

正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量 精度测试与分析

杨振宇 王 鸣 夏 巍 郝 辉 郭冬梅

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210046)

摘要 介绍了正弦相位调制型激光自混合干涉仪位移测量原理、光路搭建和信号处理方法。正弦相位调制由外腔中的电光晶体引入, 调制后的自混合干涉信号采用傅里叶分析的方法完成相位解调。这项技术已经应用于纳米精度微位移测量, 为了拓展其应用领域, 将该技术应用于大范围位移测量。在实验过程中, 使用自混合干涉仪和 Agilent 5529A 校准仪同时对大尺度和小尺度范围内的位移进行测量, 通过比较测量结果来检验干涉仪的性能。实验结果表明, 在普通的实验室噪声环境中, 自混合干涉仪在毫米范围内的位移测量精度在亚微米量级, 在微米和纳米范围内的位移测量精度分别可以达到 18 nm 和 7 nm。并分析了位移测量过程中的误差来源, 分析结果与实验相符。

关键词 测量; 自混合干涉; 位移测量; 相位调制; 相位解调

中图分类号 O436; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0412007

Testing and Analysis of Large-Range Displacement Measurement Precision in Sinusoidal Phase-Modulating Self-Mixing Interferometer

Yang Zhenyu Wang Ming Xia Wei Hao Hui Guo Dongmei

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology of Jiangsu Province, College of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract The displacement measurement theory, the optical path construct and the signal processing method of the sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer are proposed in detail. Phase modulation is introduced by electro-optic crystals in the external cavity and modulated self-mixing interference signal demodulation is achieved by Fourier analysis method. This technique has been used in micro-displacement measurement with nanometer accuracy, which is applied to large range displacement measurement. Agilent 5529A calibrator is included in the displacement measurement both in small and large ranges to evaluate the performance of the interferometer during the experiment. Experimental results show that the range of millimeters displacement is measured at sub-micrometer accuracy and the range of micrometers and nanometer displacement measurement can reach accuracy of 18 nm and 7 nm respectively in the common laboratorial environment. The error source in the measuring process is analyzed, and the results obtained are conformed to that of the experiments.

Key words measurement; self-mixing interference; displacement measurement; phase modulation; phase demodulation

OCIS codes 120.3180; 120.3930; 120.5060; 120.5050

1 引 言

随着半导体器件、先进制造产业和生物医学等

科研领域的飞速发展, 具有大范围纳米精度的位移测量技术已经成为目前工业发展和科学发展中迫切

收稿日期: 2012-11-21; **收到修改稿日期**: 2012-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(91123015, 61178044)资助课题。

作者简介: 杨振宇(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光自混合干涉进行微纳米测量方面的研究。

E-mail: zhenyu1019@foxmail.com

导师简介: 王 鸣(1950—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光自混合有源集成传感技术、光纤 MEMS 器件的制作和光纤传感技术等方面的研究。E-mail: wangming@njnu.edu.cn(通信联系人)

需要解决的问题^[1~3]。例如,半导体工业中的高精度模板的制造和定位、集成电路芯片表面形貌测量以及微机电技术中微纳米零部件的制造与检测,都迫切需要纳米精度大范围的测量技术。现有的纳米测量技术主要分为非光学方法和光学方法两大类,前者包括扫描探针显微镜,电容、电感测微法等;后者则包含了各种类型的光学干涉仪。虽然非光学测量方法诸如原子力显微镜(AFM)及X射线干涉仪可以实现皮米量级的测量精度,但是这些测量仪只有几十微米的测量范围,并且在溯源到米定义的时候,仍然需要利用激光干涉仪等光学方法进行标定和校正,因此光学纳米测量方法的研究在世界上备受重视^[4]。此外,光学方法还具有测量范围大、速度快、可以进行非接触测量等特点,更有应用到工业和科学发展中的优势。

