

超外差超光滑表面粗糙度的测量

林跃 周志尧 王润文

(中国科学院上海光机所)

Opto-heterodyne measurement of roughness of supersmooth surfaces

Lin Yao, Zhou Zhiyao, Wang Runwen

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

摘要: 本文用纵向塞曼双频稳频 He-Ne 激光器作光源,采用光学超外差技术与相位高精度测量相结合,测量超光滑光学表面粗糙度,测量灵敏度为 0.1nm 量级。实验结果与理论分析相符合,且与其他测量方法进行了比较。

关键词 光学超外差,表面,粗糙度

一、引言

近几年来,超光滑光学表面粗糙度测量和光学表面特性的研究已成为光学制造和检测中的一个重要课题,如X射线光学元件、薄膜光学等都要求光学表面接近原子尺度,是光滑和无缺陷的,它们的性能直接受到其表面粗糙度大小的限制^[1,2]。因此,超光滑光学表面的制造和检测就迫切需要相应的高精度测量仪。目前可行的测量技术^[3,4]有:机械光学表面轮廓仪(如触针仪)、散射测量、多光束干涉测量等,其中使用最广的是散射测量方法,但它只能给出光学表面起伏的统计规律,而且这一统计规律只有在符合一定的物理模型(如高斯统计)情况下,测量才能达到高精度。多光束干涉测量的测量精度受到干涉仪中参考面的表面粗糙度和光学膜质量的限制^[5]。金刚石触针仪是机械光学表面轮廓仪中测量精度较高的仪器,但测量时,尖硬的金

刚石触针与表面接触,极易造成划痕现象,影响待测表面的质量。

本文用光学超外差方法,采用分偏振干涉结构和精密相位测量相配合,非接触测量光学表面粗糙度,避免了上述测量技术的缺点。

二、原理

实验系统与[11]同。由纵向塞曼双频稳频激光器(Z)输出两束频率分别为 f_+ 、 f_- 的左、右旋圆偏振光的共程光束,经 1/4 波片,成为两互相垂直的线偏振光的共程光束^[5]。由分束器分成二束,一束照射到偏振轴与两线偏振光互成 45° 的偏振器上,两线偏振光相互干涉,由光电探测器接收。由于光电探测器的输出与入射光强成正比,则探测器产生了一个经放大器放大的差频信号,作为系统的

收稿日期:1988年1月4日。

参考信号;另一束光为测量光束,照射在渥拉斯顿棱镜^[6]上,分成两束频率分别为 f_+ 、 f_- ,互相垂直的线偏振光束,由透镜聚焦在待测表面上两点。两反射光束经透镜和渥拉斯顿棱镜后,重新组合成一束与入射光平行的两线偏振光的共程光束,经平面镜反射到偏振轴与两线偏振光互成 45° 的偏振器上,发生干涉,由光电检测器接收。在示波器上即可得到一个包含待测表面上两聚焦光点处的表面特性的差频信号。当一个聚焦光点固定,另一光点在待测表面上扫描时,则可得到包含待测表面特性的差频信号。比较测量信号与参考信号的相位差 $\Delta\phi$,由相应的计算公式,即可得出待测表面的表面特性。

由于选用纵向塞曼双频稳频激光器作光源,则光电检测器(R_1)、(R_2)上的光场可表示为^[7]:

$$E = E_+ + E_- = \exp[i(k_+z_+ - \omega_+t)] + \exp[i(k_-z_- - \omega_-t)] \quad (1)$$

