

激光镜镜面粗糙度的干涉测量

张耀宁 程祖海

(华中理工大学激光技术国家实验室 武汉 430074)

提要 开发了一种激光镜镜面粗糙度的全场、非接触干涉测量方法。测量了两面不同粗糙度的铜镜,测出的数据和用 6JA 型显微干涉轮廓仪测量的结果相吻合。测量的范围为 $0.01 \sim 0.12 \mu\text{m}$,理论上测量的精度可达 $0.002 \mu\text{m}$ 。它对镜面抛光过程的控制有实际意义。

关键词 干涉测量,粗糙度,激光镜

1 引 言

众所周知,镜子的反射率和以镜面微观起伏的均方根偏差 σ 表征的镜面粗糙度有关。随着对激光镜反射率的要求愈来愈高,镜面抛光工艺变得重要起来。表面粗糙度的测量分接触式和非接触式。非接触式测量又有用显微镜目测、光散射和光干涉等几种方法^[1]。镜面粗糙度测量只能使用非接触式。利用显微干涉轮廓仪测出的是微观不平度十点高度 R_z 值或算术平均高度 R_a 值,而且无法用它实现在线测量。全息干涉法和散斑法可测得 σ 值,但不能同时反映镜面面形已加工到的精度。我们探索了用泰曼-格林干涉仪在线测量的可能性。利用干涉条纹的强度反差和镜面粗糙度 σ 的关系,实验上测出了二面不同粗糙度铜镜的 σ 值。同时对干涉条纹细化、定级,便可拟合出镜面面形的拟合公式 $f(x, y)$, 计算机软件给出三维面形和二维面形曲线显示^[2]。证明了用泰曼干涉仪的光路布置可以实现在线、全场、非接触式的镜面粗糙度测量。这对于镜面精加工过程的控制有实际意义。

本文首先分析了干涉条纹强度反差和表面粗糙度的关系,然后给出了对两片已知粗糙度的铜镜的测试结果,最后分析了这种方法可测的表面粗糙度的测量范围和测量精度。

2 镜面粗糙度的镜面干涉条纹强度的反差

泰曼干涉方法测试镜面粗糙度系统如图 1 所

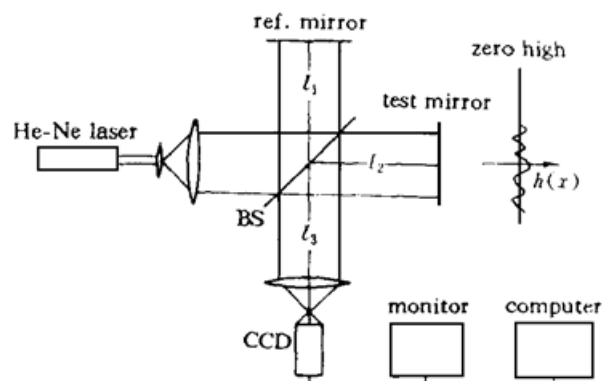


图 1 使用泰曼干涉仪的表面粗糙度测量系统示意图

Fig. 1 The scheme of the surface roughness measurement system with a Twyman interferometer

示。BS 为分束镜, $2l_1 + 3l_3$ 为经参考镜反射到 CCD 摄像管的光程, $2l_2 + l_3$ 为经被测镜反射到 CCD 摄像管的光程。按物理光学这两束平面波光束可表示为

$$E_1 = A_1 \exp[ik(2l_1 + l_3)] \quad (1)$$

$$E_2 = A_2 \exp\{ik[2l_2 + l_3 + 2h(x, y) + 2\omega(x, y)]\} \quad (2)$$

式中 k 为波数($k = 2\pi/\lambda$), $h(x, y)$ 为相对于表面平均高度的高度偏差, $\omega(x, y)$ 为相对于镜面理想面形的偏差。两束光干涉后得到的干涉图像的强度分布

$$I(x, y) = (E_1 + E_2)(E_1 + E_2)^* = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\{2k[(l_1 - l_2) - \omega(x, y)] - 2kh(x, y)\} \quad (3)$$

设镜面微观起伏的随机分布为高斯分布, 则它的几率分布函数

$$P(h) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中 σ 为表征高斯分布特性的均方根偏差。于是由表面微观起伏 $h(x, y)$ 引起的光波相位变化的期望值

$$\exp(i\Delta\Phi) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(2ikh)P(h)dh \quad (5)$$

将积分核作实数项和虚数项分离后分别积分, 得到

$$\cos[2kh(x, y)] = \exp(-2k^2\sigma^2) \quad \sin[2kh(x, y)] = 0 \quad (6)$$

式(3)中 \cos 项按三角函数关系展开, 并以式(6)代入, 则强度分布度可重写为

$$I(x, y) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \exp(-2k^2\sigma^2) \cos\{2k[(l_1 - l_2) - \omega(x, y)]\} \quad (7)$$

