

# 表面粗糙度测量的磁光位相调制和锁相干涉

徐文东 李锡善

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 提出了一种表面粗糙度测量的新方法. 该方法采用了微分偏振干涉的原理, 利用由法拉第磁光调制器所组成的调制系统对偏振干涉光路的位相进行调制, 利用锁相干涉原理对位相进行探测. 该方法可实现无参考面快速非接触测量, 在普通实验条件下, 也可保持良好的稳定性. 实验装置即可给出表面的轮廓又可给出其它统计数据, 其横向分辨率为  $1.2 \mu\text{m}$ , 纵向为  $2 \text{nm}$ .

**关键词** 微分偏振干涉, 法拉第调制系统, 锁相干涉.

## 1 引 言

为克服机械触针轮廓仪对被测表面的损伤及其速度慢、对环境要求高、不适合在线检测等缺点, 近年来发展了许多表面粗糙度测量的光学方法<sup>[1,2]</sup>, 最主要的有光散射方法和光干涉方法. 光散射法只能给出表面的统计参数, 不能给出表面轮廓, 因此使用受到限制. 光干涉法相对来说有较多的优点, 可高精度地测试表面粗糙度. 但现有的方法还存在结构复杂、对环境要求较高, 有时还需参考面等问题. 本文提出了一种采用 Normarski 显微镜的微分偏振干涉原理的新的光干涉方法, 其干涉位相由共光路的法拉第调制系统进行调制, 采用简化了的锁相干涉原理对位相进行探测.

## 2 原 理

图 1 给出了实验装置的光学系统原理图. 从 He-Ne 激光器出来的线偏振光, 经由  $\lambda/2$  波片、法拉第磁光调制器和长轴与纸面成  $45^\circ$  角放置的  $\lambda/4$  波片所组成的法拉第调制系统调制后, 产生偏振面相互垂直(与纸面平行或垂直)位相被调制的两束光, 再经透镜会聚, 通过滤波小孔和准直物镜后平行入射到直角空间分

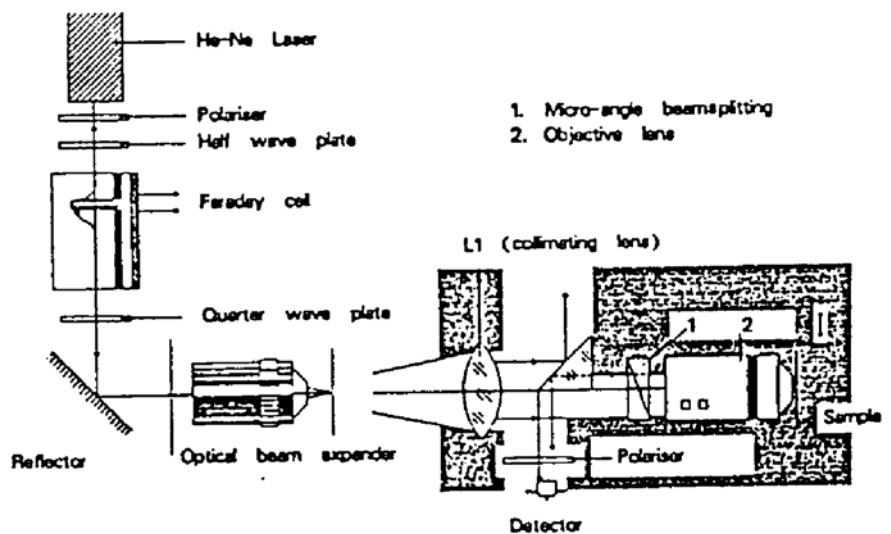


Fig. 1 Optical configuration of the instrument

束棱镜上. 一部分光直接进入由微角分束棱镜和显微物镜组成的微分干涉系统中, 并在被测表面上形成相距很近的两个小光斑(采用数值孔径为 0.65 的 40×显微物镜, 两光斑间距为 2 μm, 直径为 1.2 μm); 另一部分光被空间分束棱镜反射、折射而损耗掉. 由在显微物镜焦点处的样品表面对两相互垂直的偏振光进行反射, 反射光经显微物镜和微角分束棱镜后重合, 由直角空间分束棱镜内表面全反射, 并经检偏器后干涉; 干涉信号由光电探测器接收. 在扫描测量前, 调节 λ/2 波片, 使在光电探测器上接收的二倍频信号对称(解调后的一倍频信号为零). 当样品扫描运动后, 在一定放大率下, 经解调后的一倍频信号幅值随样品扫描的变化即给出样品表面的轮廓.

