

文章编号: 0258-7025(2001)08-0753-04

# 采用同步相位检测的微小振动实时测量\*

宋松 王向朝 王学锋 钱锋 陈高庭

(中国科学院上海光机所信息光学研究实验室 上海 201800)

**提要** 提出了一种半导体激光正弦相位调制干涉仪。该干涉仪可以实时测量物体的微小振动。利用简单的电路构成实时相位检测器,对干涉信号中的相位信号进行同步检测,最终获得实际振动的振幅频率。文中给出了具体的理论分析和实验结果。

**关键词** 实时测量,相位检测,干涉仪,半导体激光器

中图分类号 TH 744.3;TN 247 文献标识码 A

## Real-time Micro-vibration Measurement Using Synchronous Phase Detection

SONG Song WANG Xiang-zhao WANG Xue-feng QIAN Feng CHEN Gao-ting

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** A sinusoidal phase modulating laser diode interferometer is proposed. It is used to measure micro-vibration of an object in real-time. The real-time phase detector is constructed with a simple circuits. The amplitude and frequency of the vibrations are measured by synchronously detecting the phases in interference signal. The theoretical analysis and experimental results are given.

**Key words** real-time measurement, phase detection, interferometer, laser diode

## 1 引言

光学检测作为一种重要的非接触式无损测量技术,具有结构简单、精度高、稳定性好及易于实现等优点,得到了广泛的应用<sup>[1~4]</sup>。在诸多的光学干涉测量方法中,应用最多的是外差干涉(heterodyne interferometry)。近年来,半导体激光器(LD)技术得到了飞速发展,由于LD具有很好的相干性和稳定性,因此它在光学干涉中已被广泛地用作光源<sup>[5,6]</sup>。另外,利用LD的波长可调谐性,可以对LD的输入电流进行直接调制,而不再需要用频移器(诸如Bragg晶格、压电陶瓷PZT和旋转光栅等)来实现调制,大大简化了干涉仪的构造,同时也使外差干涉更易于实现。在此基础上,有人提出了正弦相位调制(SPM)干涉仪<sup>[7,8]</sup>。通过对LD输入正弦交流信号,实现干涉信号的正弦相位调制。相对于传统的外差干涉仪,LD-SPM干涉仪的相位调制精确、简单,所以

近年来取得了很大的发展<sup>[9~11]</sup>。

在微机械系统和精细加工技术中,需要对机械装置的振动实现实时控制,因此对微小振动进行实时精确测量具有十分重要的意义。基于LD-SPM干涉仪,我们提出了一种新型的半导体激光实时干涉测量仪。在光学干涉测量的同时,通过实时相位检测器对干涉信号中由物体振动引起的相位变化进行同步检测,从而实时精确地得到被测物体的微小振动。

## 2 基本原理

图1为实时测量物体微小振动的LD-SPM干涉测量系统框图。光路部分为一个Twyman-Green干涉仪。该干涉仪采用LD作为光源,由透镜L对LD发出的光进行准直。分束器BS将入射光分成两束平行光,其中一束照射到被测振动物体object上,另外一束照到参考镜M上作为参考光束。M与object的反射光束产生干涉,两束光之间的光程差(OPD)为 $2D_0$ 。干涉信号经过光阑PH后由光电二极管PD检测,最后通过实时相位检测器(real-time phase

