

实时测量表面形貌的抗振抗干扰 半导体激光干涉仪

何国田^{1,2,3} 曾 智¹ 李 明¹

(¹重庆师范大学物理学与信息技术学院,重庆 400047; ²重庆大学光电工程学院,重庆 400030)
³中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室,上海 201800)

摘要 在实时干涉测量中,环境温度变化、空气扰动和系统内部参数漂移都会导致相位测量误差,尤其在高精度测量场合,这种误差的影响尤其明显。为此,提出了抗干扰滤波鉴相式半导体实时正弦相位调制(SPM)面形干涉测量技术,阐明其工作原理,并用硬件实现实时鉴相与扩大量程。该反馈控制系统利用光电检测器(PD)从干涉信号中取出一点的干涉信号作反馈信号注入半导体激光器(LD),使其波长改变,将外界干扰产生的相位误差减小到可以忽略的程度,从而大大降低外部干扰对测量精度的影响。利用归一化技术消除系统内部光路参数、电路参数漂移对测量精度的影响。对于 70×70 个测量点,其重复测量精度约为 3 nm,测量时间小于 12 ms。

关键词 光学器件; 表面形貌; 实时测量; 正弦相位调制干涉; 抗干扰; 半导体激光

中图分类号 O436; TH744.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200929s1.0216

Real-Time Surface Profile Measurement in a Laser Diode Interferometer Insensitive to Disturbance

He Guotian^{1,2,3} Zeng Zhi¹ Li Ming¹

¹ College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

² College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

³ Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract During the real-time interferometry, the phase measurement error may be caused by any of the ambient temperature fluctuation and air turbulence and the drift of the system inner parameters, especially in high-accuracy survey occasion, the influence of this error is especially obvious. Therefore, this paper put forward a filtering phase discrimination LD real-time SPM surface profile interferometry insensitive to disturbance, clarified their operating principle. This feedback control system takes out the interference signal of one measured point from the total interference signal as a feedback signal, then injects it into the semiconductor laser to make its wavelength change. So the phase error caused by external interference is reduced to the negligible degree, and the influence to the measurement accuracy caused by external interference is sharply reduced. And the normalization technology is used to eliminate the influence to the measurement accuracy caused by system inner parameters' drift. For 70×70 measured points, its repeatable measurement precision is about 3 nm, measuring time is less than 12 ms.

Key words optical devices; surface profile; real-time measurement; sinusoidal phase modulation; insensitive to disturbance; semiconductor laser

1 引 言

表面形貌加工质量是超精密机械加工、光学加工中需要控制的一个关键因素,它直接影响其机械或光学性能。因此,纳米精度光学表面形貌干涉测

量技术得到了广泛的应用与研究^[1~7]。

1986 年日本 O. Sasaki 提出一种基于正弦相位调制(SPM)的面形干涉测量技术。在参考光路中的反射镜背面粘一锆钛酸铅(PZT),通过施加一正

基金项目: 国家自然科学基金(60674097)和重庆市项目(KJ080821)资助课题。

作者简介: 何国田(1965—),男,教授,主要从事信息光电技术与仪器、磁流变体机制与传感器技术方面的研究。

E-mail: slhgt@siom.ac.cn

弦变化的电压使它沿光轴方向正弦振动,对参考光实现了正弦调制,使干涉信号中含有一个随时间正弦变化的相位调制项。SPM 面形干涉测量技术具有相位调制简单、测量精度高、抗干扰能力强等优点,在表面形貌测量中得到了广泛的应用^[8~12]。可分为非实时测量和实时测量两种类型^[8,13]。T. Suzuki^[11]于 1989 年将锁相技术引入 SPM 干涉仪实现了表面形貌的实时测量,形成了锁相式半导体激光(LD)SPM 干涉仪,但存在测量区域小、实时性差、测量精度较低、抗干扰能力差等不足。2007 年,笔者^[6]提出了滤波鉴相式 LD 实时 SPM 面形干涉测量仪,测量精度达 5 nm。但是,环境振动和空气扰动对正弦相位调制干涉测量结果产生较大影响,主要表现在:

