

文章编号: 0258-7025(2001)05-0455-04

用于纳米精度大范围位移测量的 半导体激光干涉仪*

王学锋 王向朝 钱 锋 卢洪斌 宋 松 步 扬

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

摘要 在光频光热调制半导体激光正弦相位调制干涉仪的基础上,提出了一种扩大其测量范围的方法,使得在保持纳米精度的前提下,测量范围由半个波长扩大为 $125.56 \mu\text{m}$,并讨论了进一步扩大测量范围的可能性。本方法得到了模拟计算和实验结果的很好验证。

关键词 纳米测量,光热调制,干涉仪,半导体激光器,光学检测

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A

Laser Diode Interferometer Used to Measure Displacements in Large Range with a Nanometer Accuracy

WANG Xue-feng WANG Xiang-zhao QIAN Feng LU Hong-bin SONG Song BU Yang
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract In this paper, a new method is proposed to enlarge the measurement range of the LD-SPM interferometer with a photothermal wavelength modulation. Using this method, the measurement range is enlarged from half wavelength to $125.56 \mu\text{m}$ and the measurement accuracy is 1.2 nm . The possibility of further enlarging the measurement range is discussed.

Key words nanometer measurement, photothermal modulation, interferometer, laser diode, optical measurement

1 引 言

在传统的干涉测量方法中,测量范围和测量精度是两个互相矛盾的量,或者在较小的测量范围内达到较高的测量精度^[1~3],或者以较低的测量精度来换取较大的测量范围,如双波长干涉测量^[4]、双重正弦相位调制干涉测量法^[5]等。而在一些实际应用中,测量范围和测量精度的要求都比较高。因此改进已有的测量方法,使测量范围得到扩大的同时,满足测量精度的要求,是一项重要的工作。

扩大测量范围的工作已有报道,文献^[6]将正弦相位调制半导体激光干涉仪的测量范围扩大到 1 mm ,但只是给出测量范围在 $1.6 \mu\text{m}$ 内的测量精度:均方根误差为 5 nm ,没有给出测量范围超过 $1.6 \mu\text{m}$ 时的测量精度,而且该干涉仪结构复杂。文献^[7]利

用差拍技术将 Fabry-Perot 干涉仪的测量范围由 $0.18 \mu\text{m}$ 扩大到 $1.1 \mu\text{m}$,测量不确定度为 3.5 nm ,该方法比较复杂,导致干涉仪结构复杂。Suzuki 等在位移的实时测量中实现了测量范围的扩大,但是这种范围的扩大受到限制,而且测量精度也相对较低^[8,9]。

正弦相位调制(SPM)干涉测量法是一种高精度干涉测量方法^[10~13],半导体激光器(LD)的引入使得 SPM 干涉仪结构更加紧凑简单。在此基础上,为降低测量误差,提高测量精度,作者提出了光频光热调制 LD-SPM 干涉仪^[14,15]。此干涉仪测量的重复精度接近 1 nm ,但位移的测量范围不超过 $\lambda/2$ 。由于测量范围过小,不能用于同时要求大范围、高精度的场合。本文以该干涉仪为基础,分析了其测量范围过小的原因,提出了扩大测量范围的方法,突破了该干涉仪只有半个波长测量范围的限制,实现了大范围内的纳米精度测量。

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

图1为光频光热调制 LD-SPM 干涉仪,虚线框内为组合光源。LD₂ 由直流 i_{02} 和正弦电流 $\Delta i(t) = a \cos(\omega_c t + \theta)$ 通过 LM(LD modulator)驱动。LD₂ 发出的光经过准直透镜 L₂, 偏振分束器 PBS, 透镜 L₁ 后, 聚焦到 LD₁ 上。由 LD₁ 发出的光经过准直透镜 L₁, 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 Object 上。M 与 Object 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。

