

文章编号: 0253-2239(2001)11-1368-04

# 光热正弦相位调制干涉仪中相位的抗干扰测量\*

王学锋<sup>1)</sup> 王向朝<sup>1)</sup> 于丹阳<sup>2)</sup> 钱 锋<sup>1)</sup> 卢洪斌<sup>1)</sup>

1), 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800  
2), 上海大学材料科学与工程学院, 上海 201800

**摘要:** 在正弦相位调制半导体激光干涉仪中, 半导体激光波长随注入电流和温度漂移而产生相位测量误差, 同时干涉仪的机械振动和干涉仪两臂中的空气扰动也会引入相位误差。在已有光热正弦相位调制干涉仪中引入反馈机制, 有效地降低了上述误差, 增强了干涉仪的抗干扰能力。使用此干涉仪测量了物体的位移, 测量结果表明这种方法可以有效地提高相位的测量精度。

**关键词:** 半导体激光器; 干涉仪; 光学检测; 反馈控制  
中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

## 1 引 言

在各种纳米精度干涉测量方法中, 利用正弦相位调制(SPM)的外差干涉测量方法具有精度高、调制方便等优点<sup>[1~3]</sup>, 采用半导体激光器代替气体激光器作为正弦相位调制干涉仪的光源, 不仅使得干涉仪结构更加紧凑、体积明显减小, 而且省去了压电陶瓷<sup>[4,5]</sup>及其驱动电路。提高测量精度的光外差技术仅需简单地通过控制半导体激光器注入电流正弦调制半导体激光器波长即可实现。但是通过注入电流调制半导体激光器波长的同时, 半导体激光器的输出光强也被调制, 这将造成较大的测量误差。为此, 我们提出了光热正弦相位调制半导体激光干涉仪<sup>[6,7]</sup>, 利用光热效应调制半导体激光器的波长, 大大降低了光强被调制引入的测量误差, 但是环境温度变化引起的半导体激光器波长的漂移、机械振动导致干涉仪中有关元件的相对位置的微小变化以及干涉仪中两臂空气的扰动都会导致相位测量误差。

为了消除上述误差, 本文在光热正弦相位调制半导体激光干涉系统中, 引入了一个参考干涉信号, 以便产生一个携带相位干扰的反馈信号, 将此反馈信号反馈至用作调制的半导体激光器, 使它的光强被补偿调制, 从而间接改变光源半导体激光器的波长, 半导体激光器的波长变化将产生一个相应于误差的相位变化, 从而补偿相位测量误差。

用此加入反馈的光热正弦相位调制半导体激光干涉仪, 我们测量了物体的位移。结果表明, 位移的测量误差明显降低。

## 2 原 理

图 1 为本文提出的利用反馈控制消除相位测量误差的干涉仪装置图。虚线框内为组合光源。由组合光源发出的光经过准直透镜  $L_1$ 、偏振分束器 PBS 后, 由分束器 BS 分成两束平行光, 分别照射到参考反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  和被测物体 object 上。 $M_1$  与被测物体的反射光产生的干涉信号由光电二极管  $PD_1$  检测, 经过模数转换器送入计算机。 $M_1$  与  $M_2$  的反射光产生的干涉信号由光电二极管  $PD_2$  检测, 用于产生反馈信号。

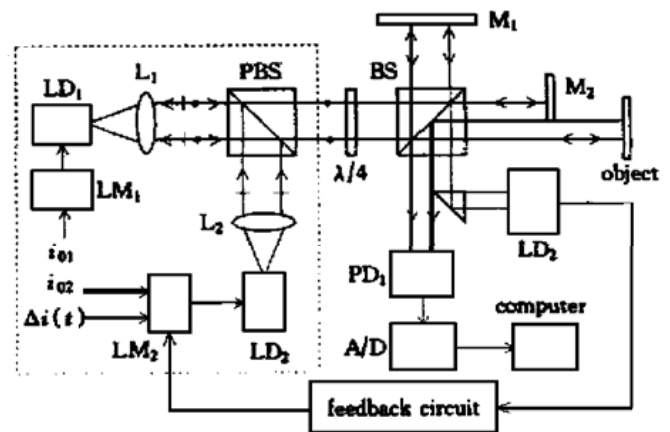


Fig. 1 The sinusoidal phase modulating laser diode interferometer with a photothermal modulation and a feedback control