- 1) 干涉条纹不断抖动,不能形成稳定的干涉条纹,振动严重时将不能进行测量;
- 2) 系统电路参数、光路参数引入测量误差。

基于这两点原因,很多测量只能在光学实验室的光学隔振台上进行,严重影响了干涉测量仪的工业在线测量。为此,解决干涉仪的抗振问题,将是干涉测量仪走出实验室,进行工业在线测量的关键科学问题。

本文针对现有实时 SPM 面形干涉测量技术的不足,提出了抗干扰滤波鉴相式 LD 实时 SPM 面形干涉测量仪,对其抗振抗干扰特点进行了分析,阐明其测量原理。并在干扰环境下进行了实时表面测量实验。实验结果验证了该干涉仪实时表面形貌测量能力及抗振抗干扰性能。

2 原 理

环境温度变化、空气扰动都会导致实时干涉测量的相位误差,在高精度测量场合尤其明显,如自然外力振动振幅分布在 0.1~5 μm 左右;交通工具引入的振动为常时振动的 1~10 倍。可见,环境扰动尤其是振动对纳米精度干涉测量的影响是个不容忽视的难题,因此,必须消除这些误差。将干涉仪的干扰分为外部干扰与内部影响,外部干扰指干涉仪周围环境变化引起的相位测量误差,如环境温度变化、干涉仪中两臂空气扰动、机械振动等原因引起相位测量误差。内部影响指干涉仪系统内部光路和电路参数引起的相位测量误差,如随机噪声、系统参数等引起相位测量误差。

实时测量表面形貌的抗干扰半导体激光干涉仪原理图如图 1 所示,其反馈系统由分束器(BS1)、光

电探测器(PD)、反馈电路组成。在直流偏置电流 I_0 与交流成分 $I_m(t) = a \cos(\omega_c t + \theta)$ 的驱动下,LD 的波长被正弦相位调制。在考虑外部干扰的情况下,环境温度变化将引起 LD 中心波长偏移,其偏移量记作 $\Delta\lambda_T(t)$ 。环境振动和空气扰动将使物光和参考光之间光程差发生变化,其变化量记作 Δl_1 。干涉信号可表示为

$$S(x, y, t) = s_1(x, y, t) + s_0(x, y, t) \times \cos[z(x, y) \cos \omega_c t + \alpha_0 + \alpha_r(x, y, t) + \delta_1(x, y, t)], \quad (1)$$

式中 s_1 为信号直流分量, s_0 为信号交流分量的振幅。 z_1 表示正弦相位调制深度,且有 $z_1 = 2\pi\beta a l_1 / \lambda_0^2$, $\alpha_{01} = 2\pi l_1 / \lambda_0$, l_1 为被测物体和参考反射镜之间的初始光程差。 $\alpha(x, y)$ 为被物体表面形貌 $r(x, y)$ 引入的相位。

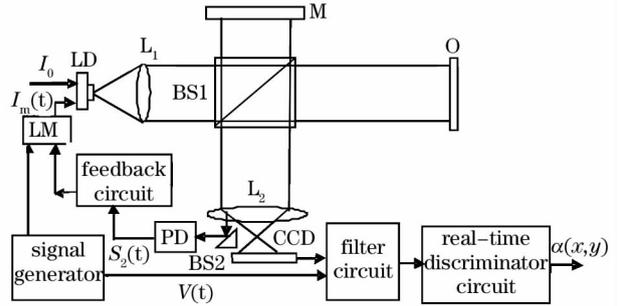


图 1 实时测量表面形貌的抗干扰
半导体激光干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the laser diode interferometer insensitive to disturbance for the real-time surface profile measurement

其中相位误差 $\delta_1(x, y, t)$ 表示为

$$\delta_1(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_1 - \frac{2\pi l_1}{\lambda_0^2} \Delta \lambda_T(t). \quad (2)$$