当 $\{2k[(l_1 - l_2) - \omega(x, y)]\} = N\pi$, N 为整数时干涉条纹强度达极值

$$\begin{cases} I_{\max} = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \exp(-2k^2\sigma^2) \\ I_{\min} = A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2 \exp(-2k^2\sigma^2) \end{cases} \quad (8)$$

干涉条纹的反差 C 定义为

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = C_a C_\sigma \quad (9)$$

$$C_a = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2} \quad C_\sigma = \exp\left[-\frac{8\pi^2\sigma^2}{\lambda^2}\right] \quad (10)$$

C_a 决定于两束光波的振幅, 它和被测镜面的基片材料有关, 也和干涉仪使用参数有关; C_σ 反映镜面粗糙度对于干涉条纹反差的影响。使用同样参数的干涉仪, 测相同基片的镜面粗糙度就可从实测的条纹强度反差, 代入式(9), 式(10) 求出待测镜面的镜面粗糙度 σ 值。

激光镜的反射率由下式决定^[3]

$$R = R_0 \exp[-(4\pi\sigma)^2/\lambda^2] \quad (11)$$

式中 R_0 为理想光滑表面反射率, λ 为入射光波长。根据式(11) 可从测出的 σ 值判断该激光镜将可达到的最高反射率。

3 铜镜镜面粗糙度的测试

如图 1, 干涉图像由 CCD 摄像管接收后, 通过图像卡采集。CCD 各像素记录下的干涉条纹的强度按 256 个灰度等级存贮在计算机的硬盘中。通过软件可以读出这些像素上的灰度值, 从而得到干涉条纹沿 x 或沿 y 方向上的强度分布。图 2 给出两种不同粗糙度铜镜的干涉条纹。这两面铜镜已用 61A 型显微干涉轮廓仪测过表面粗糙度。图 2(a) 的铜镜 $R = 0.08 \mu\text{m}$, 图 2(b)

的铜镜 $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ 。泰曼干涉测表面粗糙度系统记录下来的铜镜 b 的干涉条纹强度分布如图 3(a) 所示。图 3(b) 给出了铜镜 a 的干涉条纹强度分布。横座标为图 2 中沿镜面水平方向(x 方向)各像素的座标位置;纵座标为这些像差的灰度值,条纹强度已转换为 256 个灰度等级。可以看到铜镜 b 的亮条纹的强度已达 CCD 探测器的饱和值,所以呈现平顶。按干涉项 $A_1 A_2 \cos(\dots)$ 函数的条纹轮廓拓展,可测出它的干涉条纹强度的平均反差 C 为 265/395。而铜镜 a 的平均反差 C 为 44/456。

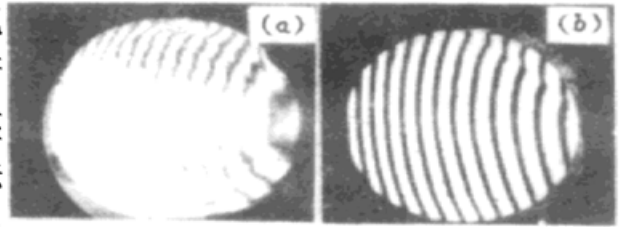


图 2 铜镜相干涉条纹

Fig. 2 Interference fringes of copper mirrors
(a) $R_a = 0.08 \mu\text{m}$; (b) $R_a = 0.02 \mu\text{m}$

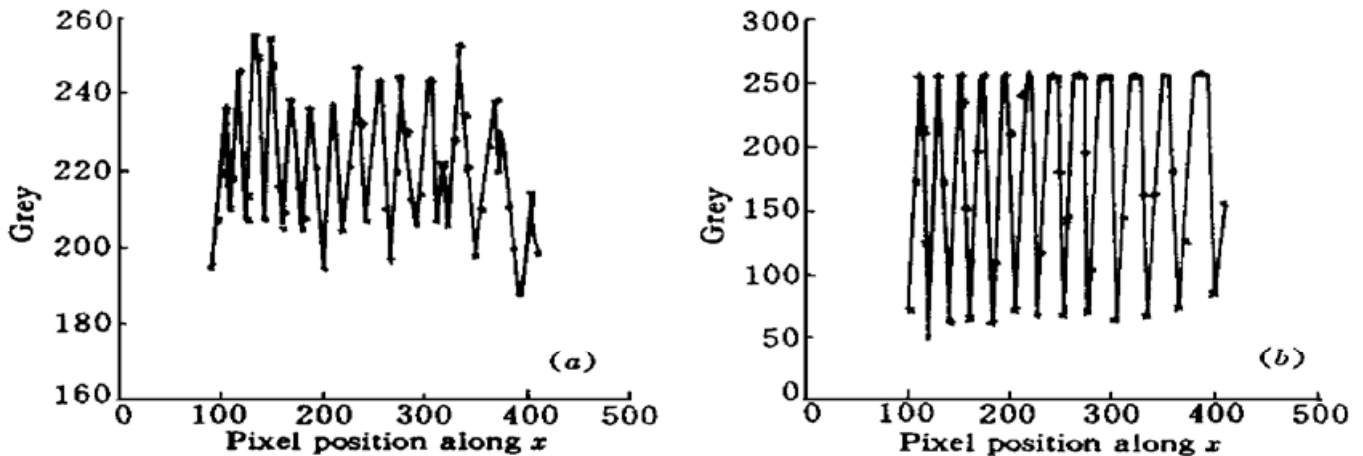


图 3 $R_a = 0.08 \mu\text{m}$ (a) 和 $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ (b) 铜镜在泰曼干涉仪中干涉条纹的强度分布