相对于传统的激光干涉方法,激光自混合干涉仪(SMI)以其固有的结构简单、紧凑、易准直和不依赖光学相干长度等特点^[5],在振动测量、位移测量以及速度测量等方面得到了广泛应用^[6~10]。为了改善干涉仪的位移测量分辨率,研究人员围绕自混合干涉系统的调制解调方法开展了大量研究^[11~13]。其中正弦相位调制(SPM)干涉测量技术具有精度高、在实际系统中易于实现等优点,非常适合于高速、大范围的位移测量^[14~16]。采用电流调制的半导体激光器(LD)正弦相位调制干涉仪已经被报道,测量精度可以达到纳米量级^[17]。但这种测量方法在注入电流调制LD波长的同时,LD的输出光强也受到了调制,改变了干涉信号的频谱分布,降低了测量精度^[18]。为了消除光强调制的影响,郭冬梅等^[18]提出了一种正弦相位调制自混合干涉技术,利用电光晶体对光束进行纯相位调制,从而彻底消除了光强调制的影响,并且通过位移测量结果与压电陶瓷运动参数的一致性验证了测量方法的可行性。为了拓展干涉仪在大尺度位移测量领域的应用,更全面地评价自混合干涉仪对大范围位移测量的性能,设计了基于Agilent 5529A校准仪的正弦相位调制型激光自混合干涉仪测量系统,使用Agilent 5529A校准仪为位移测量结果提供了一个评判标准,实现了大尺度位移的测量和评估。

本文介绍了一种正弦相位调制激光自混合干涉仪,通过激光器外腔中的电光晶体引入正弦相位调制,在频域中对干涉信号进行处理精确计算干涉信号的相位,实现了纳米量级的测量分辨率。分别在毫米、微米及纳米尺度下,对比了正弦相位调制型自

混合干涉仪和Agilent 5529A校准仪的位移测量结果,并对测量误差进行了分析,为系统能够实现高精度位移测量的可行性提供了依据。

2 测量原理

正弦相位调制型自混合干涉仪原理图如图1所示,图中ND为可调衰减片,EOM为电光调制器,PD为光电探测器,氦氖激光器发出的线偏振光经过可调衰减片,电光晶体正弦相位调制后,由外腔反射镜反馈回激光腔内,形成了受正弦调制的自混合干涉效应。引起的激光功率变化可以通过放置在激光器尾部的光电探测器接收,然后把信号发送给信号处理装置来重构目标物体的位移。

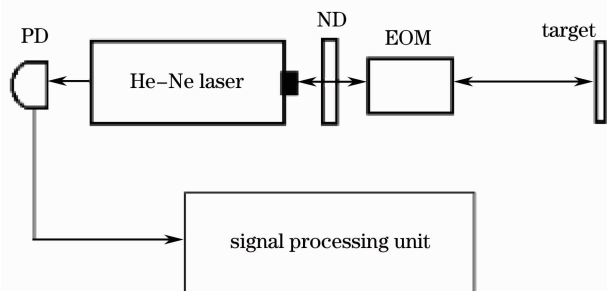


图1 正弦相位调制型自混合干涉仪的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the self-mixing interferometer with sinusoidal phase modulation

假设自混合干涉系统工作在弱反馈情况下,忽略光在外腔中的多重反馈效应,经过正弦相位调制后的自混合干涉信号可以表示为^[14]

$$I(t) = I_0 \{1 + m \cos[\varphi(t) + \psi(t)]\}, \quad (1)$$

$$\varphi(t) = 4\pi nL(t)/\lambda_0, \quad (2)$$

式中 I_0 为无光反馈时的初始光强, m 为光强调制深度, $\varphi(t)$ 为光束外腔相位延迟, n 为空气折射率, $L(t)$ 为外腔长度, λ_0 为激光波长, $\psi(t)$ 为由电光晶体引起的相位变化。若电光晶体对光束正弦相位调制幅度是 a ,调制角频率和初始相位分别为 ω_m 和 β ,考虑到自混合干涉时光束两次经过电光晶体,所以由正弦相位调制引起的相位变化 $\psi(t) = 2a \sin(\omega_m t + \beta)$ 。将 $\psi(t)$ 代入(1)式按贝塞尔函数开,可以得一次和二次谐波的强度^[13]:

$$A_1 = 2mI_0 \sin \varphi(t) J_1(2a), \quad (3)$$

$$A_2 = 2mI_0 \cos \varphi(t) J_2(2a), \quad (4)$$

式中 J_1 和 J_2 为贝塞尔函数。将 A_1 和 A_2 相除消除常数项,可以解调出相位 $\varphi(t)$ 为

$$\varphi(t) = \arctan \left[\frac{J_2(2a)}{J_1(2a)} \cdot \frac{A_1(t)}{A_2(t)} \right]. \quad (5)$$

由(5)式计算得到 $\varphi(t)$ 数值在 $(-\pi, +\pi)$ 范围内,当位移范围大于 $\lambda/4$ 时, $\varphi(t)$ 的测量曲线发生跳变,所以 $\varphi(t)$ 的实际数值通过解包裹运算来恢复。最后根据(2)式可以计算出待测物体的位移。从理论上说,这种解调技术可以实现任意精度的位移测量。

3 位移测量的实现

根据测量原理的描述,实现目标物体位移测量包括光路搭建和干涉信号处理。

3.1 光路搭建

带有 Agilent 5529A 校准装置的正弦相位调制型自混合干涉仪实验装置示意图如图 2 所示,其中光路搭建分为两个部分:自混合干涉仪部分和校准部分。自混合干涉仪部分主要包括线偏振氦氖激光器(632.8 nm)、可调衰减片、电光晶体、平移台和待测靶镜。安装过程中要保证激光束的偏振方向与电光晶体的主轴方向平行,使电光晶体对激光束进行纯相位调制。调节可调衰减片,使系统工作在弱反馈条件下。实验过程中,由信号发生器发出正弦信号,

经过功率放大器放大,将正弦电压信号输送给电光晶体(New Focus 4002),由于电光效应可以直接对激光束进行正弦相位调制。目标靶镜的靶面是反射率为 0.4 的硅片,靶镜固定在平移台上,通过目标靶镜完成对平移台位移的测量。在毫米尺度的位移测量过程中,选用由松下伺服电机驱动的电动平移台获得位移,电动平移台的最大位移范围为 300 mm,分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 。在进行微米和纳米尺度的位移测量时,换用 PI 公司的微动平移台(P762.2L),微动平移台的最大移动范围为 $150 \mu\text{m}$,定位精度可以达到 1 nm。校准部分主要使用了安捷伦公司的双频干涉仪(Agilent 5529A),用来评估自混合干涉仪的性能。在实验过程中 Agilent 5529A 校准仪通过固定在平移台上的测量角锥棱镜 M_2 同时对待测物体位移进行测量,测量精度可以达到 1 nm,为自混合干涉仪提供了一个位移测量标准。在安装过程中,要保证 Agilent 5529A 校准仪和自混合干涉仪测量光束共轴,并与平移台移动方向平行。