同样地,PD 接收到单点干涉信号为

$$S_c(t) = \cos[z_2 \cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_{02} + \delta_2(t)], \quad (3)$$

式中 $z_2 = 2\pi\beta l_2 / \lambda_0^2$, $\alpha_{02} = 2\pi l_2 / \lambda_0$ (是一个常数), l_2 为被测物体和参考反射镜之间的初始光程差, $\delta_2(t)$ 表示环境温度变化、环境振动和空气扰动引入的相位误差,它可以表示为

$$\delta_2(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_2 - \frac{2\pi l_2}{\lambda_0^2} \Delta \lambda_T(t), \quad (4)$$

Δl_2 为环境振动和空气扰动引起物光和参考光之间光程差 l_2 发生的变化量。

将(4)式展开得到

$$S_2(t) = \cos[\alpha_{02} + \delta_2(t)] [J_0(z_2) - 2J_2(z_2) \cos(2\omega_c t + 2\theta) + \dots] - \sin[\alpha_{02} + \delta_2(t)] [2J_1(z_2) \cos(\omega_c t + \theta) -$$

$$2J_3(z_2)\cos(3\omega_c t + 3\theta) + \dots], \quad (5)$$

式中 J_n 表示 n 阶 Bessel 函数。

(5)式所示探测信号与正弦调制信号 $a\cos(\omega_c + \theta)$ 相乘并进行低通滤波可以得到反馈电压信号为

$$V_f = K_f \sin[a_{02} + \delta_2(t)], \quad (6)$$

式中 $K_s = K_f J_1(z_2)$ 。 K_f 是电路放大系数。

探测信号 $S_2(t)$ 经过反馈控制器后,变为控制电压 $V_f(t)$ 输入到激光调制器(LM)中,将 $V_f(t)$ 的转换电流驱动 LD,LD 的波长产生变化,其变化量记作 $\Delta\lambda_1(t)$,则(2)式和(4)式可改写为

$$\delta_1(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_1 - \frac{2\pi l_1}{\lambda_0^2} [\Delta\lambda_T(t) + \Delta\lambda_1(t)], \quad (7)$$

$$\delta_2(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_2 - \frac{2\pi l_2}{\lambda_0^2} [\Delta\lambda_T(t) + \Delta\lambda_1(t)]. \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可以得到

$$\delta_1(x, y, t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (\Delta l_1 - \frac{l_1}{l_2} \Delta l_2) + \frac{l_1}{l_2} \delta_2(t). \quad (9)$$

PD 与 CCD 相距很近,且满足 $l_1 = l_2$, $\Delta l_1 = \Delta l_2$,则式(9)可改写为

$$\delta_1(x, y, t) = \delta_2(t), \quad (10)$$

即干涉信号 $S(x, y, t)$ 和 $S_2(t)$ 受到相同的相位干扰。当随机振动对整个波面的影响相同时,可以消除随机振动对测量结果的影响。

空气扰动、温度变化引起的半导体激光器波长漂移等其他干扰因素也导致干涉仪光程差的随机变化,也可通过反馈控制电路与随机振动一起补偿,提高干涉仪测量精度,大大降低了外部振动等干扰的影响。

由实时鉴相电路可得到无干扰的探测信号

$$P(x, y) = \tan[\alpha(x, y)], \quad (11)$$

并实时得到待测量相位

$$\alpha(x, y) = \arctan[P(x, y)]. \quad (12)$$

进而可以得到待测量表面形貌为

$$r(x, y) = \frac{\lambda_0 \alpha(x, y)}{4\pi}. \quad (13)$$

3 计算形貌的算法

利用数字电路和反正切函数表(简称查表法)可求出干涉信号的相位 $\alpha(x, y)$ 与 $r(x, y)$,其电路由 10 位 A/D 转换器、10 位只读存储器 ROM、缓冲区 RAM、D/A 转换器、显示部分组成。