Fig. 3 Intensity distribution of the interference fringes of $R_a = 0.08 \mu\text{m}$ (a) and $R_a = 0.02 \mu\text{m}$ (b) copper mirrors obtained with the Twyman interferometer

按定义 $R_a = \sum |h_i| / N$, $|h_i|$ 是相对于算术平均值(在此作为零高度)测得的表面轮廓高度的绝对值,即误差理论中的残差 $|v_i|$ 。按佩特尔斯(C. A. F. Peters)公式^[1]

$$\sigma \approx \frac{5}{4} \frac{\sum |v_i|}{\sqrt{N(N-1)}} \quad (12)$$

则有

$$\sigma \approx \frac{5}{4} R_a \quad (13)$$

由此推算两面镜子以 σ 表示的粗糙度已测值分别为 $0.10 \mu\text{m}$ 和 $0.025 \mu\text{m}$ 。用本方法将测出的条纹反差代入式(9),并以铜镜的 σ 值借助式(10)算出铜镜在该测试条件下 C_a 值,它们应该是一致的。实际计算结果是分别为 0.6841 及 0.7589。可见两种方法测量结果是相容的。由式(9),式(10)可知当 $\sigma = 0.0 \mu\text{m}$ 时, $C_a = 1$ 为其最大值。此时条纹强度的反差即 C_a 值。这说明需要用一面已知镜面粗糙度为最小的铜镜来测算铜镜的 C_a 值。其他铜镜则可用此 C_a 值测出它们的粗糙度 σ 。当测量其他材料作为基片加工的激光镜的镜面粗糙度时,由于 A_2 决定于材料对 He-Ne 激光的反射率,不同材料对 He-Ne 激光波长的反射率是不同的,因此还需用类似的方法测算出它们的 C_a 值。

从我们对泰曼干涉仪测试系统的条件分析,得到杂散光的背景光强灰度值为 15,条纹可分辨的反差为 0.037。由此可推算出用这种方法测量镜面粗糙度的范围是 $0.01 \sim 0.12 \mu\text{m}$ 。测

量精度可由式(9), (10) 推出

$$\sigma^2 = - \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \ln \frac{c}{c_a} \quad (14)$$

两边取微分

$$2\sigma d\sigma = - \frac{\lambda^2}{8\pi^2} \frac{C_a}{C} dc$$

$$d\sigma = - \frac{C_a \lambda^2}{16\pi^2 \sigma c} dc \quad (15)$$

由于干涉条纹光强已数字化地分为 256 个等级, 故 $dc = 1/(I_{\max} + I_{\min})$ 。按二面铜镜测量结果, 在测量的动态范围中至少可取 $dc = 1/300$ 。对于低端 $\sigma = 0.01 \mu\text{m}$, 代入式(15), 可得 $d\sigma = 0.0009 \mu\text{m}$; 对于高端 $\sigma = 0.12 \mu\text{m}$, 代入(15) 式, 可得 $d\sigma = 0.0016 \mu\text{m}$ 。即这种方法在理论上测量精度可达 $0.002 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 Li Zhu. The Fundamental of Exchangeability and Measurement Technology (Volume 1). Beijing: Measure Publishing House, 1984. 91, 471~ 507 (in Chinese)
- 2 Xia Jinan, Zhang Yaoning, Cheng Zuhai *et. al.*. A new technique used in the interference fringe image processing of lens surface microdeformation testing. *Optoelectronic Engineering* (光电工程), 1997, **24** (3): 53~ 57 (in Chinese)
- 3 Y. H. Yan, M. L. Zhong. The Application of High Power Laser on Processing. Tianjin: Tianjin Publishing House, 1994. 78~ 80 (in Chinese)

Interference Measurements for Roughness of Laser Mirrors

Zhang Yaoning Cheng Zuhai

(National Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A full-field, noncontacting interference measurement for roughness of laser mirrors has been developed. Suppose the probability density function of the surface height distribution is Gaussian. The relationship between the interference fringes contrast and the roughness of a mirror is deduced. Two laser mirrors with different roughnesses were measured. The data measured are in agreement with the results measured with a 6JA Microscopic Interference Profilometer. The range of measurement is 0.01 to $0.12 \mu\text{m}$ and the accuracy of measurement is up to $0.002 \mu\text{m}$ theoretically. Practically, this work may be useful for controlling the process of mirror polishing.

Key words interference measurement, roughness, laser mirror