在偏置电流  $I_{02}$  与交流成分

\* 国家自然科学基金(69978024)、国家重点基金研究发展规划项目(G1999033108)资助课题。

$$\Delta i(t) = a \cos(\omega_c t + \theta)$$

的驱动下, LD<sub>2</sub> 的输出光强正弦变化, 照射到 LD<sub>1</sub> 上后, 由于光热效应, LD<sub>1</sub> 的结温正弦变化, 导致其波长变化

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta_1 \beta_2 a \cos(\omega_c t + \theta), \quad (1)$$

式中,  $\lambda_0$  为 LD<sub>1</sub> 的中心波长,  $\beta_1$  为 LD<sub>2</sub> 的光强调制效率,  $\beta_2$  为 LD<sub>1</sub> 波长的光热调制效率,  $\omega_c$  为正弦相位调制的角频率。PD<sub>1</sub> 接收到的干涉信号

$$S_1(t) = \cos[z_1 \cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_{01} + \alpha(t) + \delta_1(t)], \quad (2)$$

式中, 正弦相位调制深度  $z_1 = 2\pi\beta_1\beta_2al_1/\lambda_0^2$ ,  $\alpha_{01} = 2\pi l_1/\lambda_0$ ,  $l_1$  为被测物体静止时, 含有被测物体和参考反射镜 M<sub>1</sub> 的两干涉臂间的光程差,  $\alpha(t)$  表示待测的相位。我们用  $\delta_1(t)$  来表示由于 LD<sub>1</sub> 的波长漂移、干涉仪的机械振动和空气扰动引入的相位误差, 则

$$\delta_1(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_1(t) - \frac{2\pi l_1}{\lambda_0^2} [\Delta \lambda_T(t) + \Delta \lambda_I(t)], \quad (3)$$

其中  $\Delta l_1(t)$  为由于机械振动和空气扰动引起的光程差  $l_1$  的变化,  $\Delta \lambda_T(t)$  与  $\Delta \lambda_I(t)$  为 LD<sub>1</sub> 波长随环境温度和注入电流的变化。PD<sub>2</sub> 接收到的干涉信号  $S_2(t) = \cos[z_2 \cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_{02} + \delta_2(t)]$ , (4) 式中,  $z_2 = 2\pi\beta_1\beta_2al_2/\lambda_0^2$ ,  $\alpha_{02} = 2\pi l_2/\lambda_0$ ,  $l_2$  为含有参考反射镜 M<sub>1</sub> 与 M<sub>2</sub> 的两干涉臂的光程差,  $\delta_2(t)$  表示由于 LD<sub>1</sub> 的波长漂移、干涉仪的机械振动和空气扰动引入的相位误差。

$$\delta_2(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_2(t) - \frac{2\pi l_2}{\lambda_0^2} [\Delta \lambda_T(t) + \Delta \lambda_I(t)], \quad (5)$$

$\Delta l_2(t)$  为由于机械振动和空气扰动引起的光程差  $l_2$  的变化。由(3)式和(5)式可以得到

$$\delta_1(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left| \Delta l_1(t) - \frac{l_1}{l_2} \Delta l_2(t) \right| + \frac{l_1}{l_2} \delta_2(t). \quad (6)$$

根据上式, 如果相位误差  $\delta_2(t)$  足够小,  $l_1$  和  $l_2$  的相对差值足够小, 则  $\delta_1(t)$  可以减小到可以忽略的程度。

将(4)式展开为

$$S_2(t) = \cos[\alpha_{02} + \delta_2(t)] [J_0(z_2) - 2J_2(z_2) \cos(2\omega_c t + 2\theta) + \dots] - \sin[\alpha_{02} + \delta_2(t)] [2J_1(z_2) \cos(\omega_c t + \theta) - 2J_3(z_2) \cos(3\omega_c t + 3\theta) + \dots]. \quad (7)$$

上式中,  $J_n$  表示  $n$  阶贝塞尔函数。将(7)式所示干涉信号乘以  $\cos(\omega_c t + \theta)$  通过低通滤波后, 得到反馈信号  $F$ ,

$$F = J_1(z_2) \sin[\alpha_{02} + \delta_2(t)], \quad (8)$$

将该信号采用反馈反馈至 LD<sub>2</sub>, 引起 LD<sub>2</sub> 相应的强度变化, 从而使 LD<sub>1</sub> 产生一个波长变化  $\Delta \lambda_F(t)$ , (5)式可以改写为

$$\delta_2(t) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta l_2(t) - \frac{2\pi l_2}{\lambda_0^2} [\Delta \lambda_T(t) + \Delta \lambda_I(t) + \Delta \lambda_F(t)], \quad (9)$$