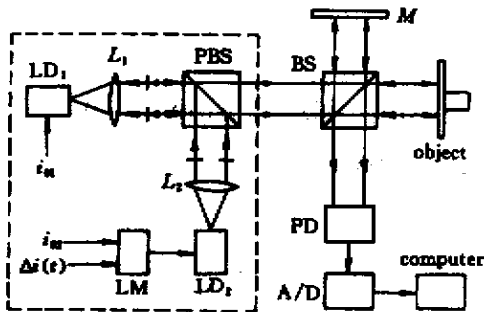


图1 光频光热调制 LD-SPM 干涉仪

Fig.1 LD-SPM interferometer with a photothermal wavelength modulation

PD 检测到的干涉信号交流成分为

$$S(t) = S_0 \cos[z \cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_0 + \alpha(t)] \quad (1)$$

式中

$$z = 2\pi\beta al / \lambda_0^2 \quad (2)$$

$$\alpha(t) = 4\pi r(t) / \lambda_0 \quad (3)$$

S_0 为干涉信号交流成分的振动振幅, ω_c 为正弦相位调制的角频率, α_0 为被测物体静止时干涉信号的相位, β 为波长的调制系数, l 为被测物体静止时干涉仪两臂的光程差, $r(t)$ 为被测物体的位移, λ_0 为 LD₁ 的中心波长。

被测物体的位移 $r(t)$ 是根据干涉信号傅里叶变换后, 先求出 z 值, 然后利用反正切函数求出其相位 $\alpha(t)$ 后得到的^[2]。由于 $\alpha(t)$ 的值域为 $[-\pi, \pi]$, 因此对于任意大小的位移, 它的求出值均在 $[-\lambda_0/4, \lambda_0/4]$ 范围内, 这就不能正确测量范围超过 $[-\lambda_0/4, \lambda_0/4]$ 的位移。

为了能够测量超过此范围的位移, 我们首先考虑物体在某一时刻 t_1 的位移

$$r(t_1) = \frac{\lambda_0}{4\pi} \alpha(t_1) \quad (4)$$

其中

$$\alpha(t_1) = 2n\pi + \alpha_{t1} \quad (5)$$

上式中, n 为整数, $-\pi \leq \alpha_{t1} \leq \pi$ 。对于 $\alpha(t_1) > \pi$ 或 $\alpha(t_1) < -\pi$, 如果能够确定 n 的数值, 则物体的位移就可以正确地求出。由于 $\alpha(t)$ 是根据干涉信号傅里叶变换后逐点求出的, 因此可以逐点考虑。首先考虑大于和小于 π (或 $-\pi$) 的两个点 A 和 B (如图 2), 它们的相位分别为 α_A 和 α_B , 假设 $3.1 < \alpha_A < \pi$, $\pi < \alpha_B < 3.2$, 则根据反正切函数求出的相位值 $\alpha'_A = \alpha_A$, 而 $\alpha'_B = \alpha_B - 2\pi$ 。如果相邻两点相位差的绝对值小于 π , 在 $[-\pi, \pi]$ 的边界, 可以将相邻两点相位差超过 π 作为判断相位超越 $[-\pi, \pi]$ 的依据。对于相邻的 A, B 两点, 由于 $\alpha'_B - \alpha_A < -\pi$, 因此 α'_B 对应的实际相位值 α_B 超出了 $[-\pi, \pi]$ 这一范围, 对它进行修正后, 得到 $\alpha_B = \alpha'_B + 2\pi$ 。同理, 对于 C, D 两点, $\alpha_C = \alpha'_C + 2\pi$, $\alpha_D = \alpha'_D + 2\pi$ 。对于 F 点和 G 点, $\alpha'_G - \alpha'_F < -3\pi$, 相应的修正式为 $\alpha_G = \alpha'_G + 4\pi$ 。一般而言, 相邻的两点 α_{t1} 和 α_{t2} , 若有 $\alpha'_{t2} - \alpha_{t1} < -n\pi$ (n 为奇数) 则 $\alpha_{t2} = \alpha_{t1} + (n+1)\pi$ 。相反地, 若有 $\alpha'_{t2} - \alpha_{t1} > n\pi$, 则 $\alpha_{t2} = \alpha_{t1} - (n+1)\pi$ 。