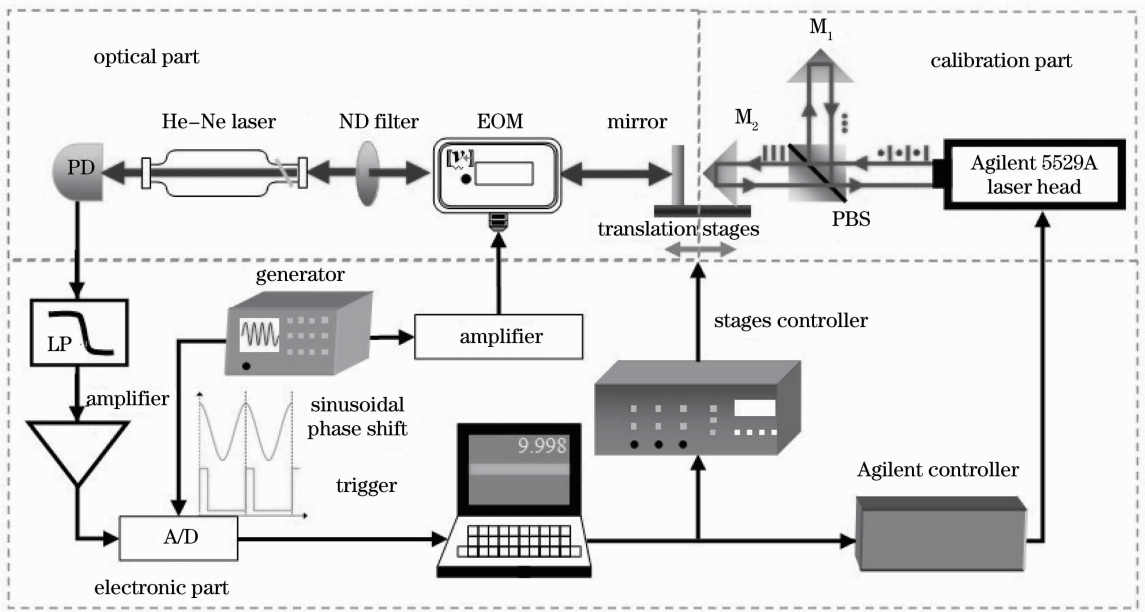


图 2 带有 Agilent 5529A 校准装置的正弦相位调制型自混合干涉仪实验装置

Fig. 2 Experimental setup of sinusoidal phase-modulated laser self-mixing interferometer with Agilent 5529A calibrator

3.2 干涉信号处理

干涉信号处理由图 2 中的电学部分完成,处理的过程如图 3 所示。主要分为两个模块:外部处理模块和内部处理模块。实验中,计算机控制平移台带动靶镜运动,产生的正弦调制的自混合干涉信号被后项 PD 探测。然后经过低通滤波和放大,将信号输送给采集卡,由采集卡将模拟信号转变为数字

信号输送给内部处理模块。其中采集卡采集信号的触发信号是由电光晶体的信号发生器 TTL 电平提供,在内部模块 Labview 程序设置触发端遇到第一个上升沿开始采样,这样可以得到初始相位为 $\pi/2$ 的正弦调制信号,如图 2 所示。内部模块的信号处理主要通过 Labview 软件编程来实现。对采集到的数字干涉信号进行快速傅里叶变换(FFT),变换

后的干涉信号一次谐波和二次谐波角频率分别以 ω_m 和 $2\omega_m$ 为中心。将变换得到的频谱送给矩形带通滤波器,通过设置两个矩形窗口: $\omega_m/2 < \omega < 3\omega_m/2$ 和 $3\omega_m/2 < \omega < 5\omega_m/2$, 分别滤出一次谐波和二次谐波。对过滤的部分进行快速逆傅里叶变换 (IFFT),通过移除载波,便可以获得一次和二次谐

波的幅度。然后,利用(5)式,计算出在 $(-\pi, +\pi)$ 包裹相位,再通过一个相位解包裹单元,恢复测量目标的相位。根据(2)式就能得到目标物体的位移。平移台在运动的过程中,Agilent 5529A 校准仪同时测量这部分位移,将测量的数据通过安捷伦控制器输送给计算机,用来对比和评估实验结果。