## 2.1 位相调制

众所周知, 一束准单色线偏振光经过 45°角放置的 λ/4 波片后可分解为偏振面互相垂直且具有位相差 2α - π/2 的两个线偏振光. 如下式:

$$\begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \times E_0 \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} = E_0 \exp(j\alpha) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + E_0 \exp[j(\pi/2 - \alpha)] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

通过改变偏振方位角 α 可以对该两线偏振光的位相进行调制. 通常有两种方法可选择: 一是旋转 λ/2 波片<sup>[3]</sup>, 二是利用法拉第磁光调制器. 实际装置上两种方法均采用了, 在 λ/2 波片之后紧接着加上磁光调制器, 原因有两个: 磁光调制器可实现较高的调制频率和稳定性, 保证仪器有较快的测量速度和通过滤波后较好的信噪比; 通过适当旋转 λ/2 波片可补偿由于仪器调整和样品本身带来的额外的位相, 使干涉发生在干涉条纹的最暗点, 以降低平均光强在探测上产生的噪声, 同时简化了锁相干涉测量的设计.

## 2.2 锁相干涉

1) 假设在检偏器之前, 与纸面平行(x 方向)和垂直(y 方向)的两偏振光可分别表为:

$$P_1 = E_1 \cos(\omega_0 t + \delta_1), \quad P_2 = E_2 \cos(\omega_0 t + \delta_2)$$

式中 E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、δ<sub>1</sub>、δ<sub>2</sub> 分别为其复振幅和位相, ω<sub>0</sub> 为光频率, 则在检偏器后的干涉场光强为:

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (1)$$

如果在 λ/4 波片前的偏振光的方位角为 α, 则根据上面的位相调制的原理, (1)式可表示为:

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos[2\alpha - \pi/2 + \varepsilon(x)] \quad (2)$$

式中 ε(x) 为样品上被照射两点的高度差所造成的位相差, 也就是所要测量的对象. α 的变化是由半波片和磁光调制器共同产生的. 若激光器输出激光的偏振方向与 x 轴平行, 磁光调制器产生的转角为 A sin ω<sub>1</sub>t, ω<sub>1</sub> 为调制频率, 而半波片的方位角为 β, 则干涉场中光强为:

$$\begin{aligned} I &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos[2A \sin \omega_1 t + 4\beta - \pi/2 + \varepsilon(x)] \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \sin[2A \sin \omega_1 t + 4\beta + \varepsilon(x)] \end{aligned} \quad (3)$$

2) 对上式进行贝塞尔(Bessel)函数展开:

$$\begin{aligned} I &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 J_0(2A) \\ &\quad + 4E_1E_2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(2A) \cos(2m\omega_1 t) \sin[4\beta + \varepsilon(x)] \\ &\quad + 4E_1E_2 \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(2A) \sin[(2m+1)\omega_1 t] \cos[4\beta + \varepsilon(x)] \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式表明探测器接收的信号中包含了許多频率与调制器频率成整数倍的分量. 这些分量的振幅与调制幅度成贝塞尔函数的关系; 且与被测位相成正弦或余弦函数关系. 由贝塞尔

函数性质知, 当  $2A$  较小时, 一倍频信号比其它信号强许多, 应将其作为探测和解调的对象.

$$4E_1E_2J_1(2A)\cos[4\beta + \varepsilon(x)] \quad (5)$$

3) 由于被测样品表面导致的位相差  $\varepsilon(x)$  通常远小于  $2\pi$ , 在微分干涉的情况下更是如此, 所以不采用通常锁相干涉的办法来对表面进行测量, 而是通过手工调节半波片使一倍频信号接近为零, 对一倍频信号进行解调, 即给出测量曲线.

