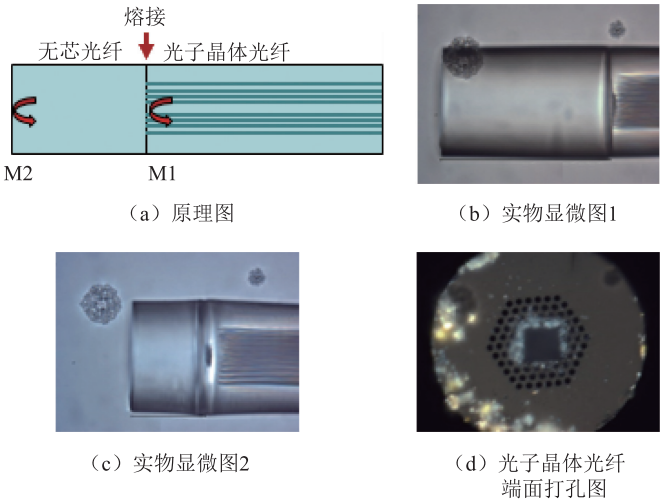


图 18 EFPI 光纤传感器结构图

对光纤白光干涉高温温度测量系统进行测试, 在 27℃ 恒定温度环境下连续测量 100 次, 每次测量时间 1 s, 以测试光纤白光干涉测量系统的腔长测量分辨力。用光纤白光干涉温度解调仪对 EFPI 光纤温度传感器的腔长进行测量, 得到的光学腔长连续测量结果如图 19。可以看出光学腔长测量的波动范围在 0.4 nm 内, 即测量分辨力可达 0.2 nm。在全温度测量范围内, 我们认

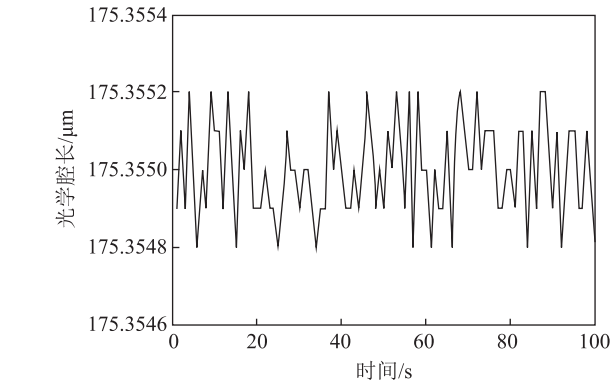


图 19 27℃ 恒定温度下, 光学腔长 100 次测量结果

为了解调仪的分辨力只有 0.5 nm, 达不到 0.2 nm。使用马弗炉提供高温环境, 从 300℃ 开始测量, 每隔约 100℃ 记录一组数据, 直至 1200℃ 为止。测试数据表明, 光纤传感器的测量数与标准温度的一致性很高。测量温度与标准温度的对比如图 20 所示。实验证明该光纤白光干涉高温温度测量系统能够在 1200℃ 的冲击高温下进行重复测试。其精度达 1%, 测量分辨力可达 1℃。同时, 该传感器具有结构简单、体积小、稳定性高、响应快、抗电磁干扰等优势, 可为航空航天、材料、化工、能源等领域的高温温度的测量提供关键的技术支撑。

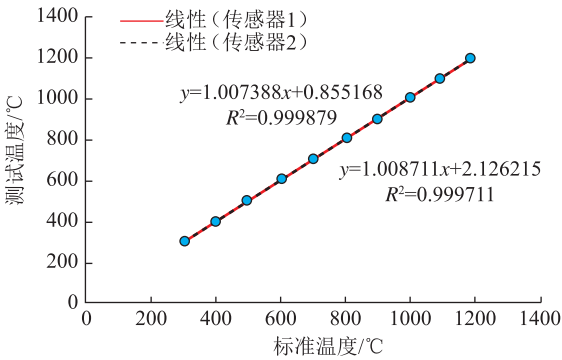


图 20 测量温度与标准温度的对比

3) 光纤白光干涉高温压力测量系统

光纤白光干涉高温压力测量系统包括光纤白光干涉压力解调仪和微纳光纤 FP 高温压力传感器。光纤白光干涉压力解调仪是基于光纤白光干涉测量技术, 通过测量 FP 传感器的腔长, 经过腔长/压力转化, 得到待测压力值^[22]。微纳光纤 FP 高温压力传感器采用低精细度光纤 Fabry-Perot 干涉仪结构。压力传感器由经过飞秒激光加工微孔后的单模光纤和无芯光纤熔接在一起构成 FP 腔; 将无芯光纤切割、打磨至所需的厚度形成对压力敏感的薄膜, 使用飞秒激光粗糙化处理薄膜外表面, 去除端面反射, 并微调膜片厚度。微纳光纤 FP 高温压力传感器结构如图 21(a) 所示, 图 21(b) 为传感器显微照片。