\* 国家自然科学基金(69978024)与上海市应用材料研究与发展基金资助项目。

收稿日期:2000-10-08;收到修改稿日期:2000-11-14

detector) 后获得相位信号  $\alpha(t)$ , 由  $\alpha(t)$  可实时得到物体振动的振幅和频率。

去, 可以得到

$$d(t) = (1/K_d) \sin^{-1}[P(t)/K_s] \quad (6)$$

采用数字电路和反正弦函数表取代计算机, 可求出干涉信号中的相位  $\alpha(t)$ 。图 1 中虚线框内的部分是实时相位检测器。它由一个 12 位 A/D 转换器、一个 12 位只读存储器 (ROM) 和一个 12 位的 D/A 转换器组成。利用 A/D 转换器, 将探测信号  $P(t)$  转换为数字信号, 将数字化的  $P(t)$  作为 ROM 的地址。ROM 中的内容如图 2 所示, 对应不同的  $P(t)$  值, 我们先算出  $\alpha(t)$  值, 写入 ROM 中。ROM 中的数据 0 和 4047 分别等值于  $-\pi/2$  和  $\pi/2$ , 测量的相位分辨率为  $\pi/4048$ 。由 ROM 输出得到  $\alpha(t)$  的数字信号, 通过 D/A 转换器后变为模拟信号。因此, 只要知道了参数  $K_d$  和  $K_s$ , 依据式 (6) 就可以得出物体的振动  $d(t)$ 。

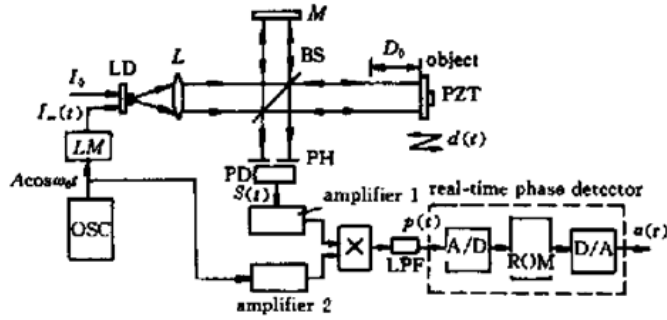


图 1 半导体激光微小振动实时干涉测量仪  
Fig. 1 Laser diode interferometer for real time micro-vibration measurement

信号发生器输出信号为  $A \cos \omega_c t$ , 经过半导体激光调制器 LM 后, 得到正弦交流调制电流  $I_m(t) = a \cos \omega_c t$ , 其中  $a = K_{LM} A$ ,  $K_{LM}$  为 LM 的转换系数。LD 通过调制电流  $I_m(t)$  和直流电流  $I_0$  驱动, 它的波长变化为  $\beta \lambda_m(t)$ ,  $\beta$  为 LD 的波长调制系数。干涉信号  $S(t)$

$$S(t) = S_1 + S_0 \cos[z \cos \omega_c t + \alpha(t)] \quad (1)$$

其中  $S_1$  为信号的直流分量,  $S_0$  为信号交流分量的振幅,  $z = 4\pi\alpha\beta D_0/\lambda_0^2$  为正弦相位调制深度。 $\lambda_0$  为 LD 输出光的中心波长, 由  $I_0$  决定。(1) 式中  $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_d(t)$ , 其中  $\alpha_0 = (4\pi/\lambda_0) D_0$ , 是初始相位, 由光程差  $2D_0$  决定;  $\alpha_d(t) = (4\pi/\lambda_0) d(t)$ , 是由 object 振动  $d(t)$  引进的干涉信号的相位变化。定义  $K_d = 4\pi/\lambda_0$ 。

将式 (1) 展开, 不考虑其中的直流分量, 可以得到下式

$$S(t) = S_0 \{ \cos \alpha(t) [J_0(z) - 2J_2(z) \cos 2\omega_c t + \dots] - \sin \alpha(t) [2J_1(z) \cos \omega_c t - 2J_3(z) \cos 3\omega_c t + \dots] \} \quad (2)$$

