

文章编号: 0253-2239(2001)05-0578-03

半导体激光微小振动实时干涉测量仪*

宋 松 王向朝 王学锋 钱 锋 卢洪斌

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究实验室, 上海 201800)

摘要: 设计了一种半导体激光干涉测量仪, 可以实时测量物体的微小振动。通过信号处理电路对干涉信号进行分析, 得到实际振动的振幅和频率。给出了具体的理论分析。实验结果验证了该干涉仪的实用性。

关键词: 实时测量; 光学检测; 干涉仪; 半导体激光器

中图分类号: TH744.5 文献标识码: A

1 引 言

近年来, 随着微机械技术的迅速发展及大量应用, 对机械部分的微小位移进行精确测量就越来越重要。光学干涉测量技术作为一种非接触式测量技术, 具有精度高、稳定性好及结构简单等优点, 因而得到了广泛应用^[1-3]。由于半导体激光器(LD)具有稳定的单模输出、波长可调谐、低电流损耗以及尺寸小、价格低等优点, 在光学干涉仪中已被广泛地用作光源。利用半导体激光器的波长可调谐性, 对它的输入电流进行直接调制, 很容易实现测量精度较高的光外差干涉技术。在使用半导体激光的正弦相位调制(SPM)干涉仪^[4,5]中, 通过对半导体激光输入正弦电流信号, 可实现干涉信号的正弦相位调制。相对于传统的外差干涉仪, 使用半导体激光的正弦相位调制干涉仪体积小、结构紧凑, 相位调制简单、精确, 所以这种干涉仪得到了很大的发展^[6-8]。

本文基于使用半导体激光的正弦相位调制干涉仪, 设计了一种能够实时测量微小振动的干涉仪。通过设计电路对干涉信号进行处理, 对探测信号与物体振动的关系进行分析, 根据直接观察到的探测信号实时得到物体振动的振幅和频率。

2 原 理

图 1 为半导体激光微小振动实时干涉测量系统示意图。光路部分构成了一个 Twyman-Green 干涉仪。该干涉仪采用半导体激光作为光源。半导体激

光经过透镜 L 准直后, 由分束器 BS 分成两束平行光, 其中一束照到参考镜 M 上作为参考光束, 另外一束照射到被测振动物体(object)上。两光臂之间的光程差为 $2D_0$ 。M 与被测振动物体的反射光束的干涉信号, 由光电二极管 PD 检测, 通过信号处理电路后获得探测信号 $P(t)$ 。

信号发生器输出信号 $V_m(t)$ 为:

$$V_m(t) = A \cos \omega_c t. \quad (1)$$

经过半导体激光调制器 LM 后, 得到正弦交流调制电流 $I_m(t)$:

$$I_m(t) = K_{LM} V_m(t) = a \cos \omega_c t, \quad (2)$$

其中 K_{LM} 为半导体激光调制器的转换系数, $a = K_{LM} A$ 。调制电流 $I_m(t)$ 与直流电流 I_0 一起驱动半导体激光。半导体激光的波长变化为 $\beta I_m(t)$, 其中 β 为半导体激光的波长调制系数。PD 接收到的干涉信号为:

$$S(t) = S_1 + S_0 \cos [z \cos \omega_c t + \alpha_0 + \alpha_d(t)], \quad (3)$$

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, λ_0 为与 I_0 对应的半导体激光的中心波长。

$$\alpha_0 = (4\pi / \lambda_0) D_0 \quad (4)$$

为被测振动物体静止时干涉信号的相位, 它由光程差 $2D_0$ 决定。

$$\alpha_d = (4\pi / \lambda_0) d(t) \quad (5)$$

为被测振动物体振动引起的干涉信号的相位变化。 $d(t)$ 为压电陶瓷驱动下被测振动物体的位移变化。

图 1 中虚线框内的部分是信号处理电路。它由一个模拟乘法器和一个低通滤波器 LPF 组成。放大器 1 的增益为 K_1 , 放大器 2 的增益为 K_2 。模拟乘法器的系数为 K_m 。低通滤波器的增益为 K_L , 截止

* 国家自然科学基金(69978024)、上海市应用材料研究与发展基金资助课题。

收稿日期: 2000-08-22; 收到修改稿日期: 2000-10-13

频率低于 $\omega_c/10$ 。我们用这部分电路实现鉴相功能, 通过乘法器和低通滤波器把干涉信号中的相位变化在其输出的测量信号 $P(t)$ 中鉴别出来。