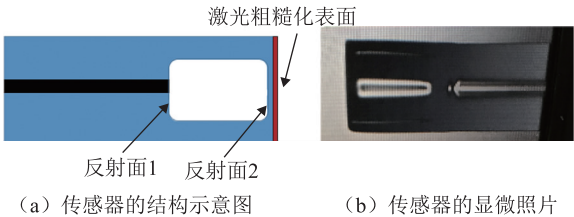


图 21 光纤微纳高温压力传感器的制作过程

首先,在室温下对压力测量系统进行加压测试,从 0 MPa 一直到 10 MPa 为止,每次升高 1 MPa,待实验装置内的压力稳定后,记录下光纤压力测试系统和标准压力计的压力读数。升高温度,从室温开始至 800℃,每次升高 100℃,重复压力测量操作,记录相关数据。对微纳光纤 FP 高温压力传感器在各温度点下的腔长/压力特性进行了研究。

图 22 为微纳光纤 FP 高温压力传感器在各温度点下的腔长差/压力特性拟合直线,其中,腔长差是指在某温度点待测压力下 FP 腔长与该温度点下 0 MPa 时 FP 腔长的差值。从图 22 可知,传感器的灵敏度约为 70 nm/MPa,随着测试环境温度的变化而略有不同。测量了 800℃ 以下压力测试系统在 0~10 MPa 范围内的压力响应,实验证明该测试系统在各温度点下的压力测量误差都在 0.2 MPa 以下。在测试过程中,对测试系统的压力分辨力进行了考察,对几个温度点下的不同压力值进行了连续的测量,测量值的波动范围小于 ± 0.02 MPa,测试系统的分辨力小于 0.02 MPa。在室温、360℃ 和 800℃ 温度点下的压力测试结果如图 23 所示。从图 23 可以看出,测试系统在不同温度点下都具

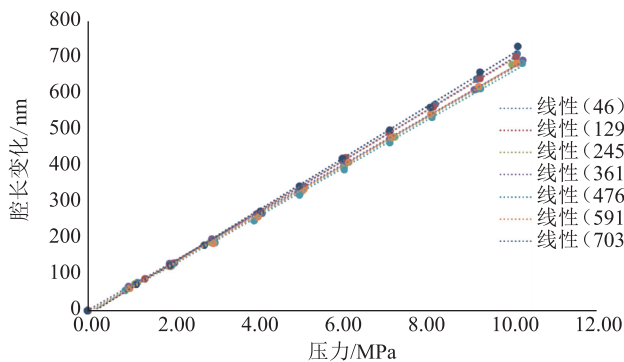


图 22 各温度点下压力传感器的腔长差/压力特性

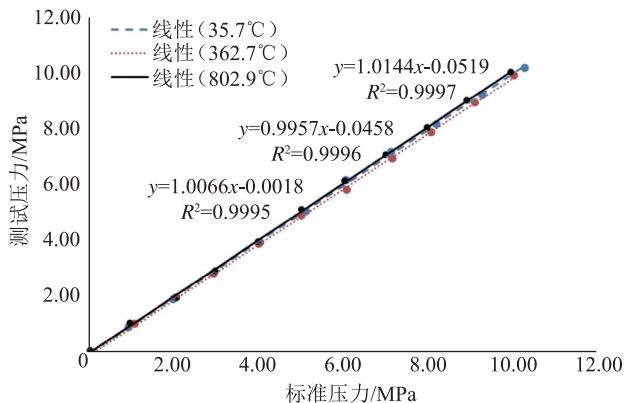


图 23 35.7, 362.3, 802.9℃ 时压力测量情况

有良好的线性和精确度,测试压力与标准压力吻合的非常好。实验证明,光纤白光干涉高温压力测量系统能够满足室温到 800℃ 的温度环境下测量 10 MPa 及以下压力的要求,传感器具有承受 1200℃ 高温冲击的能力。系统的测量误差小于 0.2 MPa,测量分辨力小于 0.02 MPa,同时具有体积小、响应速度快、抗电磁干扰、可靠性高等特性。在航空航天、油气开采冶炼、军事工业等领域具有良好的应用前景。

4) 光纤白光干涉高温应变测量系统

光纤白光干涉高温应变测量系统包括光纤白光干涉应变解调仪和高温 EFPI 应变传感器。光纤白光干涉应变解调仪基于光纤白光干涉测量技术,通过测量 EFPI 传感器的腔长,经过腔长/应变转化,得到应变值^[23]。高温 EFPI 应变传感器的基本结构是在两段切割平整的单模光纤之间熔接一段空心光纤,由此形成两个平行的空气-玻璃界面,从而形成 FP 腔。两个界面的后向反射光发生干涉。其基本结构如图 24(a)所示,图 24(b)是显微镜拍摄的传感器实物照片。这种高温 EFPI 应变传感器是一种双光束干涉仪,通过光纤白光干涉测量技术可以测得其腔长。