$J_n(z)$  是  $n$  阶 Bessel 函数。由 PD 检测到的干涉信号  $S(t)$  经过放大器 1 后, 与通过放大器 2 的调制信号  $A \cos \omega_c t$  相乘后, 再通过低通滤波器 (LPF), 其中 LPF 的截止频率  $< \omega_c/10$ , 可得到探测信号

$$P(t) = K_1 K_2 K_m K_L S_0 A J_1(z) \sin \alpha(t) \quad (3)$$

其中  $K_1$  和  $K_2$  分别为放大器 1, 2 的增益,  $K_m$  为模拟乘法器的系数,  $K_L$  为 LPF 的增益。定义

$$K_s = K_1 K_2 K_m K_L S_0 A J_1(z) \quad (4)$$

由式 (3) 和 (4) 可以得到

$$\alpha(t) = \sin^{-1}[P(t)/K_s] \quad (5)$$

在  $\alpha(t)$  中初始相位  $\alpha_0$  为直流项, 在实验中可以略

		$\alpha$
$P(t) = K_s \sin \alpha$	$-K_s$	$-\pi/2$
	...	...
	0	0
	...	...
	$K_s$	$\pi/2$

图 2 ROM 中的内容

Fig. 2 Contents of the ROM

由于干涉信号相位调制深度  $z$  是光程差  $D_0$  的函数, 因此  $K_s$  亦与光程差  $D_0$  有关。现在没有很简单的方法精确地测量  $D_0$ , 因此,  $K_s$  不能用式 (4) 精确算出。但是若  $\alpha(t)$  在  $2n\pi (n = 0, 1, 2, \dots)$  附近, 式 (3) 可近似为

$$P(t) \approx K_s \alpha(t) = K_s \alpha_0 + K_s K_d d(t) \quad (7)$$

忽略其中的直流项, 即  $K_s \alpha_0$  项, 可以近似得到探测信号  $P(t)$  与振动  $d(t)$  之间的关系式

$$P(t) \approx K K_d d(t) \quad (8)$$

为了精确得到  $K_s$  值, 我们先对应一个已知  $d(t)$  测量出探测信号  $P(t)$ , 然后由式 (8) 求出  $K_s$  值。 $d(t)$  取值越小, 求出的  $K_s$  值越精确。这样, 根据式 (6) 就可以实时获得 object 振动的位移时间曲线。

由式 (8) 可以看出, 探测信号  $P(t)$  与振动  $d(t)$  之间成正比例关系, 因此只要知道了参数  $K_s$  和  $K_d$ , 就可以根据式 (8) 由  $P(t)$  得出  $d(t)$ 。但是, 式 (8) 成立的条件是  $\alpha(t)$  在  $2n\pi$  附近, 这就要求: 1)  $\alpha_0$  应该等于  $2n\pi$ ; 2)  $\alpha_d(t)$  不能太大。由于  $\alpha_0$  由光程差  $2D_0$  决定, 因此不能很精确地使  $\alpha_0$  恰好等于  $2n\pi$ , 它们之间存在一个偏差  $\Delta\alpha_0$ , 从而引起测量误差。另一方

面,  $\alpha_d(t)$  与物体的振动  $d(t)$  有关, 无论振动幅度大小, 总会使测得的振幅值偏离实际值, 也造成了测量误差, 而且随着物体振动幅度的增大, 它所造成的测量误差也增加, 因此为了减小测量误差, 振动振幅不能太大, 这就使干涉仪的测量范围受到限制。而采用先利用反三角函数求出相位信号  $\alpha(t)$ , 然后再经过变换后得到振动  $d(t)$  的方法, 可以完全解决这些问题。