其中 k 是波数, ω 是角频率, z 是光程。“-”和“+”表示左、右旋圆偏振光。由于光电检测器接收到的光强信号 $I \propto |E|^2$,则比较测量信号和参考信号,可得出它们的相位差

$$\phi = (k_+ - k_-)(z_m - z_r) + (k_+ + k_-)\frac{1}{2}l \quad (2)$$

其中 z_m 、 z_r 是测量光束和参考光束的平均光程, l 是测量光束中左、右旋圆偏振光的光程差。由于 $k_+ - k_- = \frac{2\pi}{c}(f_+ - f_-) = \frac{2\pi}{c}f'$, $(k_+ + k_-)/2 = \frac{\pi}{c}(f_+ + f_-) = \frac{2\pi}{c}f_0$, $Z_m - Z_r = l$ (其中 f_0 是激光原子谱线的中心频率, l 是测量光束和参考光束的平均光程之差),则

$$\phi = \frac{2\pi}{c}(f'l + f_0l) \quad (3)$$

测量光束与参考光束的相位差变化

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c}(\Delta f'l + f'\Delta l + \Delta f_0l + f_0\Delta l) \quad (4)$$

对频差为 10^6 Hz量级的塞曼稳频He-Ne激光器, $\Delta f' < 10^3$ Hz, $f_0 > 4 \times 10^{14}$ Hz, $\Delta f_0 < 10^6$ Hz^[7~10]。测量中, $l < 1$ m, $\Delta l < 10^{-3}$ m, $l < 10^{-3}$ m很容易实现。因此,在 Δl 为nm量级或略小于nm量级测量中,式(4)中的 $\Delta f'l$ 、 $f'\Delta l$ 、 $\Delta f_0l \ll f_0\Delta l$,即 $f_0\Delta l$ 对 $\Delta\phi$ 的影响,远远大于其他三项,则式(4)可写作:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c}f_0\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l \quad (5)$$

其中 λ 为激光中心波长。

实验原理与[11]同,为分析方便起见,令此时的待测表面绝对光滑。入射光束经渥拉斯顿棱镜后,分成光束1、2,由透镜聚焦在待测表面上二点。当入射光束的分束点不在透镜后焦面上时,光束1、2在待测表面上的两反射光束,经过透镜和渥拉斯顿棱镜后,虽相互平行,但不完全重合。由几何光学原理,可求得它们的间距为:

$$x = 2(h - f)(\text{tg } \alpha_+ + \text{tg } \alpha_-) \quad (6)$$

其中 f 为透镜焦距, h 为入射光束的分束点到透镜的距离, α_+ 、 α_- 分别为两线偏振光的分束角。

由式(6)可得, h 和 f 的差值越大, x 越大,即两反射光束越不重合。当 h 和 f 的差值足够大时,两反射光束则完全分开。光电检测器不能同时接受到两偏振光束,因而亦无测量信号输出。因此,测量时,应使入射光束的分束点处在透镜后焦面上,即 $h = f$,使两反射光束尽可能重合,减小测量误差。

当 $h = f$ 时,两反射光束完全重合。由几何光学原理易得到:

$$\text{tg } \beta_+ = \text{tg } \beta_- = \text{tg } \beta = b/f \quad (7)$$

其中 β_+ 、 β_- 为光束1、2入射在待测表面上的入射角, b 为入射光束中心到透镜光轴的距离。此时,入射光束和反射光束相对透镜光轴完全对称,则它们的间距为 $2b$ 。

当入射光在渥拉斯顿棱镜中的分束点处在透镜后焦面上,且 H 小于透镜焦深情况下,光束1、1'的反射光束相互平行,则光束

1'、2 的光程差 l' 与光束 1、2 的光程差 l 的差值 Δl , 由几何光学原理易得到:

$$\Delta l = l' - l = 2H \cos \beta \quad (8)$$

其中 H 为光学表面的高度起伏量。由于 b 相对于透镜焦距仅仅是个小量, 即 $b \ll f$, 则由式(5)、(7)、(8)得出:

$$H = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi \quad (9)$$

由上式可知: 系统表面高度的测量精度与测相系统的测相精度成正比。

系统的高度测量灵敏度

$$\delta H = \frac{\lambda}{4\pi} \delta(\Delta\phi) \quad (10)$$

其中 $\delta(\Delta\phi)$ 为系统的测相灵敏度。由于采用测相灵敏度为 0.1° 的 BX23A 型数字相位计, 光源为 He-Ne 激光器, 则系统的高度测量灵敏度为 0.1 nm 。

