

测量微观不平度的 90°相移激光干涉仪

梁显鉴

(华南师范大学实验中心, 广州 510631)

摘 要 叙述了测量微观不平度的 90°相移激光干涉仪的原理和构成。对这种新型干涉仪的性能及有关问题作了讨论。测量结果的计算和样品扫描的控制, 由个人计算机完成。垂直分辨率达 1 nm, 横向分辨率达 10 μm。实验结果证明了系统的稳定性。

关键词 90°相移, 激光, 干涉仪, λ/4 片, 分辨率, 稳定性。

1 原 理

图 1 是测量微观不平度的 90°相移激光干涉仪的示意图。自分光镜 5 出射的两束各包含参

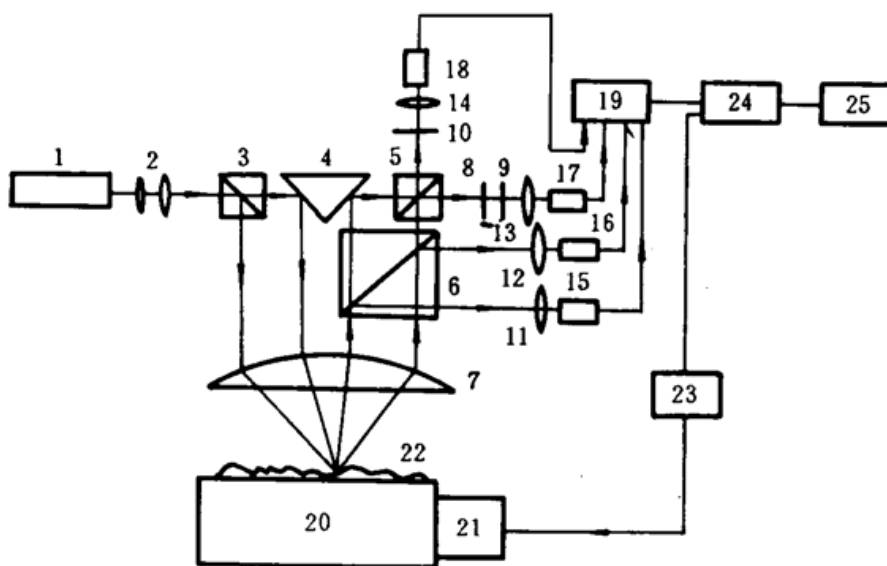


Fig. 1 Schematic diagram of the phase quadrature laser interferometer

1. He-Ne laser, 2. beam expander, 3. polarizer, 4. mirror, 5. 6. polarizers, 7. objective lens, 8. λ/4 plate, 9, 10. depolarizer, 11, 12, 13, 14. convergent lens, 15, 16, 17, 18. photodiode detectors, 19. A/D converter, 20. displacement working table, 21. Motor, 22. sample, 23. Motor control, 24. Computer interface, 25. PC computer

考光和测量光的偏振相干光束, 其中一束通过 λ/4 片 8, 产生 90°相移。两束光的强度, 一束按正弦变化, 另一束按余弦变化, 强度始终不会等于零。两束光的光信号由光电二极管接收器 17、18 接收, 转变为电信号, 经放大, 再经 A/D 转换器 19, 然后输入个人计算机 25。自分光镜 6 反射出射的两束光, 为计算机提供必要的数据。最后由计算机计算出样品表面测量点与参考点的高度差 ΔZ。

对样品表面不平度高度的测量, 由计算机控制位移工作台 20, 进行线扫描和面扫描。最后显示和记录测量结果。

2 光学系统

如图 1 所示。He-Ne 激光器 1 的功率为 10 mW, 输出等幅线偏振光束。由激光器 1 输出的激光束, 经扩束器 2 准直扩束, 成为直径 6 mm 的光束, 入射偏振分光镜 3。调整入射光束电矢量的取向, 使经偏振分光镜 3 的反射光束和透射光束的强度比为 1:1。反射的 S 偏振光束平行于物镜 7 的光轴, 入射物镜后聚焦于样品表面上的一点, 这一点也就是物镜的焦点。S 偏振光束是参考光束。参考光束的聚焦点即物镜焦点是参考点。透射的 P 偏振光束被反射镜 4 反射, 反射光束与物镜光轴成一微小角度 $\Delta\beta$, 入射物镜后聚焦于样品表面上的另一点。P 偏振光束是测量光束。测量光束的聚焦点是测量点。参考光点和测量光点正可分开。参考光点中心与测量光点中心的距离为横向分辨率。横向分辨率 $d = f \Delta\beta$, 式中 f 为物镜焦距, $f = 85$ mm。

