

光热调制激光波长测量物体的微小振动*

王学锋 王向朝 钱 锋 陈 刚 卢洪斌 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 提出了一种新型半导体激光正弦相位调制干涉仪。使用此干涉仪测量了物体的微小振动。利用光热效应调制光源波长降低了光源光强变化引起的测量误差。模拟计算和实验结果证明了此干涉仪的有用性。

关键词 半导体激光器, 光热效应, 干涉仪, 光学检测, 纳米测量

1 引 言

采用半导体激光器(LD)代替气体激光器作为正弦相位调制(SPM)干涉仪的光源,不仅使干涉仪结构更加紧凑、体积明显减小,而且省去了PZT^[1-4]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LD注入电流正弦调制LD波长即可实现。这些优点使LD-SPM干涉技术有很高的研究和应用价值^[5-9]。

在LD-SPM干涉仪中,测量结果是根据干涉信号傅里叶变换后的频谱成分计算得到的。通过注入电流调制用作光源的LD波长的同时,光源的输出光强也被调制,这将影响干涉信号傅里叶变换后的频谱分布。因此通过注入电流直接调制LD的波长将造成较大的测量误差。本文利用两个LD组成的组合光源构成一个SPM干涉仪,检测被测物体的微小振动。用作光源的LD由直流电流驱动,使其输出强度不变,波长由另一个LD通过光热效应调制^[10]。波长的光热调制方法曾被用于稳定LD的频率^[11]。本文在正弦相位调制干涉仪中引入LD波长的光热调制技术,大大降低了直接调制LD波长时光强度变化引起的测量误差。

2 测量原理

2.1 直接调制

图1(a)为通过直接调制注入电流改变光源波长的微小位移干涉测量装置图。LD由直流和正弦电流 $\Delta i(t)$ 通过LM(LD modulator)驱动。LD发出的光经过准直透镜L后,由分束器BS分成两束平行光,分别照射到参考镜M和被测物体上。M与被测物体的反射光产生的干涉信号由光电二极管PD检测,经过模数转换器送入计算机。

在正弦电流的驱动下,LD的波长和强度分别为

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta_1 \Delta i(t) \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(69978024)、上海市应用材料研究与发展基金、中国科学院百人计划资助项目。

收稿日期: 1999-09-30; 收到修改稿日期: 1999-11-26

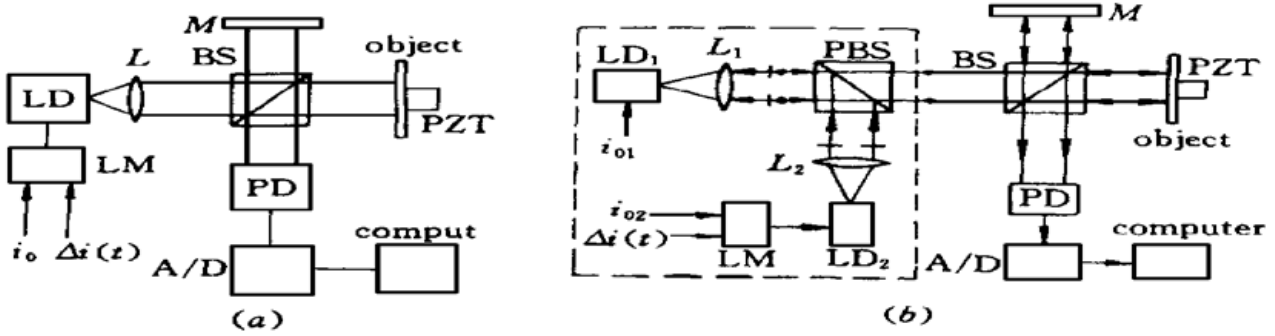


图1 直接调制光源波长的LD-SPM干涉仪(a)和光热调制光源波长的LD-SPM干涉仪(b)
Fig. 1 LD-SPM interferometers in which the wavelengths of light sources are modulated by
(a) injection current and (b) photothermal effect

$$g(t) = \beta_2 [i_0 + \Delta i(t)] \quad (2)$$

驱动电流的变化部分

$$\Delta i(t) = a \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$

设分束器的分束比为1:1,参考镜和物体的反射率相同,则PD检测到的干涉信号为

$$I(t) = I_0(t) + S_0(t) \cos[z \cos(\omega t + \theta) + \alpha] \quad (4)$$

式中

$$I_0(t) = S_0(t) = 2\beta_2 \left[i_0 + a \cos \left[\frac{\omega(2t - \tau_0 - \tau_r) + 2\theta}{2} \right] \right] \quad (5)$$