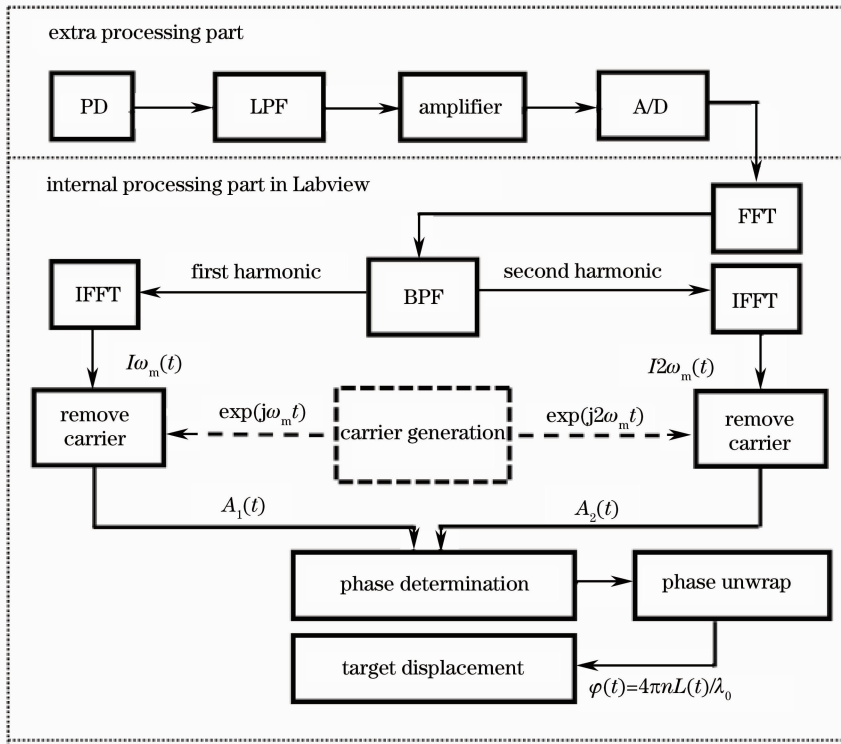


图 3 正弦相位调制型自混合干涉仪信号处理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the signal processing of sinusoidal phase-modulating SMI

4 实验结果

4.1 毫米位移测量

毫米位移测量采用电动平移台驱动靶镜运动,电动平台移动的范围设置为 100 mm,每次匀速步进 5 mm,移动速度设置为 2.5 mm/s,步进 20 次。自混合干涉仪和 Agilent 5529A 校准仪同时对每次位移进行测量,单次测得的动态过程如图 4 所示,实线代表自混合干涉仪测量的结果,虚线代表双频干涉仪的测量结果。以 Agilent 5529A 校准仪测量结果为标准值,用自混合干涉仪测量的结果与标准值进行比较,100 mm 内的位移测量结果如图 5 和表 1 所示。实验结果表明自混合干涉仪和 Agilent 5529A 校准仪的测量结果符合得很好,能够实现毫米范围内的位移测量,具有亚微米测量精度。

4.2 微米位移测量

微米位移测量采用微动平移台驱动靶镜,微动

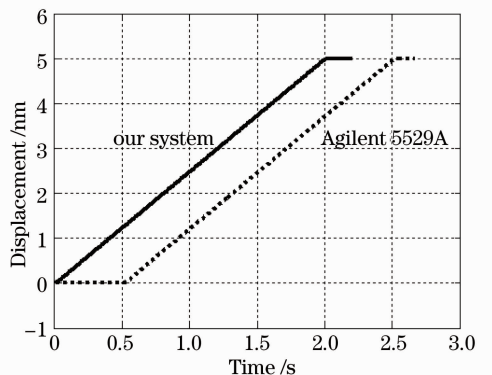


图 4 5 mm 动态位移测量比较

Fig. 4 Comparison of dynamic displacement measurements in 5 mm

平移台移动范围设置为 100 μm ,每次步进 5 μm ,运动速度设置在 50 $\mu\text{m}/\text{s}$,步进 20 次。采用同样的方法对每步进行测量和对比,测量结果如图 6 和表 2 所示。实验结果表明自混合干涉仪和 Agilent