从(5)式中可知, 调节半波片使  $4\beta = -\pi/2 + \zeta$ , 即  $\zeta + \varepsilon(x_0) = 0$ ,  $\zeta \ll 1$  为半波片调节误差,  $x_0$  表示样品测量的起始位置. 那么随着对样品的扫描, 一倍频信号幅值可表为:

$$4E_1E_2J_1(2A)\sin[\zeta + \varepsilon(x)]$$

由于  $\zeta + \varepsilon(x) \ll 1$ ,  $\sin[\zeta + \varepsilon(x)] \approx \zeta + \varepsilon(x)$ , 一倍频信号可表示为:

$$4E_1E_2J_1(2A)\sin(\omega_1 t)[\zeta + \varepsilon(x)]$$

可见对一倍频信号进行双边带解调就可得到  $\zeta + \varepsilon(x)$ ,  $\zeta$  对于相对测量来说并无什么影响.

4) 从(3)式中还得到这样的结论, 当调节半波片使  $4\beta = -\pi/2 + \zeta$ ,  $\zeta \ll 1$  时,  $I$  中的直流分量最小. 这对减小光电探测器中的散粒噪声非常有利.

### 2.3 微分干涉与数据处理

1) 装置中采用微角分束棱镜和显微物镜组成的微分干涉系统来测量表面轮廓及其粗糙度, 其主要原因是它的实现比其它方案容易得多. 近乎共光路的布局加上其结构的简单、性能的稳定, 使这种方法在高精度测量表面粗糙度的仪器中被经常使用. 在本实验装置上, 它所具有微分干涉的特点被成功地用于简化锁相干涉的信号处理, 并保持了装置中干涉光束始终共光路的特点, 从而降低对光源频率稳定性的要求及对光学元件质量和环境的要求. 光路中, 空间分束棱镜的采用一方面消除了返回光束对激光输出稳定的影响; 一方面可提高光能的利用率.

2) 尽管随着样品的扫描, 实际上两测量光斑先后划过相同的路径, 测量的是同一时刻两对应光束的位相差, 不难理解, 这一过程也可等效看作是对一剪切干涉图的单指针采样, 剪切量  $S$  等于两光斑间的距离; 这种等效性不因扫描速度的不均匀而丧失. 对剪切干涉图进行傅里叶分析可知, 当通过光学系统低通特性衰减后的样品表面的有效最高频率(样品表面的空间频谱接近高斯分布)远小于  $1/S$ , 那么通过对正弦函数的近似并依据傅里叶的微分性质, 剪切波面可看作原波面的微分图象, 原波面可由剪切波面的直接积分得到. 即对于任意波前  $y(x)$ , 其剪切波前差可表示为:  $y(x) - y(x - S)$ , 其傅里叶变换可表示为:

$$\mathcal{F}\{y(x) - y(x - S)\} = 2\sin(\pi f x S) Y(fx) \exp[j(\pi/2 - \pi f x S)] \quad (6)$$

$Y(fx)$  为  $y(x)$  的相应傅里叶变换. 当原波前的最高空间频率远小于  $1/S$ , 则(6)式可写为:

$$\mathcal{F}\{y(x) - y(x - S)\} = 2\pi f x S Y(fx) j \exp[j(-\pi f x S)] \quad (7)$$

利用傅里叶变换的微分性质得到:

$$\mathcal{F}\{y(x) - y(x - S)\} = S \mathcal{F}\{y'(x - S/2)\} \quad \text{即: } \{y(x) - y(x - S)\}/S = y'(x - S/2) \quad (8)$$

对(8)式积分得:

$$y(x - S/2) = \int [y(l) - y(l - S)] dl / S \quad \text{即: } y(N - S/2) = \sum [y(x) - y(x - S)] L / S \quad (9)$$

式中  $l$  为形式参数;  $N$  表示第  $N$  个采样点;  $L$  为采用间隔. 若样品表面的有效最高频率小于  $1/S$ , 主要频率成分集中在  $1/2S$  附近时, 那么剪切干涉的灵敏度比一般干涉法要高一倍, 在

这种理想情况下数据处理可采用校正滤波的方法,调整频率成份的幅值和位相,就可恢复出原波面(参看(6)式).而对于样品表面的有效最高频率大于  $1/S$  的情景是应该避免的,因为在这种情况下有很多频率分量被丢失,从单一剪切量的干涉图中无法正确恢复原波面.