$\tau_0 = l_0/c$, $\tau_r = l_r/c$, l_0 和 l_r 分别为物光和参考光的光程。 $z = 2\pi\beta_1 a(l_0 - l_r)/\lambda_0^2$, $\alpha = 2\pi(l_0 - l_r)/\lambda_0$ 。光程差 $l_0 - l_r$ 为被测物体静止时的光程差 r_0 与待测的微小位移 $r(t)$ 之和,

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha(t) = 2\pi r_0/\lambda_0 + 4\pi r(t)/\lambda_0 \quad (6)$$

$r(t)$ 根据参考文献[1]中的频率解析法测出。由式(5)可知,LD输出光强随时间正弦变化使得 $I_0(t)$ 和干涉信号的振动振幅 $S_0(t)$ 均为随时间变化的函数。由于 $r(t)$ 是根据干涉信号傅里叶变换后得到的频率成分求出 $\alpha(t)$ 后得到的,而 $I_0(t)$ 和 $S_0(t)$ 随时间变化影响傅里叶变换后的频谱分布,这将造成微小位移 $r(t)$ 的测量误差。

2.2 光热调制

图1(b)为利用光热效应调制LD波长测量微小位移的干涉装置图。虚线框内为组合光源。LD₂由直流 i_{02} 和正弦电流 $\Delta i(t)$ 通过LM驱动。LD₂发出的光经过准直透镜 L_2 ,偏振分束器PBS,透镜 L_1 后,聚焦到LD₁上。由LD₁发出的光经过准直透镜 L_1 ,PBS后,由分束器BS分成两束平行光,分别照射到参考镜 M 和被测物体上。 M 与被测物体的反射光产生的干涉信号由PD检测,经过模数转换器送入计算机。LD₁与LD₂的光偏振方向互相垂直,PBS使LD₁的光透过而不反射到LD₂上,同时使LD₂的光入射到LD₁上,其中被LD₁反射的部分光束不会通过PBS进入两干涉臂产生干扰。

在电流 i_{02} 与 $\Delta i(t) = a \cos(\omega t + \theta)$ 的驱动下,LD₂的输出光强正弦变化,照射到LD₁上后,由于光热效应,LD₁的结温正弦变化,导致其波长变化。

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta_3 \beta_2 a \cos(\omega t + \theta) \quad (7)$$

式中, β_3 为波长的光热调制效率。干涉信号

$$I(t) = I_0 + S_0 \cos[z \cos(\omega t + \theta) + \alpha_0 + \alpha(t)] \quad (8)$$

式中 $I_0 = S_0 = 2\beta_2 i_0$, $z = 2\pi\beta_2\beta_3 a(l_0 - l_r)/\lambda_0^2$ 。由于LD₁的驱动电流 i_{01} 为直流, I_0 和 S_0 不随时

间变化, 因此对式(8) 进行傅里叶变换后, 频谱中光源光强被调制产生的影响大大减小, 微小位移 $r(t)$ 的测量误差降低。

3 模拟计算

假定所用半导体激光器的波长为 785 nm。选 $\alpha(t)$ 为一个频率 100 Hz, 振幅 3 rad 的正弦函数。由式(6) 求得相应的位移如图 3 (a) 所示。 $r(t)$ 为振幅 187.4 nm, 频率 100 Hz 的正弦振动。在式(4) 与(8) 中, 设 $z = 2.35 \text{ rad}$, $\theta = 0$, 调制电流 $\Delta i(t)$ 的频率为 1 kHz, 得到直接调制与光热调制下的干涉信号。在此干涉信号上叠加其 rms 值 5% 的正态分布的随机噪声, 得到图 2 (a), (b) 所示的干涉信号。在图 2(a) 中, 干涉信号的直流分量与交流分量的振幅均随时间变化, 图 2(b) 中两者为常数。根据图 2(a), (b) 所示的干涉信号求得的位移 $r(t)$ 在图 3(b), (c) 给出。图 3(b) 中的位移的均方根误差为 12.43 nm, 图 3(c) 中的位移的均方根误差为 0.97 nm。与图 3(b) 比较, 图 3(c) 的测量误差大幅度减小。