电路设计时将正切的相位值存放在 ROM 中;测量时,由(11)式得到的 $P(x, y)$ 值作为 ROM 的

地址,从 ROM 中读出的数据即为待测量相位,并转存于 RAM 中。因此,在得到 $\alpha(x, y)$ 以后,即可由(13)式得出物体表面形貌值 $r(x, y)$ 。

可见,抗干扰型滤波鉴相式 LD 实时 SPM 面形干涉测量仪能降低外部干扰的影响,消除内部干扰的影响,大幅度提高测量精度。

4 实验及其分析

实验系统如图 1 所示。它由 LD、扩束与准直器 L_1 、分束器 BS、参考镜 M、被测量物体 O、透镜 L_2 、高速 CCD 图像传感器组成。LD 出射波长 785 nm 的激光,经扩束、准直后,由分束棱镜 BS 分成两束光,其中一束光到达与 PZT 连在一起的反射镜 M,由反射镜 M 再经分束棱镜 BS 和透镜 L_2 到达 CCD。另一束光到达被测量物体 O,经 O 反射后再经 BS 和透镜 L_2 成像在 CCD 上。这里 CCD 记录的是两束光的干涉条纹,有效像素为 60×60 ,帧速为 1600 frame/s, A/D 的采样速率为 6 MHz。被测量物体为一楔形光学平板,实验时反馈系统工作。

在楔形光学平板的表面形貌测量过程中,CCD 连续采集的干涉图经信号处理电路实时鉴相、计算出每一点形貌值,其测量结果如图 2 所示(x, y 的单位是 μm ; z 是表面形貌值,其单位是 nm)。表面形貌重复测量精度为 3.1 nm。重复其测量过程,相隔几分钟后对楔形光学平板的表面形貌进行测量。前后两表面形貌值的均方根误差为 2.3 nm。单个像素读出时间为 $0.125 \mu\text{s}$,去噪声等电路延时小于 1 ms,鉴相与计算时间小于 11 ms,由此可得测量时间小于 12 ms。

不妨选择图 2 中 x 轴方向上第一行的形貌图,如图 3 所示,表面形貌的 R 为 2.03 nm。几分钟后 x 轴方向上第一行的形貌图的 R 为 2.1 nm。

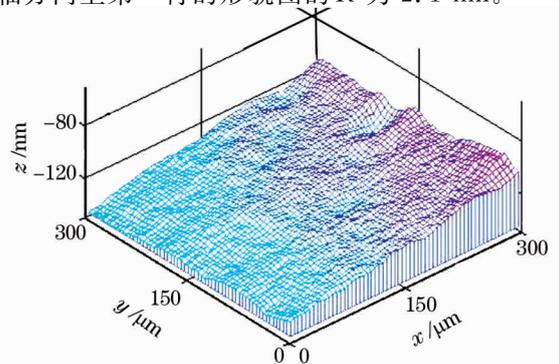


图 2 楔形光学平板表面形貌测量结果

Fig. 2 Measured surface profile of the wedge-shaped plane plate

保持其他实验条件不变,实验时反馈系统不工作。测量区域与前述实验的测量区域相同,楔形光学平板 x 方向的表面形貌测量结果如图 3 所示,多次测量得 x 方向 R 值分别为 4.7 nm。图 3 同厂家提供的数据一致,图 4 则相差较大。同一区域两种测量方法获得的表面形貌结果误差非常大,说明反馈电路有较强的抗干扰能力。

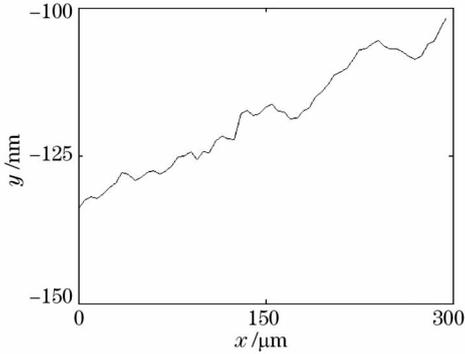


图 3 楔形光学平板在 x 方向的表面形貌测量结果
Fig. 3 Measured surface profile of the wedge-shaped plane plate along x axis