实际设计中,两光斑间距应使样品表面的最高有效频率小于  $1/S$ ,针对不同粗糙表面换用不同数值孔径(因而放大率不同)的显微物镜以保证上述条件满足的同时不降低剪切干涉的灵敏度.粗糙度  $Ra$  的计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$Ra = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M y(i) \quad (10)$$

式中  $M$  表示采样点总数.其它参数的计算公式可参阅国家标准的相应章节.

3) 装置的横向分辨率取决于照射到被测表面两光斑的大小,装置所测的曲线对应于两光斑内表面起伏引起的平均位相差.因此,光学系统的点扩散函数的形状和大小以及系统的焦深,决定了整个装置的横向分辨率,其实测数据对应于  $40\times$  物镜约为  $1.2\ \mu\text{m}$ .采用光学超分辨率技术,装置的横向分辨率还可提高一倍以上.

装置的纵向测量范围由两个因素决定:一是满足上述锁相干涉的近似线性公式,二是希望高度起伏不超过系统的焦深.由计算机进行数据处理,系统的非线性响应可以校正.对于较粗糙的表面,换用数值孔径小的物镜,可以保证被测表面处于焦深范围内.本装置对于  $Rz$  小于  $3\ \mu\text{m}$  的表面均可进行测量.

当被测表面的宏观起伏导致表面在横向扫描时超过系统焦深,可采用类似光盘用的伺服聚焦的方法予以控制.当取样长度满足国家标准,样品为平面时,适当地调整完全可避免上述情况的发生.

## 3 实 验

### 3.1 位相调制和锁相干涉的电路实现及调制幅度的测量

调制器驱动电路由晶体振荡器、数字分频电路、两级带通滤波电路及功率放大电路组成.  $10\ \text{kHz}$  的频率由于采用石英晶体振荡器,其稳定性很高;  $18\ \text{V}$  的电源电压幅值,其稳定性优于  $1\%$ .检测一倍频信号的双边带解调电路采用变压器的半波相敏检波原理,并由两级补偿和两级低通滤波电路对信号进行了处理,以得到较好频率响应和动态范围.

实验中还测量了调制器在  $10\ \text{kHz}$  时的调制幅度.调制器由一个线圈和一个串联电容组成,石榴石单晶膜片置于线圈内.在调制器由上述驱动电路驱动后,将它放在两个通光方向互相垂直的偏振器(起偏器和检偏器)之间. He-Ne 激光依次通过起偏器、调制器和检偏器后入射到光电探测器上.这时的信号应该是对称的基频为  $20\ \text{kHz}$  的信号,旋转起偏器当  $20\ \text{kHz}$  频率分量消失,信号以  $10\ \text{kHz}$  为基频时,记录下它转的角度,就得到调制器偏摆的最大角度.实验测得的值为  $4.8^\circ$ .

### 3.2 实验结果

图 2 给出了对  $Ra=0.012$  粗糙度样板(哈尔滨市标达特种工具厂造)测量的微分曲线.图 3 给出了积分后相应的表面轮廓曲线.图 4、5 是对样品的同一区域两次测量的结果.从图中可知装置具有较好的测量重复性.  $Ra$  的测量精度优于  $2\ \text{nm}$ .