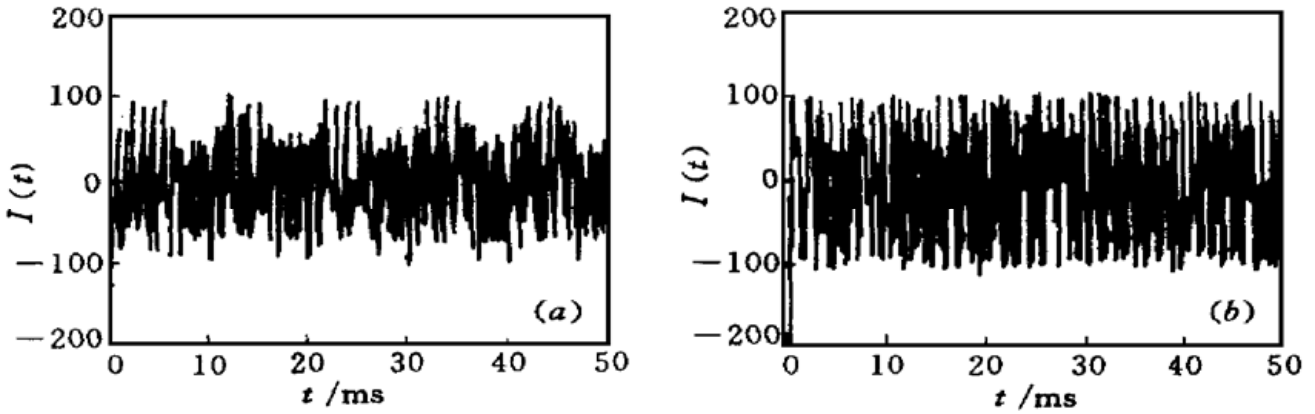


图 2 直接调制光源波长 (a) 和光热调制光源波长 (b) 情况下计算机模拟的干涉信号
Fig. 2 Computer-simulated interference signals in the case of (a) injection-current and (b) photothermal modulations

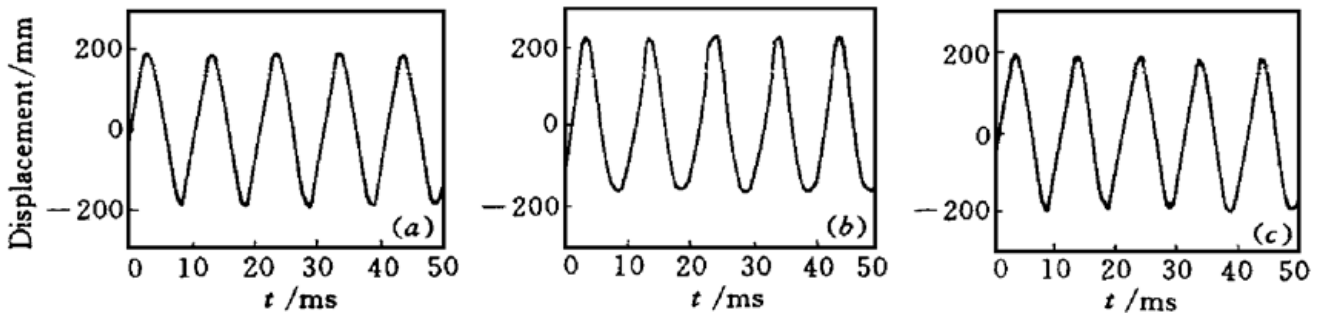


图 3 (a) 被测位移变化; (b), (c) 根据图 2(a), (b) 所示干涉信号计算出的位移变化
Fig. 3 (a) Object's movement to be measured; (b), (c) the movements obtained from the interference signals shown in Fig. 2 (a) and Fig. 2 (b), respectively

4 实验与结果

实验装置如图 1 所示。光源 LD, LD₁, LD₂ 的波长为 785 nm。被测物体为一个背面粘有 PZT 的反射镜。加一个 100 Hz 正弦电压信号给 PZT, 使反射镜沿光轴方向正弦振动。调节正