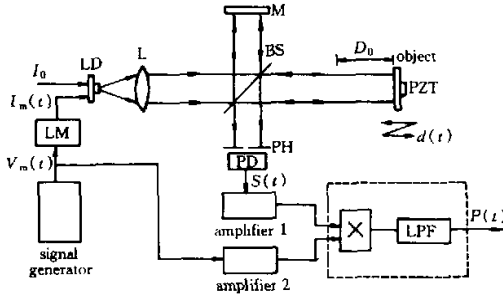


Fig. 1 LD interferometer for real-time micro-vibration measurement

将(3)式展开, 忽略其中的直流分量, 可得到:

$$S(t) = S_0 \{ \cos \alpha(t) [J_0(z) - 2J_2(z) \cos 2\omega_c t + \dots] - \sin \alpha(t) [2J_1(z) \cos \omega_c t - 2J_3(z) \cos 3\omega_c t + \dots] \}, \quad (6)$$

式中 $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_d(t)$, $J_n(z)$ 是 n 阶贝塞尔函数。信号 $S(t)$ 经过放大器 1 后, 与通过放大器 2 的调制信号 $V_m(t)$ 相乘, 再通过低通滤波器, 可得到信号:

$$P(t) = K_1 K_2 K_m K_L S_0 A J_1(z) \sin \alpha(t). \quad (7)$$

定义

$$K_s = K_1 K_2 K_m K_L S_0 A J_1(z), \quad (8)$$

若 $\alpha(t)$ 在 $2n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 附近, (7) 式可为:

$$P(t) \approx K_s \alpha(t) = K_s \alpha_0 + K_s K_d d(t), \quad (9)$$

其中 $K_d = 4\pi/\lambda_0$ 。不考虑上式中的直流项, 即 $K_s \alpha_0$ 项, 可得到探测信号 $P(t)$ 与振动位移变化 $d(t)$ 之间的关系式:

$$P(t) = K_s K_d d(t). \quad (10)$$

由上式可以看到, 在 $\alpha(t) = 2n\pi$ 附近, 探测信号 $P(t)$ 与振动位移变化 $d(t)$ 之间成正比例关系, 只要知道了参数 K_s 和 K_d , 就可以由 $P(t)$ 得出 $d(t)$ 。

3 实验与结果

如图 1 所示, 自制的半导体激光器用作光源, 其中心波长 λ_0 、输出功率和波长调制系数 β 分别为 815 nm、8 mW 和 1.56×10^{-2} nm/mA。本实验中, 调制信号的频率为 10 kHz。半导体激光调制器的转换系数 K_{LM} 为 0.01 mA/mV。放大器 1 的增益 K_1 为 62.2, 放大器 2 的增益 K_2 为 86.7。模拟乘法器的系数 K_m 为 5×10^{-5} (mV) $^{-1}$ 。实验中选用

一个二阶的低通滤波器, 其截止频率为 400 Hz, 增益 K_L 为 10。由振动位移变化 $d(t)$ 到相位 $\alpha_d(t)$ 的转换系数 K_d 为 1.54×10^{-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上作为被测振动物体。压电陶瓷由一个低频信号发生器输出正弦交流信号来控制其振动。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, 在现有的实验条件下还没有很简单的方法能把 D_0 精确地测量出来。因此, K_s 不能用(8)式精确地算出来。为了精确得到 K_s 值, 我们用参考文献[8]中的实验装置测量了本实验中被测振动物体的振动位移变化 $d(t)$, 然后将该物体放入图 1 所示的实验装置中。测得与已知 $d(t)$ 相应的探测信号 $P(t)$ 后, 由(10)式求出 K_s 值。得到 K_s 值后, 根据(10)式, 由观察到的探测信号 $P(t)$ 可以实时测出被测振动物体振动的位移时间曲线。

给压电陶瓷加一个 150 Hz 的正弦电压信号, 使被测振动物体沿光轴方向做正弦振动。由(10)式计算出的 K_s 值为 1.56×10^3 mV/rad。把正弦电压信号调节到使得被测振动物体的振动振幅为 45 nm 的数值(此数值已用文献[8]中的实验装置校正), 由探测信号 $P(t)$ 得到的被测振动物体振动的位移时间曲线如图 2(a)所示。此曲线与频率 150 Hz、振幅 45 nm 的正弦振动的均方根误差为 4.9 nm。图 2(b)是相隔几分钟后再测得的结果。图 2 中两曲线的