由此可得到光学表面高度起伏的表征函数, 从而描绘出光学表面的表面轮廓。其中高度起伏的均方根值(RMS)表达式为

$$H_{\text{RMS}} = \left[\sum_{i=1}^N H_i^2 / N \right]^{1/2} \quad (11)$$

其中 N 为测量时的扫描点数。

对于光学表面高度分布函数, 一维的高度自相关函数为:

$$A(m_s) = \frac{\sum_{i=1}^N H_{i+m} H_i}{\sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (12)$$

其中 m 为整数, 且 $0 \leq m \leq N-1$ 。同时, 光学表面高度的变化情况, 由表面高度的斜率大小来描述。

$$L_n = (H_{n+1} - H_n) / s \quad (1 \leq n \leq N) \quad (13)$$

其中 s 为扫描光点在两测量点间扫过的路程。

值得注意的是, 测量时, 由于样品测量转台的微小倾斜会给系统的测量产生一个正弦调制, 因此, 实验测量结果经过最小二乘法处理后, 才能更精确地描述出光学表面的表面轮廓。

三、实验结果与分析

在恒温、防震和封闭良好的实验条件下, 待测光学元件置于超精度转台(1秒级)上, 将待测表面上的一个聚焦光点调至转台的轴心。当转台转动时, 待测表面上另一聚焦光点(半径为 $3 \mu\text{m}$), 则以转轴的轴心为原点, 以两光点间的距离($R=220 \mu\text{m}$)为半径, 在待测表面上扫描, 由此得到扫描曲线上的表面高度起伏。

图1(a)、(b)、(c)分别为待测表面轮廓的轮廓图、高度自相关函数和高度变化曲线。由图1(a), 得到待测表面高度起伏的均方根值为 3.8 nm 。且实验证明, 测量具有较好的重

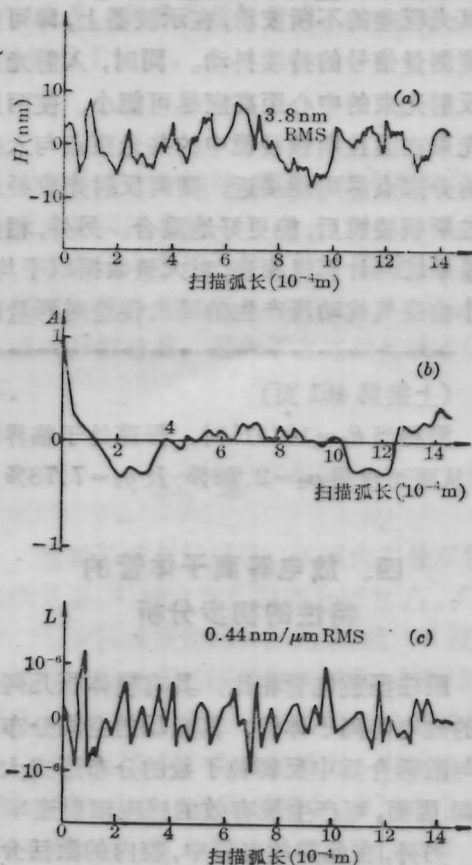


图1 光学表面轮廓测量
($\alpha=0.33^\circ$, $f=37.5 \text{ mm}$)

(a) 表面轮廓 (b) 表面高度自相关函数;
(c) 表面高度的微分变化

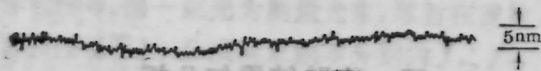


图2 Talysurf触针仪的表面轮廓测量复性,图2为放大的Tolysurf-6型金钢石触针仪对同一光学表面的高度测量曲线,高度起伏测量的均方根值RMS为4.0nm。比较光学超外差法和触针仪的测量结果,两者仅相差一个小量,主要由于两种测量仪本身的测量精度所产生的。