通过控制 LD<sub>1</sub> 的注入电流, 可以使(8)式中  $\alpha_{02}$  的大小接近  $2n\pi$ , (8)式可以改写为

$$F = J_1(z_2) \delta_2(t). \quad (10)$$

由于  $z_2 \approx 2.35 \text{ rad}$ ,  $J_1(z_2) > 0$ , 当  $\delta_2(t) > 0$  时, (10)式所示的反馈信号  $J_1(z_2) \delta_2(t) > 0$ , 由于采用反馈, LD<sub>2</sub> 的输出光强增大, 经过光热调制, LD<sub>1</sub> 的波长向长波长方向移动。根据(5)式和(9)式, 在反馈量合适的情况下,  $\delta_2(t)$  将趋近于零。当  $\delta_2(t) < 0$  时, 我们可以得到同样的结果。由于  $l_1$  和  $l_2$  的相对

差值很小, 根据(6)式,  $\delta_1(t)$  也趋近于零。因此(2)式中由于 LD<sub>1</sub> 波长变化、干涉仪的机械振动和空气扰动引入的相位干扰被消除, 达到了降低外界干扰带来的测量误差的目的。

用参考文献[3]的方法可以求出(2)式中的  $\alpha(t)$ , 根据  $r(t) = \lambda_0 \alpha(t)/(4\pi)$  可以求出物体的位移。

### 3 实验与实验结果

实验所用的干涉仪装置如图1所示。测量时此干涉仪放在普通的实验台上。LD<sub>1</sub>、LD<sub>2</sub>的波长为785 nm。被测物体为一个背面粘有压电陶瓷的反射镜。加一个峰峰值0.4 V、频率约200 Hz的正弦电压信号给压电陶瓷, 使反射镜沿光轴方向正弦振动。调节正弦电流  $i_{02}$  和压电陶瓷静止时光程差的大小, 使  $z = 2.35$ , 调节电路使  $\theta = 0$ 。正弦电流  $i_{02}$  的频率, 也即正弦相位调制的频率为1.6 kHz时, 位移的测量结果如图2(a)所示。断开反馈电路, 测量同一位移, 测量结果如图2(b)所示。

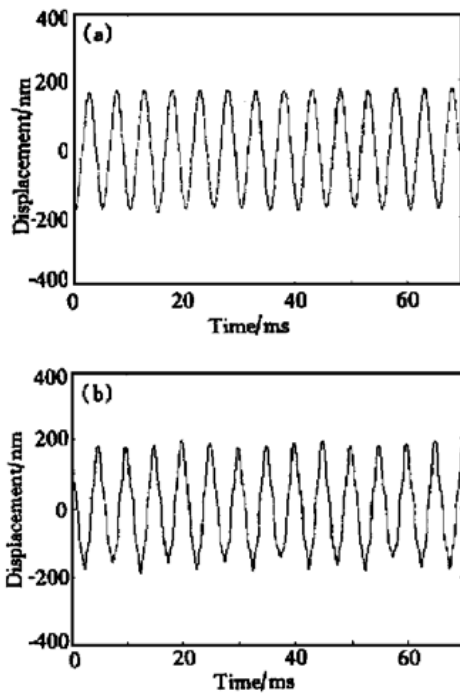


Fig. 2 The displacements measured when the feedback worked (a) and did not work (b)

为了检验反馈的效果,我们设计了一个干涉仪,测量同一位移,以提供近似真值。该干涉仪如图 3 所示,用 He-Ne 激光器作光源。由于 He-Ne 激光器的波长相对比较稳定,在很大程度上排除了光源波长变化对测量结果的影响。测量时干涉仪放在防震台上,光路用玻璃罩罩住,以将机械振动和空气扰动带来的测量误差降至最小。给压电陶瓷施加前述的电压时,位移的测量结果如图 4 所示。