### 3 实验结果

实验装置如图 1 所示, 光源 LD 为我室自制, 其中心波长  $\lambda_0$ , 输出功率和波长调制系数  $\beta$  分别为 815 nm, 8 mW 和  $1.56 \times 10^{-2}$  nm/mA。本实验中, 调制信号的频率为 10 kHz。LM 的转换系数  $K_{LM}$  为 0.01 mA/mV。放大器 1, 2 的增益  $K_1$  和  $K_2$  分别为 62.2 和 86.7。模拟乘法器的系数  $K_m$  为  $5 \times 10^{-5}$   $\text{mV}^{-1}$ 。实验中选用一个二阶的 LPF, 其截止频率和增益  $K_L$  分别为 400 Hz 和 10。由振动  $d(t)$  到相位  $\alpha_d(t)$  的转换系数  $K_d$  为  $1.54 \times 10^{-2}$  rad/nm。两光臂间的光程差  $2D_0$  约为 6 cm。实验中, 把一个反射镜粘在压电陶瓷 PZT 上作为被测振动物体。PZT 由一个低频信号发生器输出正弦交流信号来控制其振动。给 PZT 加一个 150Hz 的正弦电压信号, 使 object 沿光轴方向作正弦振动。采用参考文献[11]中的方法校准 PZT 的振动。在振动频率为 150Hz 时, 加在 PZT 上的低频信号幅度与 PZT

振动振幅之间的关系如图 3 所示。根据式(8)算出  $K_s$  值为  $1.75 \times 10^3$  mV/rad。

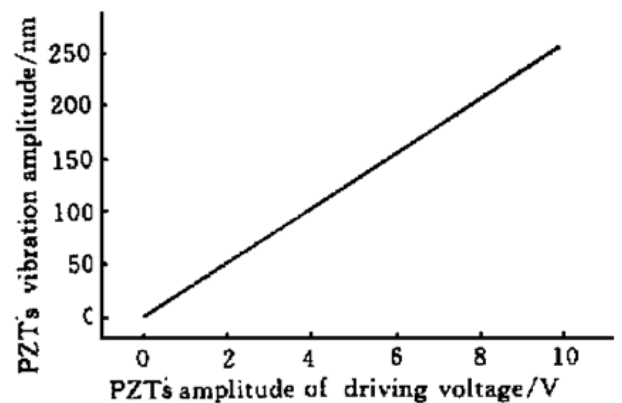


图 3 PZT 驱动电压幅度与其振动振幅之间的关系曲线

Fig. 3 Relation between PZT's vibration amplitude and the amplitude of driving voltage

实验中暂时采用计算机模拟来实现 ROM 的功能。调节 PZT 的输入正弦电压信号, 使它的振动振幅为 62.5 nm, 此时的测量结果如图 4 所示。图 4 (a) 为 object 的实际振动曲线, (b) 为测量得到的 object 的振动  $d(t)$  曲线, 测量均方根(rms)误差为 5.53 nm, (c) 为相隔几分钟后测得的结果。图 4 中 (b) 和 (c) 两曲线之间的重复均方根差为 5.10 nm。实验中, 空气扰动、光学工作台振动及低频电路噪声都会导致测量误差, 另外, 在加同一正弦电压信号时, PZT 的机械振动振幅有时会有微小变化, 从而使相隔几分钟所测得的结果有所不同, 产生重复均方根差。

