

表面粗糙度的变波矢光散射测量方法的研究

程传福 亓东平 刘德丽

(山东师范大学物理系, 济南 250014)

摘 要 提出了表面粗糙度变波矢光散射测量方法, 通过散射光强中心亮点光能量的对数 $\ln E_s$ 随 k_{\perp}^2 变化的线性关系来确定粗糙度 w , 对 6 块粗糙度不同的硅片背面样品进行了实验测量。

关键词 光散射, 变波矢, 粗糙度。

长期以来, 人们在表面理论中通常把随机表面看作具有高斯高度分布和高斯相关特性的表面。近十年来的研究表明, 许多随机表面具有自仿射分形性质^[1, 2], 这类表面要用纵向相关长度 w 、横向相关长度 ξ 和粗糙度指数 α 三个平均参量来描述。其中 w 为表面高度偏差的均方根, 通常称之为粗糙度, 它是许多工程和技术问题中人们所关心的首要参量, 其测量方法有接触法(如轮廓仪、原子力显微术等)和非接触法(如光散射法、光学椭偏术等)。目前的光散射测量, 均以散射光强分布中的中心亮点的光能量 E_s 与漫散射的光能量 E_{diff} 的比值来确定 w ^[3]。本文提出了一种用光散射测量粗糙度的新方法, 它通过改变散射波矢量 \mathbf{k} 的垂直分量 k_{\perp} 测量相应中央亮点的光能量 E_s , 并由它们之间的变化关系得到表面粗糙度 w 。称之为变波矢测量法。

在如图 1 所示的实验光路中, 激光束经会聚透镜 L 后, 照射被测样品 S。如果 S 是呈高斯高度分布的随机表面, 则照明光经过它的散射后, 在 L 的后焦面上得到散射光强分布的轮廓函数为^[3]:

$$S(\mathbf{k}) = (2\pi)^2 \exp(-k_{\perp}^2 w^2) \delta(\mathbf{k}_{\parallel}) + S_{\text{diff}}(\mathbf{k}_{\parallel}, k_{\perp}) \quad (1)$$

其中

$$S_{\text{diff}}(\mathbf{k}_{\parallel}, k_{\perp}) = \iint d^2\mathbf{r} \{ \exp[-k_{\perp}^2 H(\mathbf{r})/2] - \exp(-k_{\perp}^2 w^2) \} \exp(i\mathbf{k}_{\parallel} \cdot \mathbf{r}) \quad (2)$$

Fig. 1 The diagram of the experimental setup 文献[3]详细给出了以上两式中各量的物理意义。(1)式右端第一项是散射中心亮点处的光强分布, 第二项是漫散射项。可见, 中央亮点的光能量 E_s 正比于 $\exp(-k_{\perp}^2 w^2)$, 其中 $k_{\perp} = (\mathbf{k}_{\text{out}} - \mathbf{k}_{\text{in}})_{\perp} = 4\pi \cos \theta / \lambda$ 是中心亮点处的散射波矢 \mathbf{k} 在与样品表面垂直方向上的投影。因此, 在图 1 中改变光的入

射角 θ ，即改变 k_{\perp} ，可得到 E_{δ} 随 k_{\perp} 的变化关系，而 $\ln E_{\delta}-k_{\perp}^2$ 图应为一条直线，其斜率即为 w^2 ，从而得到 w 。

实验中，以 He-Ne 激光器作为光源，波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ，以 6 块粗糙度不同的硅片背面作为测试样品。被测样品放在一转台上，以改变光束的入射角 θ 。中心亮点总是出现在反射方向上，每一次改变 θ ，都需随之改变探测器 D 的位置。在探测器前的焦平面位置上，加一小孔光阑，让中心亮点的光能量全部通过。探测器与小孔光阑间有 2 cm 左右的距离，以使中心亮点的光强较为均匀地照射感光面，避免光照度过大而导致其感光的局部饱和。应当指出，当表面比较粗糙且 θ 较小时， $k_{\perp}^2 w^2$ 的值较大，中心亮点的能量较小，会被漫射光强所掩盖。因此，样品的粗糙度不同，测量时开始出现中心亮点的初始入射角也不同。本文所测试的 6 块样品中，对于较粗糙的样品入射角在 70° 以上才出现中心亮点；对于较平滑的样品，入射角在 40° 以上便可出现中心亮点。在对各样品进行测量时， θ 在 70° 以下时每次增加 2° ，在 70° 以上时每次增加 1° ，以保证较粗糙的样品有足够多的测量点，提高测量精度。考虑到硅片表面反射率随入射角的变化，对硅片正面(为镜面)的反射率进行了测量，并以此对各样品散射的中心亮点的能量进行标定。

