

文章编号 1004-924X(2002)01-0045-05

表面轮廓仪传递函数对超光滑表面粗糙度测量的影响

徐长山, 巩岩, 向阳, 陈波, 曹健林

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要:表面粗糙度是表征光学元件表面质量的一个重要指标,这使得人们不断致力于改进表面粗糙度的测量技术,以提高其测量精度。然而很多实验表明,在对超光滑表面粗糙度进行测量时,对于同一个表面,不同类型的表面轮廓仪通常会给出不同的结果,这使得测量结果之间的可比性成为问题。针对这种情况,本文运用线性系统理论方法,分析了表面轮廓仪的带宽对表面粗糙度测量的影响,并用离散傅里叶变换方法计算了表面粗糙度测量值随表面轮廓仪带宽的变化。结果表明,表面轮廓仪的带宽对表面粗糙度测量有着重要影响,轮廓仪的带宽越宽,则给出的测量值越大,也越接近真实值。因此对两种不同类型的轮廓仪测得的结果一般不能直接进行比较,除非两者具有相同的带宽。

关键词:光洁度测量;超光滑表面;传递函数;线性系统

中图分类号: TH741.3 **文献标识码:** A

1 引言

超光滑表面粗糙度的测量对许多应用领域来说都是非常重要的。在短波光学特别是软 X 射线光学领域,多层膜反射镜的反射率与镜面粗糙度的方均根值有着密切的关系,随着粗糙度方均根值增大,镜面反射率将急剧下降^[1]。高精度激光陀螺关键部件之一的激光反射镜的镜面散射将导致激光陀螺的性能降低^[2],而表面粗糙度是引起散射的主要原因^[3]。在密集波分复用系统中,平面反射镜的粗糙度决定了其反射率,从而决定了单根光纤所能达到的最大容量。超大规模集成电路(VLSI)基片,不仅要有较好的平面度,而且表面应无残余应力和损伤,并要保证较低的粗糙度^[4,5]。正是由于表面粗糙度对许多光学及半导体器件的性能有重要影响,对其进行准确测量就显得十分重要,这使得人们不断致力于改进超光滑表面粗糙度的测量手段,以提高其测量精度^[6]。

测量超光滑表面粗糙度的仪器从早期采用机械探针的 Telystep,到使用光学探针的 Wyko,一

直到原子力显微镜 AFM,测量精度不断提高。但随着测量仪器的多样化,随之而来的一个问题是各种测量仪器所得的结果之间通常会存在着一定的差别。有时这种差别还很大,这使得这些结果之间的可比性成为问题。造成这种现象的原因很多,其中一个重要的原因是各种测量仪器的空间频率(以下简称频率)响应不同,或者更严格地说,作为一种线性系统,它们的传递函数不同。

本文对表面轮廓仪的传递函数对光滑及超光滑表面粗糙度测量结果的影响进行了研究,这里所说的测量是指在被测表面的某一法向截面所截得的轮廓线上进行高度起伏的测量。

2 线性系统与传递函数

设单变量系统的输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 之间以映射 H 相联系,即

$$y = Hx, \quad (1)$$

t 代表某种变量,如时间或空间坐标等。 H 作为一个算符表征系统本身的属性,它作用在输入 x 上以产生输出 y 。如果 H 满足下列条件

$$H(\quad_1 x_1 + \quad_2 x_2) = \quad_1 Hx_1 + \quad_2 Hx_2, \quad (2)$$

α, β 为任意常数,则称该系统为线性系统。设 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(\omega)$, 即

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (3)$$

并设 H 对 $e^{i\omega t}$ 的响应为

$$He^{i\omega t} = H(\omega) e^{i\omega t}, \quad (4)$$

则由系统的线性性质可得

$$\begin{aligned} y(t) &= Hx(t) \\ &= H \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right\} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) H(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \end{aligned} \quad (5)$$

即

$$Y(\omega) = H(\omega) X(\omega), \quad (6)$$

其中 $Y(\omega)$ 为 $y(t)$ 的傅里叶变换。 $H(\omega)$ 通常称为系统的传递函数^[7]。

3 传递函数对粗糙度测量的影响

设被测表面沿某一方向上的高度分布为 $h(x)$, 实际测量时, 仪器所测的只是 $h(x)$ 中 x 位于 $[-L/2, +L/2]$ 区间内的一部分, 设为 $h_L(x)$ 。如果被测表面为无限延展的, 则由于 $h(x)$ 在区间 $(-\infty, +\infty)$ 上不是绝对可积的, 因此 $h(x)$ 的傅里叶变换一般并不存在。为了考虑被测表面高度起伏的频谱问题, 通常可采取两种方法: 一种是将被测表面看成是由 $h_L(x)$ 按周期 L 无限延展构成, 再将此周期为 L 的函数进行傅里叶级数展开; 另一种方法是考虑到当 $L \rightarrow \infty$ 时, $h_L(x)$ 将趋近于 $h(x)$, 于是可将 $h(x)$ 的空间频谱分布定义为

$$H(\omega) = \lim_{L \rightarrow \infty} \int_{-L/2}^{+L/2} h_L(x) e^{-i\omega x} dx, \quad (7)$$