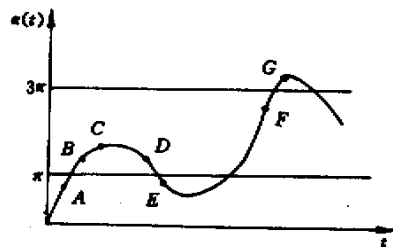


图2 扩大位移测量范围的例子

Fig.2 An example of enlarging the measurement range

根据以上推导, 只要采样频率满足相邻两个采样点的相位差绝对值小于 π , 式(5)中的 n 就可以正确地求出, 物体位移就可以根据式(3)求出, 从而使位移的测量范围可以扩大到原来测量范围的许多倍。在实际测量时, 当位移斜率很大时, 受到数据采集卡采集速率的限制, 相邻两个采样点的相位差绝对值可能会大于 π , 这时就不能正确测出位移, 因此测量范围受到数据采集卡最大采集速率的限制, 但是与原来的测量范围相比, 则大大地扩大了。

3 模拟计算

选 $\alpha(t)$ 为一个频率 100 Hz, 振幅 1005 rad 的正

弦函数。如果所用半导体激光器的波长为 785 nm , 则位移 $r(t)$ 为峰峰值 $125.56 \mu\text{m}$, 频率 100 Hz 的正弦振动, 如图 3(a) 所示。选取正弦相位调制频率 $\omega_c/(2\pi)$ 为 50 kHz , 正弦相位调制深度 $z = 2.35 \text{ rad}$, $\alpha_0 = 0$, $\beta = 0$, 根据式(1)得到模拟干涉信号。在模拟干涉信号上叠加其 rms 值 5% 的正态分布的随机噪声, 根据此含有噪声的干涉信号, 采用参考文献 2 的正弦相位调制干涉测量方法的解调方法和本文叙述的扩大测量范围的方法求得的位移 $r(t)$ 如图 3(b) 所示。和图 3(a) 所示位移真值比较, 图 3(b) 中的位移均方根误差为 0.96 nm 。

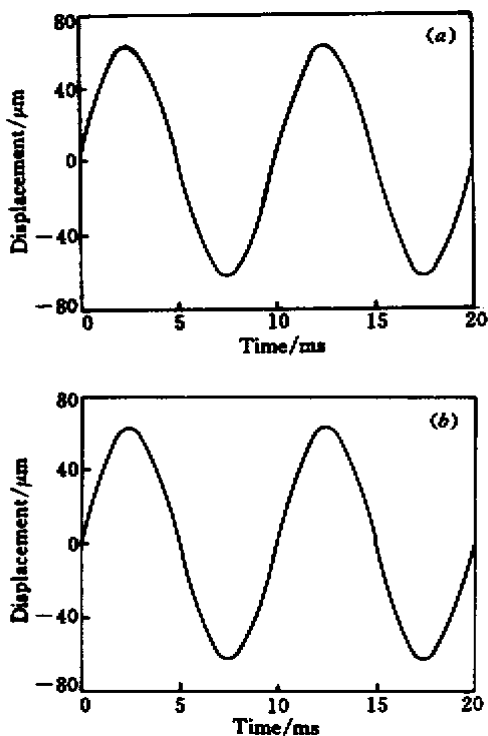


图 3 被测位移 (a) 和根据模拟干涉信号计算出的位移 (b)

Fig. 3 (a) Object's movement to be measured; (b) is the movement obtained from the simulated interference signal

4 实验与结果

实验装置如图 1 所示, LD_1 和 LD_2 的波长均为 $\sim 785 \text{ nm}$ 。被测物体 Object 为一个由喇叭驱动的反射镜。实验时, 实验装置放在防震平台上, 并且在环境噪声较小的时候进行。首先加一个 200 Hz 正弦电压信号给喇叭, 使反射镜沿光轴方向振动。调节正弦电流的幅度和喇叭静止时光程差的大小, 使 $z = 2.35 \text{ rad}$ 。当驱动 LD_2 的正弦电流频率, 即正弦相位调制频率 $\omega_c/2\pi = 39 \text{ kHz}$ 时, 使用图 1 中的测量