弦电流和 PZT 静止时光程差的大小,使正弦相位调制深度 $z = 2.35 \text{ rad}$, 调节电路使 $\theta = 0$ 。驱动 LD, LD₂ 的正弦电流频率,也即正弦相位调制的频率为 1 kHz 时,图 1(a), (b) 中的 PD 测得的干涉信号分别如图 4(a), (b) 所示。与图 4(a) 相比,由于光源光强不变化,图 4(b) 中的干涉信号包络线已平坦了许多,这与干涉信号表达式(4)中 I_0 和 S_0 随时间变化及式(8)中 I_0 和 S_0 不随时间变化的理论分析相吻合。使用图 1(b) 中的测量装置,测量了物体的位移变化,结果如图 5(a) 所示。这是一个振幅 100 nm, 频率 100 Hz 的正弦振动曲线。图 5(b) 为几分钟后的测量结果,测量的重复精度为 1.11 nm。

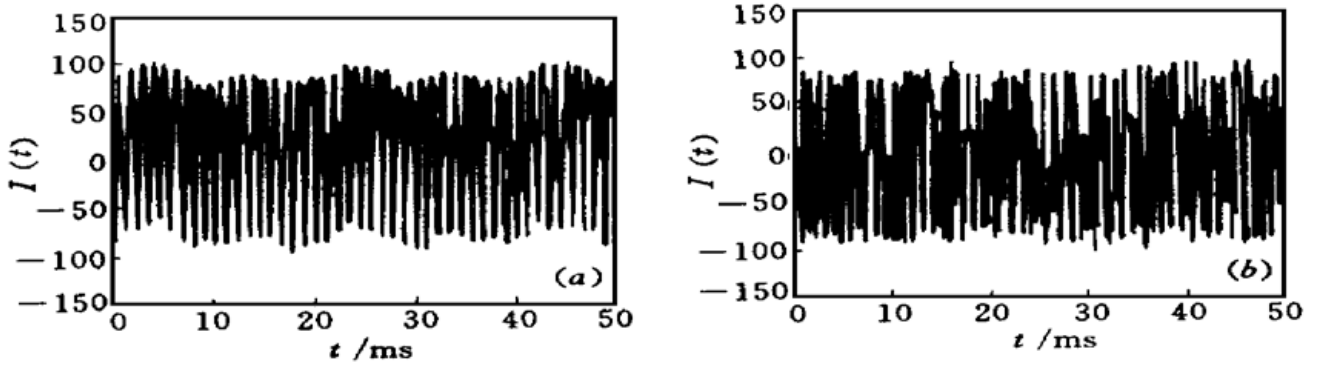


图 4 实验得到的直接调制光源波长 (a) 和间接调制光源波长 (b) 时的干涉信号

Fig. 4 Detected interference signals in the case of (a) injection-current and (b) photothermal modulation