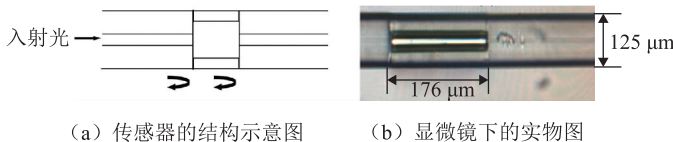


图 24 高温 EFPI 应变传感器

将高温 EFPI 应变传感器固定在被测物体表面,当被测物体发生形变时,该传感器的腔长 d 也随之发生相同的形变,根据腔长的改变量即可得到被测物体的应变值 ε 。

$$\varepsilon = \frac{d' - d}{d} \quad (18)$$

式中: d 为原始腔长; d' 为形变后的腔长。可见该应变测量系统通过测量 EFPI 的腔长,直接获得应变值,不需要做事先的标定。

对贴有传感器的梁施加不同的力,使其发生形变,随着所施加的力不断增大,梁的形变也不断增大,直至应变仪显示的应变值达到约 1500 $\mu\varepsilon$ 时停止,同时记录下白光干涉应变解调仪与电阻应变仪的读数。实验结果如图 25 所示,腔长的变化已经转换为应变。光纤高温应变测量系统表现出非常好的线性, R^2 达到 0.99998,灵敏度为 0.17 nm/ $\mu\varepsilon$ 。

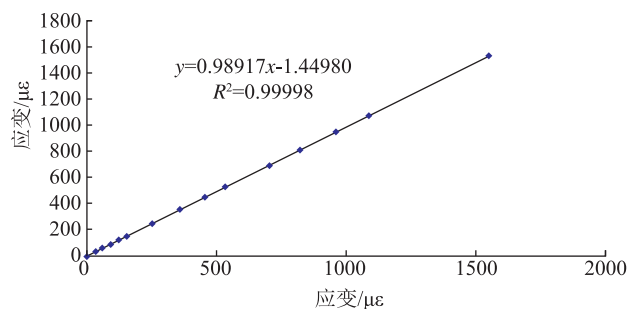


图25 EFPI应变传感器与电阻应变片测量结果对比曲线

为了考查测量系统的测量分辨力,在应变量为 $48\ \mu\varepsilon$ 时,连续测量的腔长数据显示其腔长的波动幅度为 $1.7\ \text{nm}$ 。光纤白光干涉高温应变测量系统的腔长测量误差可达 $\pm 1\ \text{nm}$,测量灵敏度为 $0.2\ \text{nm}$ 。根据前文所得到的应变灵敏度,可知光纤白光干涉高温应变测量系统的测量灵敏度为 $1\ \mu\varepsilon$ 。实验结果表明,光纤白光干涉高温应变测量系统的腔长变化灵敏度为 $0.17\ \text{nm}/\mu\varepsilon$,测量灵敏度为 $1\ \mu\varepsilon$,应变线性度可达 0.99998 ,应变测量范围在 $20000\ \mu\varepsilon$ 以上,温度的交叉影响灵敏度为 $0.1\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。此测量系统具有耐高温、低成本、精度高、重复性好、测量范围大、线性度高、对温度不敏感等优势,能够满足在 $1000\ ^\circ\text{C}$ 以下,精确测量应变的需求,在国防军工、航空航天领域具有很大的应用潜力。目前,应用该传感器已经完成某重大项目外壳的高温环境下的应变测试工作。

3 小结

光谱域光纤白光干涉测量技术具有精度高、动态范围大、工程实用性强等优点,在光纤传感技术和精密测量领域有广泛的应用价值。不仅可以用于光纤干涉型传感器的绝对光程差测量,还可以用于微小距离的测量,与扫描系统结合就可以形成高精度的二维表面型测量仪器。本文回顾了光纤光谱域白光干涉测量技术的发展历程,主要聚焦本研究小组在此领域所做的工作,并展示了该技术在光纤高精度压力传感器、光纤高温温度传感器、光纤高温压力传感器及光纤高温应变传感器中的应用。目前,这一技术已经能够达到优于 nm 级的测量分辨力。重点研究的方向有两个:一是研究更长和更短光程差的光纤 WLI;另一个是高速 WLI。随着这一技术的发展和成熟,将会出现更多新的应用。

参 考 文 献

[1] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
[2] 江毅. 光纤白光干涉测量技术新进展[J]. 中国激光,

2010, 37(6): 1413 – 1420.