精密测量中,空气扰动对测量精度的影响较大,因此,干涉光路需调节至最佳状态。当入射光束在渥拉斯顿棱镜中的分束点偏离透镜后焦点时,两束由待测表面反射的反射光束,经透镜和渥拉斯顿棱镜后,将不完全重合。它们各自光程受气流影响的增大,导致了其光程差的不断波动,在示波器上,即可观察到测量信号的持续抖动。同时,入射光束和反射光束的中心距离应尽可能小,使两反射光束在渥拉斯顿棱镜中的共光束点与入射光的分束点尽可能接近,则两反射光束经过渥拉斯顿棱镜后,能更好地重合。另外,相位测量系统与计算机相连,对大量数据取平均,减小由空气扰动所产生的随机误差对测量的

(上接第461页)

器,测得当 $\theta_2=10^\circ 41'$ 时,振荡处于临界状态,从而可求得 $\alpha_2=2.72\%$,及 $g_2=7.78\%$ 。

四、放电等离子体管的特性的初步分析

跟柱型放电管相比,具有模体积几何形状的放电等离子体管,其光场的空间分布形式与激活介质中反转粒子数的分布形式大体相同,因而,可产生最有效的感应辐射速率^[5]。

另外,在此类放电管中,腔内的激活介质已被最大限度地基模光束所“填充”,从而减少了对基模无贡献的激活体积,这样有效放电空间将相对减小。这就意味着该放电管具

影响。

四、结 论

实验结果和理论分析表明,光学超外差方法是一种高精度的光学表面粗糙度测量方法,其高度测量灵敏度为0.1nm量级,且干涉仪不需要参考面,待测表面可以是镀膜的、非镀膜的和任何高度分布统计规律的表面,避免了散射测量和多光束干涉测量中,测量精度受限于参考面、镀膜面和表面高度分布规律的现象。同时,干涉仪的非接触测量,避免了表面划痕的现象。

参 考 文 献

- 1 J. Zavislan, *Laser Focus*, 21(9), 82(1985)
- 2 王景山, *光学技术与信息*, (1), 26(1986)
- 3 J. M. Bennett, *Appl. Opt.*, 15(11), 2705(1976)
- 4 J. M. Bennett, *Appl. Opt.*, 20(10), 1785(1981)
- 5 胡岳风, *光学技术*, (2), 2(1984)
- 6 梁铨廷, *物理光学*, (机械工业出版社, 1980) 211
- 7 梁铨廷, *物理光学*, (机械工业出版社, 1980) 283
- 8 赵克功, *计量与仪器*, (3), 2(1977)
- 9 郭继华, *清华北大理工学报*, 2(4), 53(1975)
- 10 中国计量院, *物理*, 2(1), 35(1973)
- 11 林跃, 周志尧, 王润文, *中国激光*, 15(11), 652(1988)

有较小的平均有效放电孔径,于是伴随孔径的减小,激光下能级Ne($2p_1$)的弛豫速率将增强,从而间接地扩大了粒子数反转的差值。故这种放电管可提供较大的小信号增益和较大的输出功率密度;高阶模的模体积也受到较大的抑制,从而能可靠地获得高功率基模输出。

参 考 文 献

- 1 强春生 *et al.*, *应用激光联刊*, (1), 52(1981)
- 2 Wang Nuo, *ISLA'87 Technical Digest*, 113(1987)
- 3 凌一鸣, *应用激光*, 7(1), (1987)
- 4 G. Hucbt., *Introduction to Opt. Electronics*, 66(1976).
- 5 气体激光编写组, *气体激光(下册)*, 上海人民出版社, 1975, 35