需要指出的是, 由于实际测量时, L 总是有限的, 因此不管是第一种方法还是第二种方法, 由于 L 的取值不同, 都会对测量结果产生影响, 有关这方面的问题将另文讨论。另外, 为了叙述简便起见, 这里将采用第二种方法进行分析, 两种方法所得的结论是一致的。

如果仪器的频域传递函数为 $T(\omega)$, 则在测量所得结果中, 表面高度起伏所对应的空间频谱分布为

$$H(\omega) = H(\omega) \cdot T(\omega), \quad (8)$$

相应地, 所测得的表面高度分布为

$$\begin{aligned} h_L(x) &= h_L(x) \times t(x) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h_L(x) t(x - x') dx', \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $t(x)$ 为仪器的传递函数 $T(\omega)$ 的反傅里叶变换, 即仪器的冲击响应函数:

$$t(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} T(\omega) e^{i\omega x} d\omega, \quad (10)$$

设被测量表面的粗糙度方均根值为 σ , 则

$$\sigma^2 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} h_L^2(x) dx, \quad (11)$$

其中 L 为测量长度。设测量所得的粗糙度方均根值为 σ_L ,

$$\begin{aligned} \sigma_L^2 &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} h_L^2(x) dx \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{+L/2} [h_L(x - x') \times t(x')]^2 dx', \end{aligned} \quad (12)$$

测量仪器的传递函数一般可分为三类, 如图 1 示:

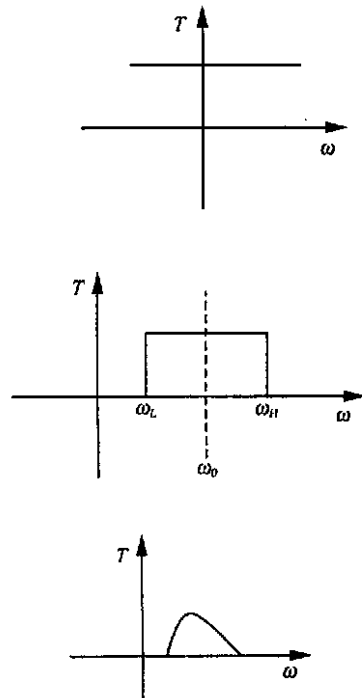


图 1 表面轮廓仪传递函数的基本类型

Fig. 1 Basic types of transfer functions of a surface profilometer.

其中第一种是理想情况,即仪器的传递函数在整个频率域上是一个常数,这实际上是达不到的。第二种类型是仪器传递函数在介于 L 和 H 之间的频率区间内为一常数(在下面的讨论中均假定其为 1),在其它地方等于零。第三种情况中传递函数为一曲线,这种类型的传递函数一般可通过一些补偿措施,使其转化为第二种类型,因此,不同仪器的传递函数不同主要表现为带宽不同。下面的讨论中假定传递函数为第二种。

此时,传递函数可写为

$$T(\omega) = \begin{cases} 1, & L \leq \omega \leq H \\ 0, & \omega \leq L \text{ 或 } \omega \geq H \end{cases}, \quad (13)$$

其中, $L = \omega_0 - \frac{\omega_0}{2}$, $H = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2}$, $\omega_0 = H - L$ 。对于不同的测量仪器, L 和 H 的值有所不同。相应的冲击响应函数为

$$t(x) = \frac{\sin(2 \cdot \frac{\omega_0}{2} \cdot x)}{2 \cdot \frac{\omega_0}{2} \cdot x} e^{i \omega_0 x}, \quad (14)$$

由此,

$$\sigma^2 = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \left[h_L(x-x') \frac{\sin(2 \cdot \frac{\omega_0}{2} \cdot x)}{2 \cdot \frac{\omega_0}{2} \cdot x} dx \right]^2 dx, \quad (15)$$

上式中,因被积函数中包含卷积运算,计算较为繁琐,且不易看出传递函数对粗糙度测量的影响。为此,转到频率域中进行计算。由 Parseval 定理,

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} h_L^2(x) dx \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L/2}^{L/2} |H(\omega)|^2 d\omega \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L/2}^{L/2} |H(\omega)| \cdot T(\omega) / T(\omega) |^2 d\omega \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L/2}^{L/2} |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (16) \end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} h^2(x) dx \\ &= \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \int_{-L/2}^{L/2} |H(\omega)|^2 d\omega, \quad (17) \end{aligned}$$