两束偏振光在样品表面反射后, 再通过物镜入射分光镜 6。从分光镜 6 出射两束反射光和两束透射光。从分光镜 6 出射的两束反射光, 分别经会聚透镜 11 和 12 聚光, 由光电二极管接收器 15 和 16 接收。设输入接收器 15 和 16 的两束光的强度分别为 I_1 和 I_2 , 则:

$$I_1 = AI_a, \quad I_2 = BI_b \quad (1)$$

式中 I_a 和 I_b 分别为从样品表面反射的测量光束和参考光束的强度; A 和 B 为小于 1 的系数。从分光镜 6 出射的两束透射光, 经反射镜 4 的反射和分光镜 5 的分光, 出射两束包含参考光和测量光的偏振相干光束。其中一束光通过云母 $\lambda/4$ 片 8。 $\lambda/4$ 片的安装, 使其光轴与光束的偏振面平行。光束通过 $\lambda/4$ 片后相位迟后 $\pi/2$ 。然后光束通过 45° 安装的检偏器 9, 由会聚透镜 13 聚光而被光电二极管接收器 17 接收。另一束光通过 45° 安装的检偏器 10, 由会聚透镜 14 聚光而被光电二极管接收器 18 接收。设输入接收器 17 和 18 的两束光的强度分别为 I_3 和 I_4 , 则:

$$\left. \begin{aligned} I_3 &= A_3I_a + B_3I_b + 2\gamma(A_3I_aB_3I_b)^{1/2} \sin(\theta_a - \theta_b) \\ I_4 &= A_4I_a + B_4I_b + 2\gamma(A_4I_aB_4I_b)^{1/2} \cos(\theta_a - \theta_b) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 A_3 、 B_3 、 A_4 、 B_4 为小于 1 的系数; γ 为激光束的相干度; $(\theta_a - \theta_b)$ 为测量光束与参考光束的相位差。设样品表面上测量点与参考点的高度差为 ΔZ , 干涉相位差为 $\theta = \theta_a - \theta_b$, 则:

$$\theta = \theta_a - \theta_b = 2k\Delta Z + \phi_{ab} \quad (3)$$

式中 k 为激光波数, $k = 2\pi/\lambda$, 其中 λ 为激光波长; ϕ_{ab} 为相位补偿常数。由 (3) 式可求得样品表面两点的高度差 ΔZ 。

3 数据处理

四个光电二极管同时接收四路光信号, 转变为电信号, 经放大, 由 8 位 A/D 转换器将模拟量转变为数字量, 通过接口, 输入计算机。计算机要从 (3) 式计算出 ΔZ_i , 必须由 (2) 式求得 $\theta_a - \theta_b = \theta$ 。为了从 (2) 式计算 θ , 必须对 (2) 式中的系数 A_3 、 A_4 、 B_3 、 B_4 进行变换处理。设 $R_3 = A_3/A$, $R_4 = A_4/A$, $S_3 = B_3/B$, $S_4 = B_4/B$, 则:

$$\left. \begin{aligned} R_3 &= A_3/A = I_3/I_1, & R_4 &= A_4/A = I_4/I_1, \\ S_3 &= B_3/B = I_3/I_2, & S_4 &= B_4/B = I_4/I_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

以 R_3 、 R_4 、 S_3 、 S_4 代入 (2) 式相除得:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{[I_3 - (R_3 I_1 + S_3 I_2)] \sqrt{R_4 I_1 + S_4 I_2}}{[I_4 - (R_4 I_1 + S_4 I_2)] \sqrt{R_3 I_1 + S_3 I_2}} \quad (5)$$

计算机由(5)式和(4)式,根据四路光信号的强度就可以计算出 θ 。然后由(3)式计算出 ΔZ_i 。 θ 的值在 $-\pi \sim +\pi$ 的范围内。如果工作台受到偶尔震动, θ 得会超出 $-\pi \sim +\pi$ 的范围。为了避免偶尔震动的影响,在计算机程序中,假设 $|\theta_i - \theta_{i-1}| < \pi$,以使产生连续的测量结果。但由于这一假设,限制了对表面不连续点的测量,使不连续点突变高度只可测量到 $< \lambda/4$ 。

4 调整要点

4.1 激光束的调整

激光束是测量的基准,必须精确调整。从调节激光头开始,调整激光束的方向和电矢量的取向,使从扩束器2出射的激光束与工作台移动方向平行,同时使经偏振分光镜3后的参考光束和测量光束的强度比为1:1。微调偏振分光镜3,使参考光束平行于物镜光轴入射物镜。在调整激光束时,其他的光学元件应逐一作相应的调节,直至光电二极管接收器接收的信号最大。