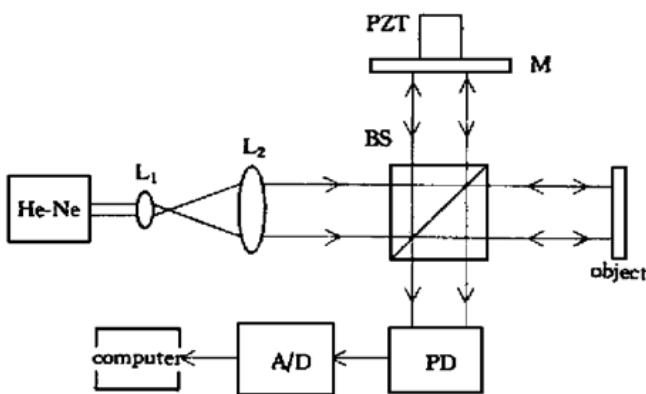


Fig. 3 The sinusoidal phase modulating interferometer using a He-Ne laser as light source

从位移曲线的形状上将图 2(a)、图 2(b) 与图 4 比较,可以发现图 2(a) 所示的位移曲线和图 4 几乎完全相同,而图 2(b) 与图 4 所示的位移曲线比较有明显的失真,从包络线可以看出,这个位移曲线存在一个较大的频率为 100 Hz 的位移误差。

与图 4 比较,图 2(a) 所示位移测量结果的均方

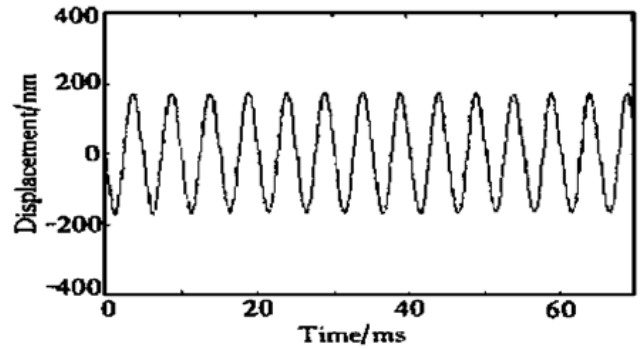


Fig. 4 The displacement measured with the interferometer showed in Fig. 3

根误差为 0.67 nm,而图 2(b) 所示位移测量结果的均方根误差为 8.2 nm。这说明反馈电路使位移测量中半导体激光器波长随温度和电流漂移,干涉仪机械振动和空气扰动带来的位移测量误差明显降低。

**结论** 本文在光热正弦相位调制半导体激光干涉系统中引入一个参考干涉信号,产生携带相位误差信息的反馈信号,用此反馈信号调制光源波长来补偿相位测量误差。实验结果表明在反馈的作用下,由于半导体激光器波长变化、干涉仪的机械振动和空气扰动引入的位移测量误差被明显降低。

参 考 文 献

[1] Wang X, Sasaki O, Takebayashi Y *et al.*. Sinusoidal phase modulating Fizeau interferometer using a self pumped phase conjugator for surface profile measurements. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(8): 2670~ 2674

[2] Sasaki O, Takebayashi Y, Wang X *et al.*. Exact measurement of flat surface profiles by object shifts in a phase conjugate Fizeau interferometer. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(10): 2957~ 2963

[3] Sasaki O, Takahashi K. Sinusoidal phase modulating interferometer using optical fibers for displacement measurement. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(19): 4139~ 4142

[4] Suzuki T, Sasaki O, Higuchi K *et al.*. Phase locked laser diode interferometer: High-speed feedback control system. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(25): 3622~ 3626

[5] Suzuki T, Sasaki O, Higuchi K *et al.*. Differential type of phase locked laser diode interferometer free from external disturbance. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(34): 7242~ 7248

[6] 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. & Laser Technol.*, 1999, **31**(8): 559~ 564

[7] 王学锋, 王向朝, 钱 锋 等. 光热调制半导体激光器波长降低干涉测量误差. *光电工程*, 1999, **26**(5): 1~ 3

## Photothermal Modulation Laser Diode Interferometer Insensitive to External Disturbances

Wang Xuefeng<sup>1)</sup> Wang Xiangzhao<sup>1)</sup> Yu Danyang<sup>2)</sup> Qian Feng<sup>1)</sup> Lu Hongbin<sup>1)</sup>

1), *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*  
2), *School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800*

(Received 21 July 2000; revised 17 November 2000)

**Abstract:** A photothermal-modulation laser diode interferometer that is insensitive to external disturbances such as fluctuations in the wavelength of the laser diode and mechanical vibrations of the optical components is proposed. A feedback control system is designed to control the wavelength of the light source and reduce the phase measurement errors of interference signal. The measured results show the usefulness of the interferometer.

**Key words:** laser diode; interferometer; optical testing; feedback control