- [3] Zhu Y, Huang Z, Shen F, et al. Sapphire-fiber-based white-light interferometric sensor for high-temperature measurements [J]. Optics Letters, 2005, 30(7): 711 – 713.
- [4] Yi Jiang. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by peak-to-peak method[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 925 – 932.
- [5] 张瑞君. 波长可调谐 DFB 激光器及其进展[J]. 集成电路通讯, 2006(2): 42 – 47.
- [6] Yuan L B. Multiplexed, white-light interferometric fiber-optic sensor matrix with a long-cavity, Fabry-Perot resonator [J]. Applied Optics, 2002, 41(22): 4460 – 4466.
- [7] 张小云, 章鹏, 符欲梅, 等. 基于光楔的光纤法珀应变传感器解调系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2006(增刊): 432 – 435.
- [8] Yi Jiang. Fourier Transform White-Light Interferometry for the Measurement of Fiber Optic Extrinsic Fabry-Perot interferometric Sensors[J]. IEEE Photon. Tech. Lett., 2008, 30(2): 75 – 77. doi: 10.1109/LPT.2007912567.
- [9] Jiang Y, Tang C. Fourier transform white-light interferometry based spatial frequency-division multiplexing of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 106105.
- [10] Liu T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry - Perot sensor system for strain and displacement measurements [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(3): 1275 – 1278.
- [11] Jiang Y. Fourier - transform phase comparator for the measurement of extrinsic Fabry - Perot interferometric sensors [J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2008, 50(10): 2621 – 2625.
- [12] Jiang Y, Tang C J. A high-resolution technique for strain measurement using an extrinsic Fabry Perot interferometer (EFPI) and a compensating EFPI[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(6). doi: 10.1088/0957-0233/19/6/065304.
- [13] Jiang Y, Liang P J, Jiang T. Direct measurement of optical phase difference in a 3×3 fiber coupler[J]. Optical Fiber Technology, 2010, 16(3): 135 – 139. doi: 10.1016/j.yofte.2010.02.005.
- [14] Jiang Y. Wavelength-scanning white-light interferometry with a 3×3 coupler-based interferometer[J]. Optics Letters, 2008, 33(16): 1869 – 1871.
- [15] Jiang Y. Four-element fiber Bragg grating acceleration sensor array[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2008, 46(9): 695 – 703. doi: 10.1016/j.optlaseng.2008.03.020.
- [16] Jiang Y, Ding W, Liang P, et al. Phase-Shifted White-Light

Interferometry for the Absolute Measurement of Fiber Optic Mach - Zehnder Interferometers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(22): 3294 - 3299.

[17] Wang Z, Jiang Y. Wavenumber scanning-based Fourier transform white-light interferometry [J]. Applied Optics, 2012, 51(22): 5512 - 6.

[18] Wang Zhen, Jiang Yi, Ding Wenhui, et al. A cross-correlation based fiber optic white-light interferometry with wavelet transform denoising[C]// Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference. 2013, 8924(5): 89241J.

[19] Gao Hongchun, Jiang Yi, Zhang Liuchao, et al. Five-step

phase-shifting white-light interferometry for the measurement of fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometers[R].

[20] 高红春, 江毅, 李宝娟, 等. 高温光子晶体光纤温度传感器[J]. 光学技术, 2017, 43(6): 538 - 541.

[21] Ding W H, Jiang Y. Miniature Photonic Crystal Fiber Sensor for High-Temperature Measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 786 - 789.

[22] 江毅, 马维一, 陈淑芬, 等. 微纳光纤高温压力传感器[J]. 光学技术, 2017, 43(1): 12 - 15.

[23] 江毅, 贾景善, 付雷, 等. 外腔式光纤 Fabry-Perot 干涉型高温应变传感器[J]. 光学技术, 2017, 43(5): 423 - 426.

基金项目: 国家 863 项目(2015AA043504); 国家自然科学基金项目(61575021, 61775020)

作者简介



江毅(1967 -), 四川宜宾人, 光电学专家, 北京理工大学教授, 博导, 主要研究方向为光纤传感器。2007 年入选教育部新世纪优秀人才。长期从事光纤传感器和光纤测量仪器的研究, 研究内容包括: 光纤白光干涉测量术, 光纤激光干涉测量术, 高精细度的光纤法珀干涉仪(可调谐滤波器和传感器), EFPI 传感器, 光纤光栅传感器及解调仪, 微纳光纤传感器, 光纤高温传感器, MEMS 光纤传感器, 光纤光源等。先后承担数十余项科研项目。发表论文 100 余篇, 其中发表 SCI 论文 60 余篇, 授权发明专利 11 项, 出版专著 2 部, 获教育部自然科学一等奖一次, 兵器科技进步三等奖一次。指导的博士生获首届中国光学学会优秀博士论文。