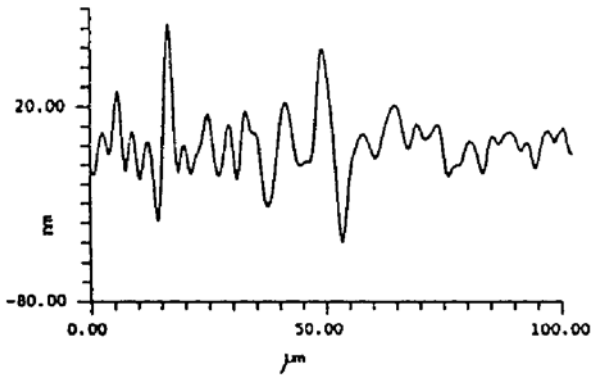


Fig. 2 Differential graph of the sample

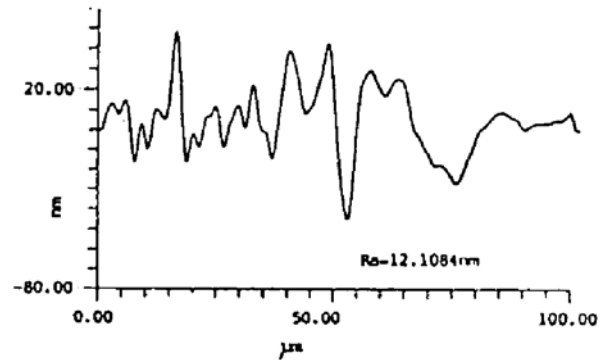


Fig. 3 Profile of the sample

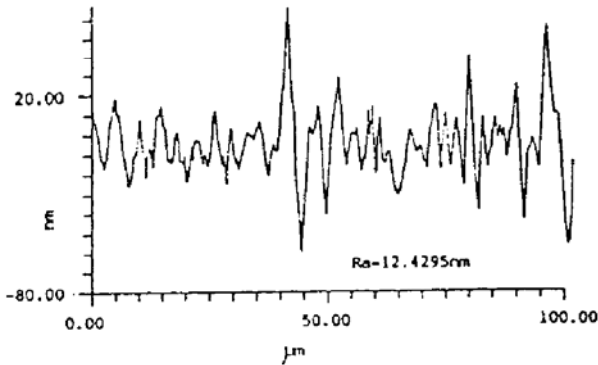


Fig. 4 Repeatability testing ( I ) of the sample

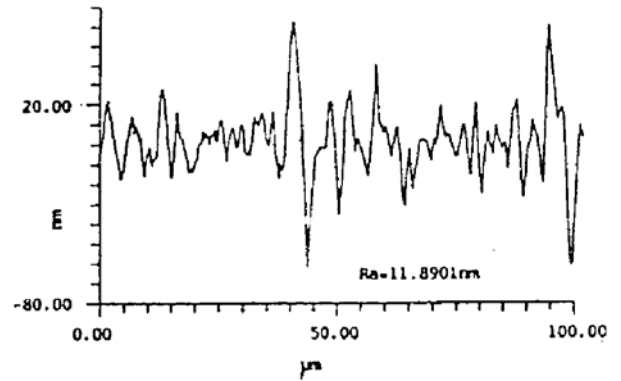


Fig. 5 Repeatability testing ( II ) of the same sample

### 参 考 文 献

- [1] J. M. Bennett, Comparison of techniques for measuring the roughness of optical surfaces. *Opt. Eng.*, 1985, 24 (3) : 380~387
- [2] G. E. Sommargren, Optical heterodyne profilometry. *Appl. Opt.*, 1981, 20(4) : 610~618
- [3] G. E. Sommargren, Up/down frequency shifter for optical heterodyne interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, 65(8) : 960~961
- [4] 李士贤, 郑乐年, 光学设计手册, 第一版, 北京, 北京理工大学出版社, 1990 : 129

## Phase Modulation and Phase-Locked Interference of the Instrument for Measuring Surface Roughness

Xu Wendong      Li Xishan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 18 August 1993; revised 3 March 1994)

**Abstract** This paper introduces a new interferometer for measuring the surface roughness based on the principle of differential polarization interferometry. A Faraday modulating system is used to modulate the phase between two interference light beams and the phase is detected by phase-locked interference. It has excellent stability even under normal condition, and rapid and nocontact measurement can be done without a special reference surface. The instrument can produce the surface profile and statistical data with height sensitivity 2 nm and lateral resolution 1.2  $\mu\text{m}$ .

**Key words** differential polarization interferometry, Faraday modulating system, phase-locked interference.