5529A 校准仪的测量结果符合得很好,能够实现微米范围内的位移测量,具有纳米测量精度。

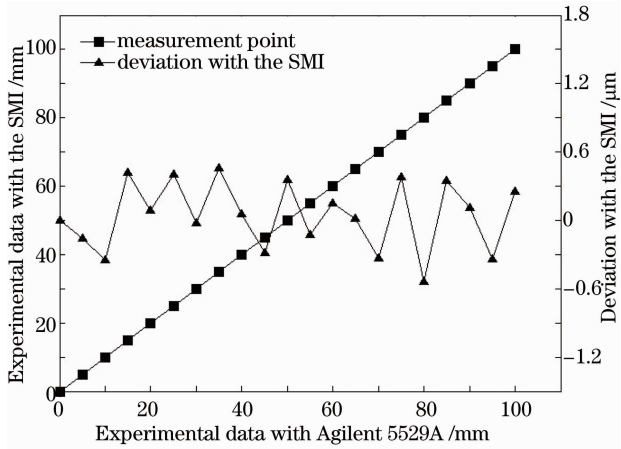


图 5 毫米范围内位移测量比较

Fig. 5 Comparison of displacement measurements in millimeter range

表 1 毫米范围内位移测量结果

Table 1 Displacement measurement results in millimeter range

System	Averaged error / μm	Standard deviation / μm	Maximum error / μm	Linearity coefficient
SMI	0.0424	0.2973	0.5353	0.9999

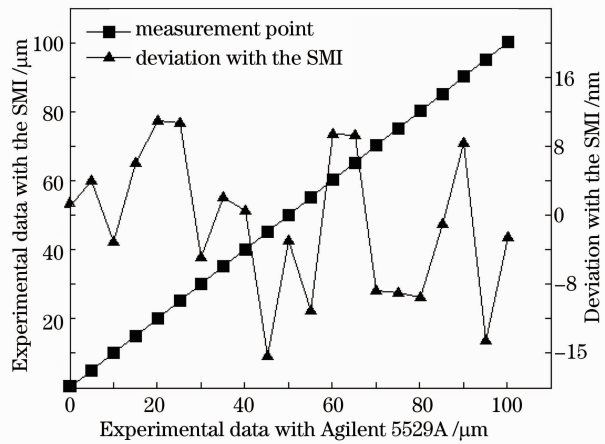


图 6 微米范围内位移测量比较

Fig. 6 Comparison of displacement measurements in micrometer range

表 2 微米范围内位移测量结果

Table 2 Displacement measurement results in micrometer range

System	Averaged error /nm	Standard deviation /nm	Maximum error /nm	Linearity coefficient
SMI	-1.0218	8.4009	16.3333	0.9984

4.3 纳米位移测量

纳米位移测量也采用微动平移台驱动靶镜,微动平移台移动的范围设置为 500 nm,每次步进 25 nm,运动速度为 250 nm/s,步进 20 次。采用同样的方法对每步位移进行测量和对比,测量结果如图 7 和表 3 所示。实验结果表明自混合干涉仪和 Agilent 5529A 校准仪的测量的结果符合得很好,能够实现纳米范围的位移测量,具有纳米测量精度。

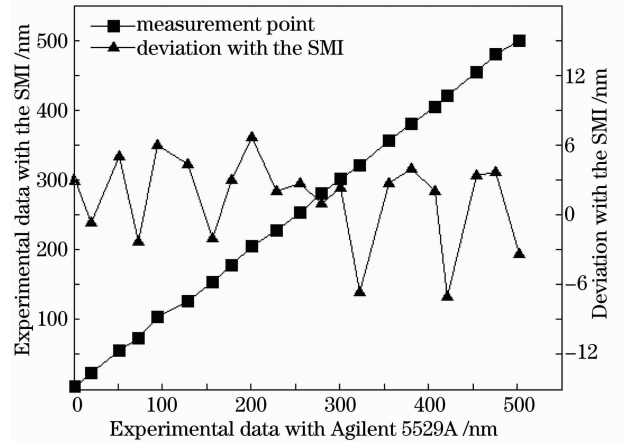


图 7 纳米范围内位移测量比较

Fig. 7 Comparison of displacement measurements in nanometer range

表 3 纳米范围内位移测量结果

Table 3 Displacement measurement results in nanometer range

System	Averaged error /nm	Standard deviation /nm	Maximum error /nm	Linearity coefficient
SMI	1.4603	3.7954	7.00	0.9965