两相比较,可以看出

$$\sigma^2 = \sigma^2 - \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{2L} \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} |H(\omega)|^2 d\omega + \int_{| \omega | > L/2} |H(\omega)|^2 d\omega \right\}, \quad (18)$$

由于 $|H(\omega)|^2$ 的非负性,易知

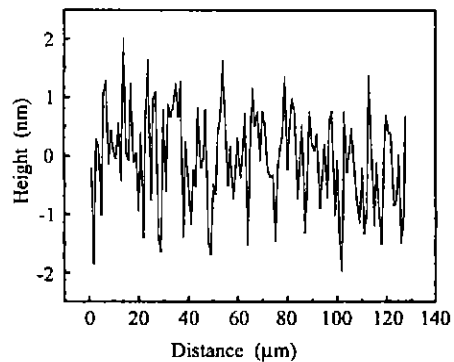
$$\sigma^2 \leq \sigma^2, \quad \sigma^2 \leq \sigma^2, \quad (19)$$

其中等号成立的条件是被测表面的空间频率成分全部落在测量仪器的频响范围之内,但这实际上是达不到的 因此,对于实际测量,

$$\sigma^2 < \sigma^2, \quad (20)$$

即测量所得的表面粗糙度方均根值小于被测表面的真实粗糙度方均根值,仪器的频响越宽,则测得的粗糙度方均根值越大,也越接近被测表面粗糙度方均根值的真实值。如果要对两种仪器所测的结果进行比较,则其前提条件是两者必须具有相同的传递函数,否则两者不具有可比性。

用离散傅里叶变换方法模拟具有不同带宽的表面轮廓仪对同一表面的测量情况,结果见图 2 及图 3。图 2(a) 是用带宽为 500mm^{-1} 对某一表面进行测量所得的结果,图 2(b) 为与之对应的功率谱密度。图 2(c) 则为用带宽为 227mm^{-1} 的表面轮廓仪对同一表面测量的结果,图 2(c) 为与之对应的功率谱密度。从图上可以看出,当轮廓仪带宽减小后,所测得的表面轮廓变得较为平滑,峰值高度有所减小。经计算,当带宽由 500mm^{-1} 减小到 227mm^{-1} 后,测得的表面粗糙度也相应地由 0.97nm 减小到了 0.56nm 。这一模拟结果与前面的分析是相符的。图 3 则进一步给出了表面粗糙度测量结果随轮廓仪带宽变化的情况,从中可以清楚地看出,随着带宽的减小,粗糙的测量结果也随之减小。



(a)

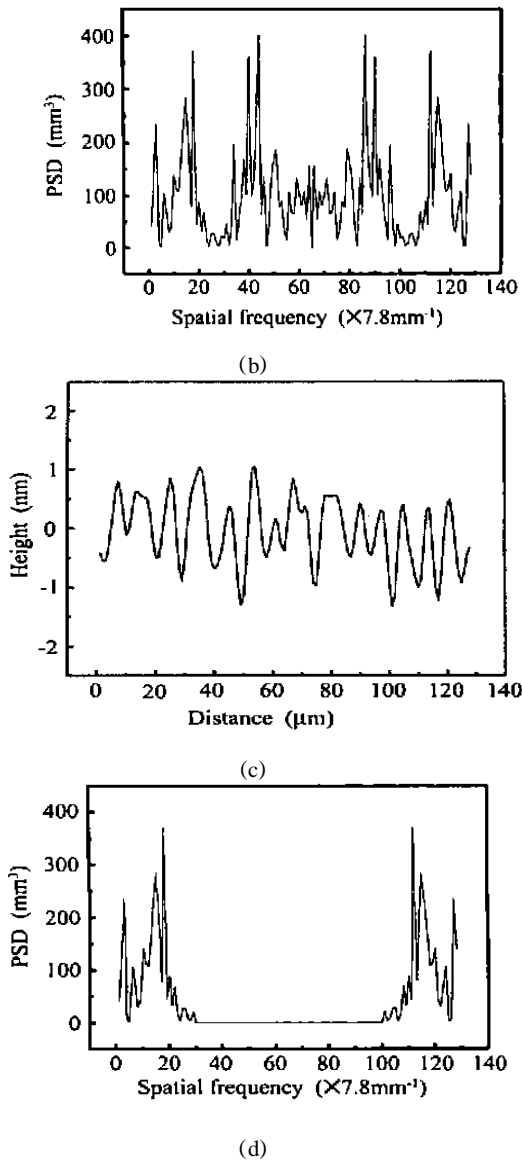


图 2 轮廓仪带宽对被测表面轮廓的影响(用 DFT 方法模拟)

Fig. 2 Effects of bandwidth of profilometer on the measured surface profile (simulated with DFT methods).