装置, 我们测量了物体的位移变化。两干涉臂产生的干涉信号由 PD 接收后转化为电信号, 经放大器放大后, 由数据采集卡采集到计算机中, 然后根据参考文献 2 的正弦相位调制干涉测量方法的解调方法和本文叙述的扩大测量范围的方法, 计算出反射镜的位移, 结果如图 4(a) 所示。这是一个峰峰值为 $11.02 \mu\text{m}$, 频率 200 Hz 的正弦振动曲线。图 4(b) 为几分钟后的测量结果, 两次测量的重复精度为 1.2 nm 。与半个波长的测量范围相比, 采用本文的方法, 测量范围扩大了 28 倍多, 但测量的重复精度仍较高。由于实验条件所限(用于固定 LD 的调整架的调节精度较低), 未进行更大范围的位移测量, 但根据本文原理, 测量范围还可以大大增加。

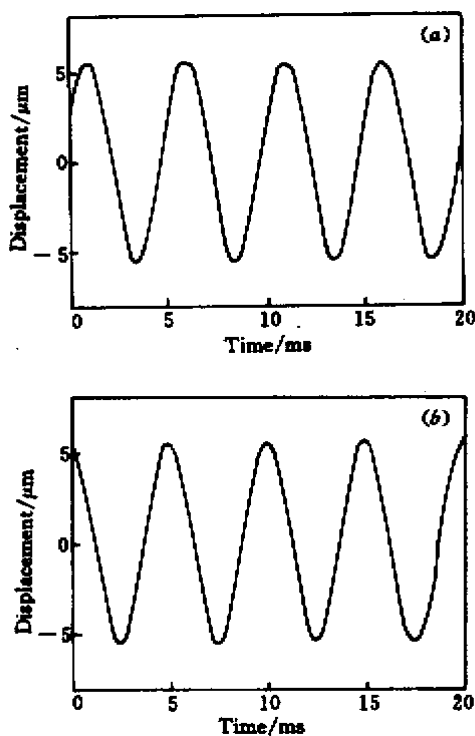


图 4 相隔几分钟测得的物体的位移

Fig. 4 Object's movements measured at an interval of a few minutes

5 结论

本文提出了一种突破原有光频光热调制半导体激光干涉仪测量范围限制的新方法。使用此方法, 理论上可使位移测量范围从半个光源波长扩大到数十百个光源波长。根据加噪音后的模拟干涉信号, 计算得到了峰峰值大于 $125.56 \mu\text{m}$ 的振动曲线。实验以 1.2 nm 的重复精度测量了峰峰值大于 $11 \mu\text{m}$ 的振动, 新方法的可行性得到了很好的验证。

参 考 文 献

- 1 O. Sasaki , H. Okazaki. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement. *Appl. Opt.* , 1986 , **25** (18) 3137 ~ 3140
- 2 O. Sasaki , K. Takahashi. Sinusoidal phase modulating interferometer using optical fibers for displacement measurement. *Appl. Opt.* , 1988 , **27** (19) 4139 ~ 4142
- 3 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
- 4 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
- 5 O. Sasaki , T. Yoshida , T. Suzuki. Double sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer for distance measurement. *Appl. Opt.* , 1991 , **30** (25) 3617 ~ 3621
- 6 Y. F. Wu. A novel sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer based on slowly-varying approximation. *Acta Optica Sinica* (光学学报) , 1997 , **17** (11) :1528 ~ 1532 (in Chinese)
- 7 Z. Chao , Y. Xu , J. Xu. Fabry-Perot interferometer used for large range nanometer measurement. *Acta Metrologica Sinica* (计量学报) , 1999 , **20** (4) 241 ~ 246 (in Chinese)
- 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 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
- 11 O. Sasaki , X. Z. Wang. Phase-conjugate laser interferometers. *Opt. Technol. Contact.* , 1997 , **35** :75 ~ 83
- 12 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
- 13 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
- 14 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. *Optics & Laser Technology* , 1999 , **31** (8) 559 ~ 564
- 15 X. F. Wang , X. Z. Wang , F. Qian *et al.*. Photothermal wavelength modulation of a laser diode for decreasing interferometric error. *Opto-Electronic Engineering* (光电工程) , 1999 , **26** (5) :1 ~ 3 (in Chinese)