4.4 定点测试稳定性

图 8 为实验过程中目标在静止情况下 30 s 内

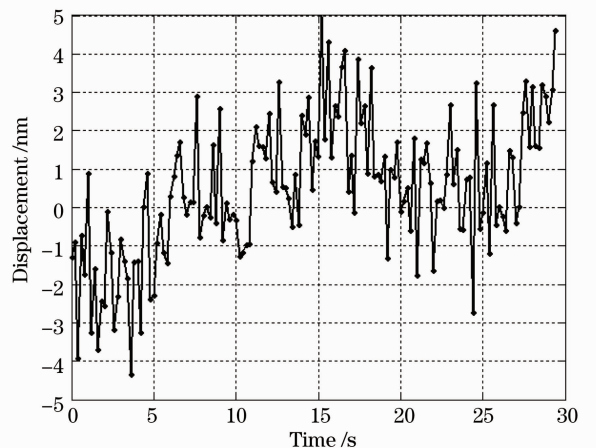


图 8 位移测量中的噪声

Fig. 8 Noises in the displacement measurement

位移测量结果。目标位移的变化主要由高频噪声和低频噪声引起的,其中高频噪声主要由于光学频率的波动和电子设备的性能引起的,低频噪声主要由于环境的波动。实验结果表明 30 s 内最大位移波动小于 10 nm,均方根为 1.8066 nm。

5 误差分析

从(2)式可知,影响测量精度的误差来源主要有空气折射率的变化,激光频率的稳定性和相位测量的精度。所以自混合干涉仪的位移不确定度表达式可表示为

$$\delta\Delta L = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{n}\delta n\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\lambda_0}\delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{4\pi n}\delta\Delta\varphi\right)^2}, \quad (6)$$

式中 ΔL 为测量的位移, n 和 δn 为空气折射率和空气折射率不确定度, λ_0 和 $\delta\lambda$ 为中心波长和波长不确定度, $\delta\Delta\varphi$ 为相位测量的不确定度。

根据 Edlen 公式,空气折射率变化可表示为

$$\Delta n_{\text{tpf}} = [0.00268(P - P_0) - 0.929(T - T_0) - 0.00042(f - f_0)] \times 10^{-6}, \quad (7)$$

假设测量环境初始条件:空气压强 $P_0 = 101325$ Pa,环境温度 $T_0 = 20$ °C,环境湿度 $f_0 = 1333$ Pa。每次测量过程通常控制在 2 s 内,通过温度、湿度和压强传感器可知:在这个过程中温度的最大波动只有 1 °C,湿度和压强不变。根据(7)式可以计算出折射率的变化为 $\delta n \approx 0.929 \times 10^{-6}$ 。

根据氦氖激光器的参数:中心波长为 632.8 nm,频率达稳定性在 1.5×10^{-6} 。所以波长不确定度 $\delta\lambda$ 为

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{c}\delta\nu \approx 0.9492 \times 10^{-3} \text{ nm}. \quad (8)$$

由于电光晶体的相位调制不稳定,给相位测量带来误差。假设相位调制深度与预期值偏差为 $\delta_a(t)$,那么正弦相位调制引起的相位变化表达式变成为

$$\psi_a(t) = 2[a + \delta_a(t)]\sin(\omega_m t + \beta), \quad (9)$$

假设相位调制深度的偏差 $\delta_a(t)$ 为高斯噪声,当目标物体运动 ΔL 时,由于 $\delta_a(t)$ 的影响带来的相位测量不确定度为

$$\delta\Delta\varphi = 2\delta_a \sin(\omega_m t + \beta) \leq 2|\delta_a|, \quad (10)$$

实验中采用的电光晶体对相位调制信噪比大于 1000,调制深度 a 设置为 1.22 rad,噪声引入偏差 $\delta_a(t) < 0.00122$ rad,所以 $\delta\Delta\varphi < 0.00244$ rad。