Church E L 等人曾分别用 Talystep 机械探针

式和 Wyko model 1000 型非接触光学探针式表面轮廓仪对抛光后的 Si 和 Ge 表面进行了测量,结果表明无论是用哪一种表面轮廓仪对何种表面进行测量,随着仪器带宽的扩大,表面粗糙度测量结果均增大;而且当两种仪器的带宽相同时,所得结果也在误差范围内相符^[8]。这一结果与上面的分析也是一致的。

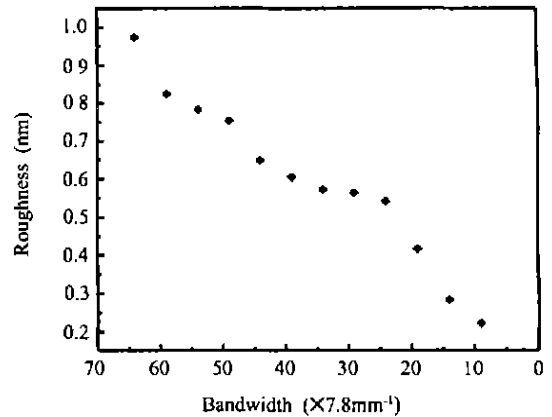


图 3 轮廓仪带宽对被测表面粗糙度的影响(用 DFT 方法计算)

Fig. 3 Effects of bandwidth of profilometer bandwidth on the measured surface roughness (calculated with DFT methods).

4 结 论

本文用线性系统理论的方法分析了测量仪器的传递函数对光滑和超光滑表面粗糙度测量的影响。结果表明,由于测量仪器的有限带宽,使得实际测量所得的粗糙度方均根值总是小于被测量表面的真实值。仪器的带宽越宽,则测量结果越接近于真实值。如果要对两种仪器的测量结果进行比较,其前提条件是两种仪器必须具有相同的传递函数,或简单地说具有相同的带宽,反之则不具有可比性。上述结果与 Church E L 等人的实验结果是一致的。

参考文献:

- [1] Haelbich R, Segmiiller A. Smooth multilayer films suitable for X-ray mirrors[J]. *Appl. Phys. Lett*, 1979, 34(3): 184 - 186.
- [2] Thomas N. Low-scatter, low-loss mirrors for laser gyros[J]. *SPIE*, 1978, 157: 41 - 48.
- [3] 曹麟祥. 用光探测器测量激光陀螺反射镜的前后向散射[J]. *航空精密制造技术*, 1993, 29(5): 8 - 11.
- [4] Moran M. Scatter intensity mapping of laser-illuminated coating defects[J]. *Appl. Opt*, 1988, 27: 957 - 962.
- [5] Jin Ch Sh, Ma Y Y. Development of an experimental EUVL system[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(5): 418 - 423.

- [6]卓永模,杨甬英. 第八届全国光学测试学术讨论会论文[C]. 合肥:安徽科技出版社,1999.
- [7]Ralph J. Schwarz and Bernard Friedland, *Linear Systems*[M]. New York:McGraw - hill Book Company, 1965.
- [8]Church E L , Vorburger T V , Wyant J C ,*et al.* Direct comparison of mechanical and optical measurements of the finish of precision machined optical surfaces[J]. *Opt. Eng.*,1985 , 24(3) : 388 - 395.

Effects of transfer function of profilometer on roughness measurement of ultra-smooth surface

XU Chang-shan , GONG Yan ,XIANG Yang , CHEN Bo , CAO Jian-lin

*(Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics ,
Chinese Academy of Sciences , Changchun 130021 , China)*

Abstract : Root-mean-square roughness is one of the most important figures that is used to characterize the ultra - smooth surfaces. Many experimental results show that different types of profilometers usually give different results , which make it difficult to compare them. In this paper , the effects of the transfer function of a profilometer on the roughness measurement of ultra-smooth surfaces are analyzed based on linear system theory and simulated with the discrete Fourier transformation method. The results show that because of the limited bandpass of the profilometer , the measured root-mean-square roughness is always less than the real roughness of the surfaces.

Key words : finish measurement ; ultra - smooth surfaces ; transfer function ; linear systems

作者简介:徐长山(1967 -) ,男,吉林省农安县人,博士,1993年于东北师范大学物理系获理学硕士学位,1996年获中科院长春物理研究所理学博士学位,主要从事同步辐射应用及超光滑表面加工方面的研究工作。