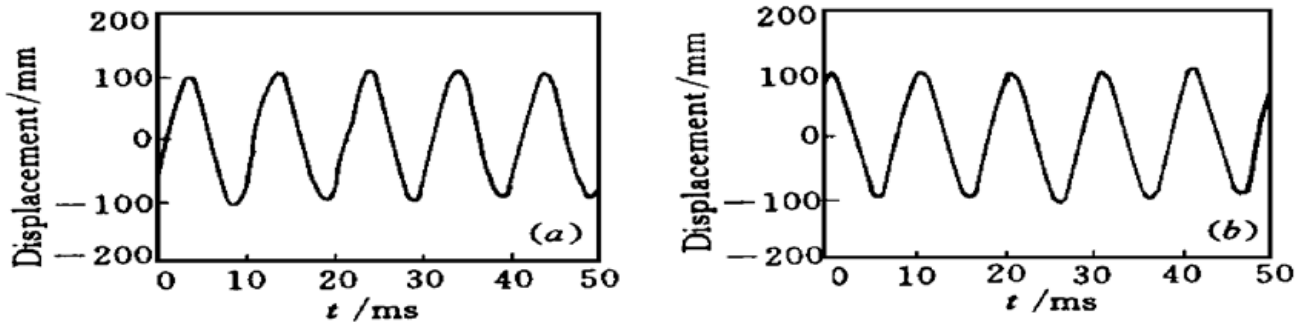


图 5 相隔几分钟测得的物体的位移变化

Fig. 5 Object's movements measured at an interval of a few minutes

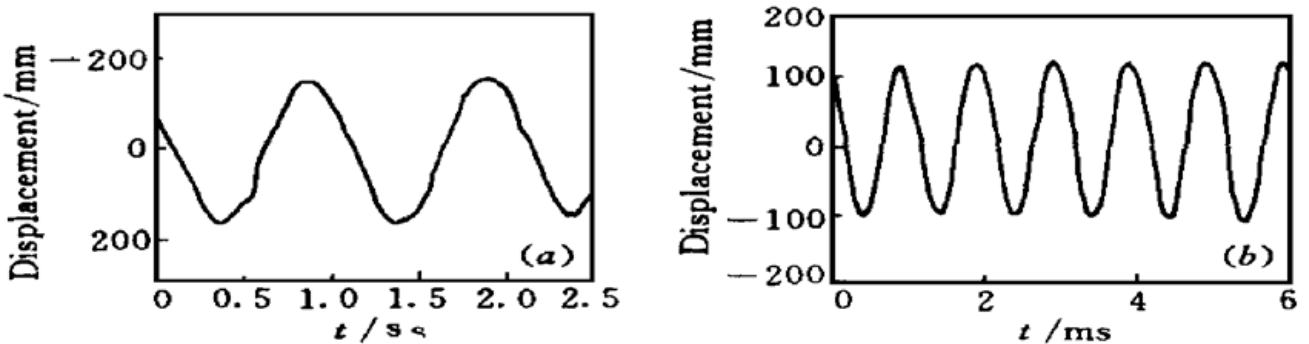


图 6 实验测得的 1 Hz (a) 和 1 kHz (b) 的正弦位移变化

Fig. 6 Measured sinusoidal movements with frequencies of (a) 1 Hz and (b) 1 kHz

改变 PZT 的振动频率,同时保持 LD₂ 的驱动电流频率为 PZT 频率的 10 倍,测量了缓慢和较快的微小位移变化。PZT 的频率为 1 Hz 时的测量结果如图 6(a) 所示,1 kHz 时测得的位移变化如图 6(b) 所示。

5 结 论

利用 LD-SPM 干涉仪测量微小位移变化时, 直接调制光源波长引起的光强变化是测量误差的主要来源。模拟计算和实验结果表明, 通过光热效应间接调制干涉仪中用作光源的 LD 的波长, 可高精度地测量微小位移变化, 大幅度降低了光强变化带来的测量误差。

参 考 文 献

- 1 O. Sasaki, K. Takahashi. Sinusoidal phase modulating interferometer using optical fibers for displacement measurement. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(19):4139~ 4142
- 2 X. Z. Wang, O. Sasaki, Y. Takebayashi *et al.*. Sinusoidal phase-modulating Fizeau interferometer using a self-pumped phase conjugator for surface profile measurements. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(8):2670 ~ 2674
- 3 O. Sasaki, Y. Takebayashi, X. Z. Wang *et al.*. Exact measurement of flat surface profiles by object shifts in a phase-conjugate Fizeau interferometer. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(10):2957~ 2963
- 4 O. Sasaki, X. Z. Wang. Phase-conjugate laser interferometers. *Opt. Technol. Contact.*, 1997, **35**:75~ 83
- 5 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
- 6 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
- 7 O. Sasaki, T. Manabe, X. Z. Wang *et al.*. Double sinusoidal phase-modulating laser-diode interferometer using self-pumped phase-conjugate wave for measuring displacements of rough surfaces. *PR'97 Proc.*, 1997, 523~ 526
- 8 T. Suzuki, O. Sasaki, S. Takayama *et al.*. Real-time displacement measurement using synchronous detection in a sinusoidal phase modulating interferometer. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(5):1033~ 1037
- 9 T. Suzuki, T. Okada, O. Sasaki *et al.*. Real-time vibration measurement using a feedback type of laser diode interferometer with an optical fiber. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(9):2496~ 2502
- 10 G. M. Klimcak, J. G. Gamparo. Photothermal wavelength modulation of a diode laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(2):211~ 214
- 11 S. Kakuma, K. Mishima, R. Ohba. Frequency control of a laser diode by a photothermal effect and its application to frequency stabilization. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(9):2992~ 2996

Photothermal Modulation of Laser Diode Wavelength for Measuring Microvibrations

Wang Xuefeng Wang Xiangzhao Qian Feng Chen Gang
Lu Hongbin Chen Gaoting Fang Zujie

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

Abstract A novel sinusoidal phase-modulating (SPM) laser-diode interferometer, which can be used to measure microvibrations with a high accuracy, is reported. In this paper, the photothermal wavelength modulation of a laser diode is employed in SPM interferometer to decrease the measurement errors caused by light-intensity changes. The computer simulations and experiments verify the usefulness of the interferometer.

Key words laser diode, photothermal effect, interferometer, optical testing, nanometer measurement