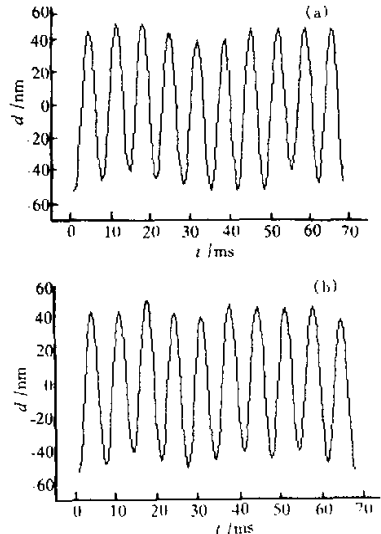


Fig. 2 (a) Measured object's micro-vibration; (b) Measured result after an interval of a few minutes

均方根差为 6.6 nm。改变加在压电陶瓷上的正弦电压信号,测量得到的物体振动如图 3 和图 4 所示。

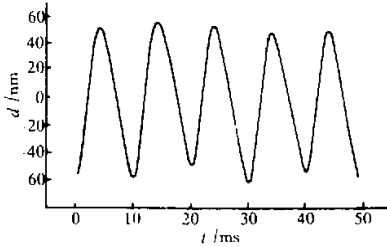


Fig. 3 Measured sinusoidal micro-vibration with a frequency of 100 Hz

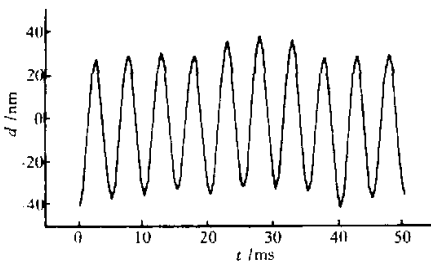


Fig. 4 Measured sinusoidal micro-vibration with a frequency of 200 Hz

由于不需要将模拟信号转换成数字信号,全部电路都是对模拟信号进行处理,电路最终输出的信号是连续的。测量结果的分辨率只取决于探测仪器的分辨率。实验中,用示波器来检测探测信号 $P(t)$,普通示波器分辨率可达到 1 mV,由(10)式得出振动振幅 $d(t)$ 的测量分辨率为 4×10^{-2} nm。根据(7)式,可以看出相位 $\alpha(t)$ 的取值范围在 $\pm\pi/2$ 之间,所以 $d(t)$ 的最大测量范围是 $\lambda/4$ 。

结论 提出了一种利用半导体激光的正弦相位调制干涉仪对微小振动进行实时测量的新方法。通过电路对信号进行处理后,得到的探测信号较好地反映实际振动的振幅和频率。本方法不需要利用计算机来进行复杂的运算,只用电路处理信号,实现了微小振动的高精度实时测量。这种干涉测量仪可用于实时测量机电系统(MEMS)部件的微小振动。

参 考 文 献

- [1] 王向朝,佐佐木修己,菊地崇朗等.使用位相共轭光精密测量粗糙面物体的振动振幅.光学学报,2000,20(4):525~528
- [2] 宋桂菊,王向朝,张莲英等.藕断面的光学相干层析成像实验研究.中国激光,2000,A27(1):83~86
- [3] Wang X Z, Sasaki O, Suzuki T *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface using an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror. *Appl. Opt.*, 2000, 39(25):4593~4597
- [4] Sasaki O, Takahashi K, Suzuki T. Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer with a feedback control system to eliminate external disturbance. *Opt. Engng.*, 1990, 29(12):1511~1515
- [5] 王学峰,王向朝,钱 锋等.光热调制半导体激光波长降低干涉测量误差.光电工程,1999,26(5):1~3
- [6] Sasaki O, Sasazaki H, Suzuki T. Two-wavelength sinusoidal phase/modulating laser-diode interferometer insensitive to external disturbances. *Appl. Opt.*, 1991, 30(28):4040~4045
- [7] Suzuki T, Hirabayashi S, Sasaki O *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer. *Opt. Engng.*, 1999, 38(3):543~548
- [8] Wang X F, Wang X Z, Qian F *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength: Application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements. *Opt. and Laser Technol.*, 1999, 31(8):559~564

Real-Time Micro-Vibration Measurement with a Laser Diode Interferometer

Song Song Wang Xiangzhao Wang Xuefeng Qian Feng Lu Hongbin

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

(Received 22 August 2000; revised 13 October 2000)

Abstract: A new laser diode interferometer for micro-vibration measurement is proposed. The interferometer can measure micro-vibrations of an object in real-time. The interference signal is analyzed with signal processing circuits and the amplitude and frequency of vibrations are obtained. The theory analysis is described. The experimental results verify the usefulness of the interferometer.

Key words: real-time measurement; optical testing; interferometer; laser diode