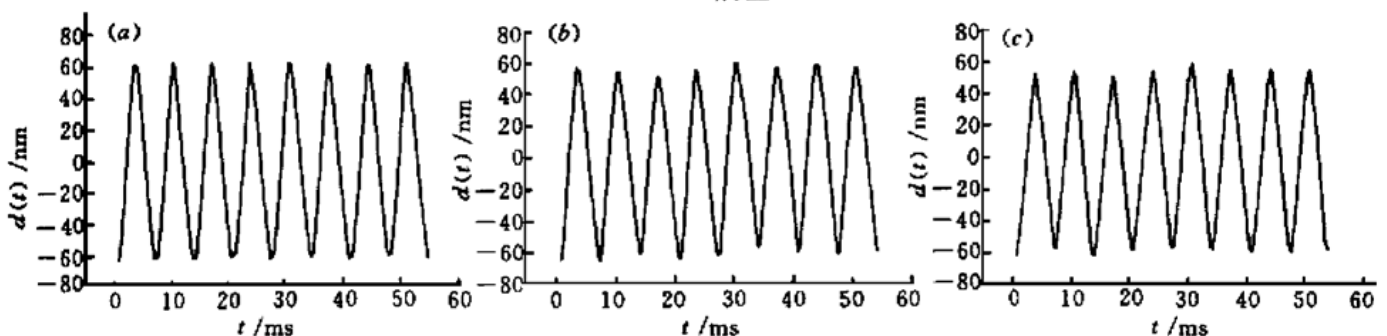


图 4

(a) 物体微小振动的实际曲线; (b) 实验测得的物体微小振动; (c) 相隔几分钟后的测量结果

Fig. 4

(a) Micro-vibration of object; (b) Measured object's micro-vibration; (c) Measured result after an interval of a few minutes

最后, 改变 PZT 的振动振幅和频率, 测量得到的物体振动如图 5 所示。可以看出, 本文提出的方法可以比较精确地表现物体的微小振动。

### 4 结 论

本文提出了一种利用 LD-SPM 干涉仪对微小振动进行实时测量的新方法。使用简单的电路构成实

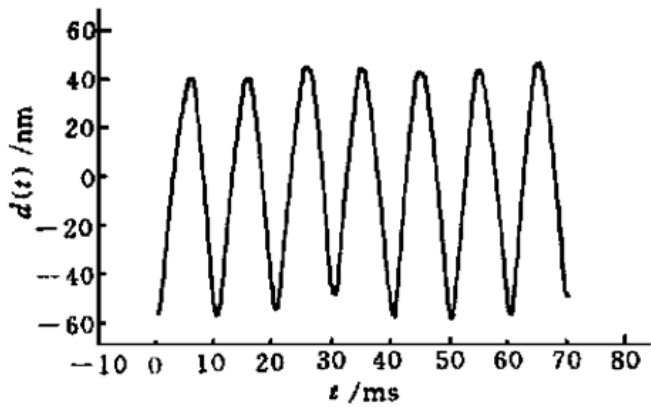


图5 实验测得的 100 Hz 正弦微小振动

Fig. 5 Measured sinusoidal the vibration with a frequency of 100 Hz

时相位检测器, 取代了计算机的复杂运算, 从干涉信号中获得相位信号, 经过变换, 最终可以得到实际振动的振幅和频率, 实现了微小振动的高精度实时测量。

### 参 考 文 献

- 1 J. Chen, Y. Ishii, K. Murata. Heterodyne interferometry with a frequency-modulated laser diode. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(1): 124~ 128
- 2 X. Z. Wang, O. Sasaki, T. Suzuki *et al.*. Measurement of spatially nonuniform phase changes of a light beam utilizing reflectivity characteristic of a self-pumped phase conjugate mirror. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(9): 1553~ 1559
- 3 X. Z. Wang, O. Sasaki, T. Suzuki *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4593~ 4597
- 4 X. F. Wang, X. Wang, F. Qian *et al.*. Laser diode interferometer used to measure displacements within large range with a few nanometer accuracy. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(4): 219~ 223
- 5 K. Tatsuno, Y. Tsunoda. Diode laser direct modulation heterodyne interferometer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(1): 37~ 40
- 6 Y. Ishii, J. Chen, K. Murata. Digital Phase-measuring interferometry with a tunable laser diode. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 233~ 235
- 7 O. Sasaki, K. Takahashi, T. Suzuki. Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer with a feedback control system to eliminate external disturbance. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(12): 1511~ 1515
- 8 O. Sasaki, H. Sasazaki, T. Suzuki. Two-wavelength sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer insensitive to external disturbances. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(28): 4040~ 4045
- 9 T. Suzuki, S. Hirabayashi, O. Sasaki *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(3): 543~ 548
- 10 X. F. Wang, X. Z. Wang, F. Qian *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength for measuring microvibrations. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(4): 367~ 371 (in Chinese)
- 11 X. F. Wang, X. Z. Wang, F. Qian *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength: application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements. *Opt. & Laser Technol.*, 1999, **31**(8): 559~ 564