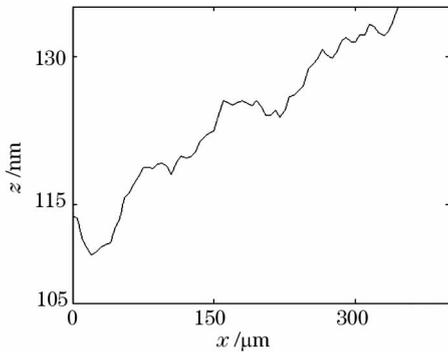


图 4 反馈系统不工作时测量楔形光学平板在 x 方向的表面形貌

Fig. 4 Measured surface profile of the wedge-shaped plane plate along x axis without work to feedback system

5 结 论

本文提出实时测量表面形貌的抗干扰滤波鉴相式 LD 干涉测量技术。据此设计出正弦相位调制实时干涉测量仪,分析了抗干扰测量原理。它利用滤波电路、实时鉴相电路对干涉信号进行鉴相处理以实现表面形貌的实时测量,消除了系统参数对测量精度的影响。反馈控制系统取出一个测量点的干涉信号,该信号控制 LD 的波长,从而对外界干扰引起的相位误差进行了补偿,大大提高了干涉仪的测量精度。该干涉仪具有结构简单、测量精度高、抗干扰

能力强等优点。从测得的楔形光学平板表面形貌的实验结果表明,该正弦相位调制干涉仪的测量时间小于 12 ms,重复测量精度约为 3 nm。实验结果很好地验证了其有效性。

参 考 文 献

- 1 He Guotian, Wang Xiangzhao, Tang Feng. Sinusoidal phase modulating interferometry based on low frame rate area array CCD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 265~271
何国田,王向朝,唐 锋. 基于低速面阵 CCD 的正弦相位调制干涉测量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 265~271
- 2 R. Shinozaki, O. Sasaki, T. Suzuki. Fast scanning method for one-dimensional surface profile measurement by detecting angular of a laser beam[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(21): 4157~4163
- 3 S. Yin, J. Li, M. Song. Surface profile measurement using a unique microtube-based system[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **168**(1~4): 1~6
- 4 C. J. Tay, C. Quan, Y. Fu *et al.*. Surface profile measurement of low-frequency vibrating objects using temporal analysis of fringe pattern[J]. *Opti. & Laser Technol.*, 2004, **36**(6): 471~476
- 5 Masayuki Yokota, Atsuyoshi Asaka, Toshihiko Yoshino. Stabilization improvements of laser-diode closed-loop heterodyne phase-shifting interferometer for surface profile measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(10): 1805~1805
- 6 Guotian He, Xiangzhao Wang, Aijun Zeng *et al.*. Sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer for real-time surface profile measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 164~167
- 7 Jinhuan Li, Osami Sasaki, Takamasa Suzuki. Measurement of diameter of metal cylinders using a sinusoidally vibrating interference pattern[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **260**: 1361~1365
- 8 O. Sasaki, T. Okamura, T. Nakamura. Sinusoidal phase modulating Fizeau interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(4): 512~515
- 9 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Fen *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength for measuring microvibrations [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(4): 367~371
王学锋,王向朝,钱 锋等. 光热调制激光波长测量物体的微小振动[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(4): 367~371
- 10 O. Sasaki, T. Nakada, T. Suzuki. Exact measurements of surface profiles of a glass plate by a superluminescent diode interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(10): 1679~1682
- 11 T. Suzuki, O. Sasaki, T. Maruyama. Phase locked laser diode interferometry for surface profile measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20): 1872~1879
- 12 T. Suzuki, O. Sasaki, T. Maruyama. Real-time displacement measurement using synchronous detection in a sinusoidal phase modulating interterometer[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(5): 1635~1639
- 13 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng. Real-time micro-vibration measurement using synchronous phase detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 753~756
宋 松,王向朝,王学锋等. 采用同步相位检测的微小振动实时测量[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8): 753~756