图 2(a)、(b) 分别给出了样品 # 1、# 2、# 5 和 # 3、# 4、# 6 的测量结果，这些结果表明，中心亮点的光能量在对数坐标系下与 k_{\perp}^2 之间呈很好的线性关系。在绘图软件中对数据进行线性拟合，所给出的直线斜率即为 w^2 。为检验本文的测量结果，用 TALYSURF 4 型触针式轮廓仪对测试样品的高度偏差绝对值的平均值 R_a 值进行了测量，所测得的 R_a 值和用本文方法所测得的 w 值均列于表 1 中。

Table 1. The values of w and R_a measured by light scattering and by stylus profilometry respectively

samples	w	R_a	samples	w	R_a
# 1	0.097	0.08	# 4	0.326	0.32
# 2	0.112	0.10	# 5	0.631	0.71
# 3	0.267	0.24	# 6	0.648	0.74

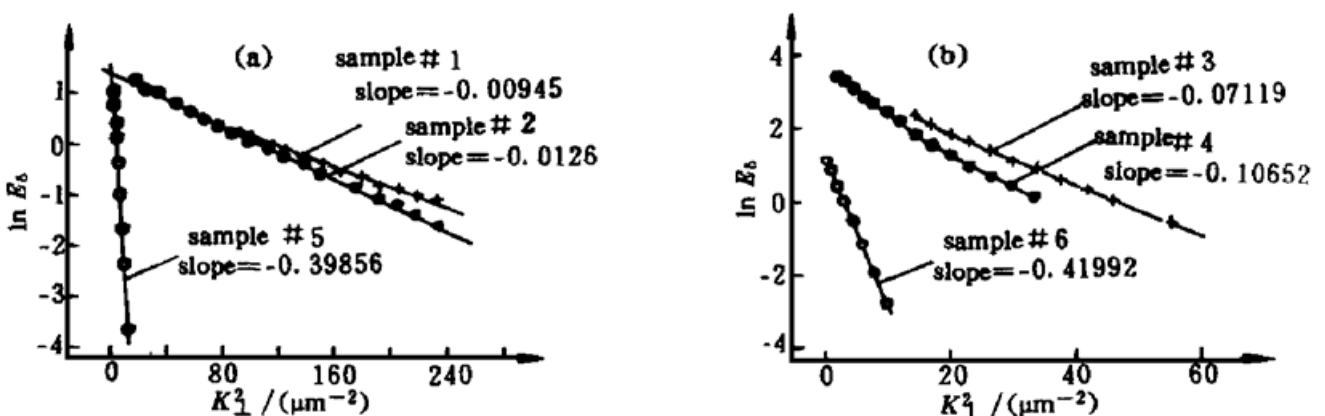


Fig. 2 The central peak energy vs. k_{\perp}^2 for samples (a) # 1, # 2, # 5 and (b) # 3, # 4, # 6

由表中的数据可以看出，本文测得的 w 值与触针法测得 R_a 值对样品粗糙程度的描述结果是相符合的。因此，本文所提出的方法是一种简单方便、快捷可靠的粗糙度测量方法。

参 考 文 献

- [1] Barabasi A L, Stanley H E. *Fractal Concepts in Surface Growth*. New York: Cambridge University Press, 1995.
- [2] 侯建国, 王 衍, 朱晓光等. C₆₀-Ag 薄膜高、低温粗糙表面的标度行为和粗糙化机理的实验研究. 中国科学(A), 1998, **28**(7) : 656~ 661
- [3] Zhao Y P, Wu I, Cheng C F *et al.*. Characterization of random rough surface by in-plane light scattering. *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**(5) : 2571~ 2582

Light Scattering Measurement of Surface Roughness by Variable Wave Vectors

Cheng Chuanfu Qi Dongping Liu Deli

(*Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014*)

(Received 3 November 1998; revised 24 February 1999)

Abstract Based on the linear relationship between the logarithm of the central peak energy and k_{\perp}^2 in light scattering, a method for the measurement of surface roughness by changing the wave vectors is proposed. Experimental measurements of 6 samples of silicon backsides were conducted.

Key words light scattering, variable wave vectors, surface roughness.