4.2 横向分辨率的调整

横向分辨率,通过微调反射镜4获得。微调反射镜4,使参考光点和测量光点在垂直测量范围内都能分开,取其中心的最大距离为横向分辨率。通过实验,得到的分辨率为 $10 \mu\text{m}$ 。

4.3 工作台的调整

工作台的调整,主要包括样品放置的调整和物镜焦面的找寻。

样品放置的调整,就是调整样品的安装,使样品被测量表面平行于工作台的移动方向。否则,可能会造成较大的测量误差。这与物镜7有关。物镜7的焦深取决于它的焦距和光束的入瞳。由于物镜的像差和衍射的存在,使焦深变小。如果样品表面与工作台移动方向不平行,随着工作台的移动,样品表面可能超出焦深范围,导致较大的测量误差。

物镜焦面的找寻,是使装上样品的工作台移动,当参考光束经样品表面反射后,再通过物镜,出射的光束为平行光束时,物镜的焦面被找到。

5 结果与讨论

5.1 测量实例

测量的样品是表面粗糙的反射镜。对样品表面作了 6 mm 的线扫描。为了试验系统的稳定性,作了正向和反向的线扫描。测量结果如图2所示。图中的a和b分别是正向和反向线扫描结果。

5.2 分辨率

本干涉仪的垂直分辨率为 1 nm 。横向分辨率为 $10 \mu\text{m}$ 。垂直分辨率主要受物镜像差、光电二极管噪声和 $\lambda/4$ 片精度所限制。横向分辨率受参考光束和测量光束聚焦光点的大小所限制,这主要与物镜的像差和衍射有关。

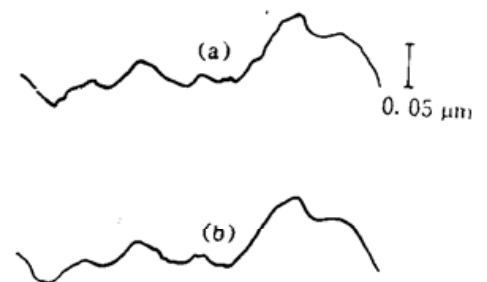


Fig. 2 Line-scanning of mirror surface

5.3 测量范围

垂直测量范围: $R_a = 0.002 - 0.16 \mu\text{m}$ 。水平测量范围: x 向为 150 mm; y 向为 80 mm。垂直测量范围主要受物镜的焦距、像差、衍射和光束入瞳所限制。水平测量范围主要受工作台移动的直线性所限制。

5.4 垂直测量重复性

R_a 重复测量误差 $< 0.05\%$ 。这说明系统具有较高的稳定性。垂直测量的重复性主要取决于对样品表面扫描的稳定性, 而扫描的稳定性取决于工作台移动平稳性。

结束语 目前, 该干涉仪正在仪器化。由于它的分辨率较高, 测量范围较宽, 测量重复性较好, 通过微机程序软件设计, 可以测量多个表面微观不平度参数, 被测数据结果及表面轮廓曲线可在荧光屏上显示, 并可由打印机打印出来, 因此, 仪器化前景较好。它可以测量平面, 设计相应的附件, 与附件连用, 可以测量外圆柱面、锥面和斜面等, 因此, 可广泛应用于生产过程中, 对光学零件、机械零件和微电子元件光滑表面进行微观不平度的测量。

参 考 文 献

- [1] M. J. Downes, W. H. McGivern, H. J. Ferguson, Optical system for measuring the profiles of super-smooth surfaces. *Precis. Eng.*, 1985, 7(4): 211~215
- [2] R. C. White, D. C. Emmony, Active feedback stabilization of a Michelson interferometer using a flexure element. *J. Phys.*, 1985, 18(8): 658~663
- [3] E. R. Peck, S. W. Obetz, Wavelength or length measurement by reversible fringe counting. *J. Opt. Soc. Am.*, 1953, 43(6): 505~509

Phase Quadrature Laser Interferometer for Measuring Microscopic Asperity

Liang Xianjian

(*Experimental Center, South China Normal University, Guangzhou 510631*)

(Received 21 March 1995; revised 19 June 1995)

Abstract The principle and fabrication of the phase quadrature laser interferometer for measuring microscopic asperity are described. The behavior of the novel interferometer and some problems are discussed.

The calculation of the measured result and sample scanning in the interferometer is performed by a PC computer. Vertical resolution is 1 nm, and lateral resolution is 10 μm . The result shows the good stability of the system.

Key words phase quadrature, laser, interferometer, $\lambda/4$ retardation plate, resolution, stability.