再根据(6)式可以得到,当测量范围在 100 mm 和 100 μm 以内,位移测量不确定度 $\delta\Delta L$ 分别小于

176.44 nm 和 0.22 nm。计算结果表明正弦相位调制自混合干涉仪可以实现高精度位移测量。

6 结 论

开发了一种带有 Agilent 5529A 校准装置的正弦相位调制型自混合干涉仪实验装置。详细的介绍了正弦相位调制型干涉仪的测量原理、光路搭建和信号处理过程,对比了该装置和 Agilent 5529A 校准装置在大尺度和小尺度范围内的位移测量结果,并对测量误差进行了分析。实验结果和误差分析结果表明:正弦相位调制型自混合干涉仪可以应用到大尺度和小尺度范围内的高精度位移测量。

参 考 文 献

- H. Bosse, G. Wilkening. Developments at PTB in nanometrology for support of the semiconductor industry [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2005, **16**(11): 2155~2166
- H. Martinussen, A. Aksnes, H. E. Tngan. Wide frequency range measurements of absolute phase and amplitude of vibrations in micro- and nanostructures by optical interferometry [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11370~11384
- L. Chassagne, M. Wakim, S. Xu *et al.*. A 2D nano-positioning system with sub-nanometric repeatability over the millimeter displacement range [J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2007, **18**(11): 3267~3272
- Cheng Xiaohui, Zhao Yang, Li Dacheng. Review on optical nanometrology [J]. *Optical Technique*, 1999, **33**(3): 73~77
程晓辉, 赵洋, 李达成. 光学纳米测量方法及发展趋势[J]. *光学技术*, 1999, **33**(3): 73~77
- Hu Xianfeng. Attenuation of self-mixing interference signal of laser diode with external-cavity length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0514002
胡险峰. 激光二极管自混合干涉信号随外腔长度衰减[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0514002
- G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati *et al.*. Laser diode self-mixing technique for sensing applications [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, **4**(6): S283~S294
- Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1122~1126
王鸣, 聂守平, 李达成. 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1122~1126
- Lu Min, Wang Ming, Hao Hui. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 190~194
陆敏, 王鸣, 郝辉. 半导体激光器的自混合散斑干涉测量流体速度[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 190~194
- Lü Liang, Huang Yang, Yu Benli. Cantilever vibration characteristics based on laser self-mixing interference effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208008
吕亮, 黄样, 俞本立. 基于激光自混合干涉效应的悬臂梁振动特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0208008
- Chen Shijia, Han Daofu, Ma Li. Autocorrelation-based velocity measurement of self-mixing speckle in fiber ring laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 030601
陈世佳, 韩道福, 马力. 环形光纤激光器自混合散斑自相关测速的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 030601
- Ma Junshan, Sun Xiaoming, Yu Yanguang. Summarization of

- measurement technique based on self-mixing interference effect in laser [J]. *J. Astronautic Metrology and Measurement*, 1997, **17**(6): 1~7
- 马军山, 孙晓明, 禹延光. 激光自混合干涉测量技术综述[J]. 宇航计测技术, 1997, **17**(6): 1~7
- 12 Zhang Shulian. Laser feedback technique and progress [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(11): 65~71
- 张书练. 激光回馈技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(11): 65~71
- 13 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Self-mixing interferometry of dual external cavities and its signal analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 729~733
- 王 鸣, 聂守平, 李达成. 两重外腔的自混合干涉及信号分析 [J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 729~733
- 14 U. Zabit, O. D. Bernal, T. Bosch *et al.*. MEMS accelerometer embedded in a self-mixing displacement sensor for parasitic vibration compensation [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(5): 612~614
- 15 P. Groot. Design of error-compensating algorithms for sinusoidal phase shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(35): 6788~6796
- 16 D. Guo, M. Wang, S. Tan. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5): 1537~1543
- 17 O. Sasaki, H. Okazaki. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(18): 3137~3140
- 18 Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 845~850
- 郭冬梅, 谈苏庆, 王 鸣. 正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 845~850

栏目编辑：何卓铭