

文章编号 1004-924X(2001)02-0151-04

# 散射法表面粗糙度测量

尼启良, 陈波

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 介绍了标量和矢量两种散射理论, 并用软 X 射线反射率计对超光滑表面进行散射测量, 同时应用这两种理论计算了超光滑表面粗糙度均方根值, 从计算结果来看, 两种理论所得结果与 WYKO 测量结果吻合较好。

关键词: 散射; 软 X 射线; 超光滑表面; 光洁度测量

中图分类号: TG84 文献标识码: A

## 1 引言

随着软 X 射线-真空紫外波段光学研究的不断深入, 对光学表面的要求越来越严格, 其面形精度要求达到纳米量级, 表面粗糙度达到亚纳米量级。要加工出这样高质量的光学元件, 首先要解决检测问题。这里我们针对超光滑表面粗糙度检测问题, 讨论用散射法进行表面粗糙度评价, 并给出具体的实验和计算结果。

散射法测量光学元件表面粗糙度是评价表面粗糙度特性的一种有效方法。早期的研究主要是集中在激光器的工作波段和硬 X 射线波段。因激光器的工作波长远大于超光滑表面粗糙度值, 且激光相干性好, 其散射结果的干涉、衍射严重, 无法用激光器对超光滑表面进行散射测量。70 年代末期以来, 随着同步辐射光源和软 X 射线激光等离子体光源的发展, 在软 X 射线波段高亮度的光源成为现实, 这种表面粗糙度测量方法也更加引起人们的重视, 并在超光滑表面的评价中发挥了重要作用。

## 2 原理

本文介绍标量和矢量两种散射理论, 并用这两种理论对实验数据进行处理, 获得表面粗糙度值。通常我们所研究的超光滑表面粗糙度是二维随机分布的, 其散射几何图形如图 1 示, 表面坐标  $r = [X, Y, Z]$ , 表面高度分布  $Z = \xi(x, y)$ , 平均平

面为  $Z = 0$ , 设表面高度是概率密度为  $P(Z_1, Z_2)$  的二维分布随机变量, 这种分布通常看作是各向同性的高斯分布。表示这种分布的特征量是方差  $\langle \xi^2 \rangle$  和自相关函数  $c(\tau) = \langle \zeta(r)\xi(r + \tau) \rangle / \langle \xi^2 \rangle$ , 其中  $\tau = |r_2 - r_1|$ 。方差是均方根粗糙度的平方即  $\langle \xi^2 \rangle = \sigma^2$ 。它给出了表面在垂直方向的粗糙度信息, 自相关函数包含表面的横向统计信息。两个邻近点的相关性很好,  $C(\tau) = 1$ , 对随机表面,  $C(\tau)$  通常随  $\tau$  的增加而迅速减小, 当  $C(\tau) = 1/e$  时,  $\tau$  称为自相关长度记为  $T$ 。它提供了对表面结构横向大小的测量方法。 $\sigma$  和  $C(\tau)$  (或  $T$ ) 是描述表面特征的参量。通常  $C(\tau)$  是指数或高斯函数即  $C_e = \exp(-|\tau|/T)$ ,  $C_g = \exp(-\tau^2/T^2)$ , 它们是对实际情况的很好近似。

标量理论是以亥姆霍兹积分和下面的 Beckmann 的两条假设为基础推导出来, 并且忽略了电场的矢量特征。Beckmann 假设<sup>[1]</sup>为: (1) 表面上不规则处的曲率半径大于入射光波长。(2) 表面导电率无穷大, 以至于表面上每点的反射率  $R = 1$  或  $R = R_0(\theta)$  (平均反射率)。如果表面高度是高斯分布, 则单位立体角内归一化的散射强度<sup>[2]</sup>:

$$\frac{dI}{I_0 d\Omega} = R_0(\theta) \exp(-g) \delta(\theta - \theta_0) + R_0(\theta) \cdot \exp(-g) \frac{1}{\lambda^2} F(\theta, \theta_0, \varphi_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g^n}{n!} W_n = I_{\text{specular}} + I_{\text{scatter}} \quad (1)$$

这方程包含两项, 镜向反射强度  $I_{\text{specular}}$  和漫散射强度  $I_{\text{scatter}}$ 。  $I_{\text{scatter}}$  的收敛由  $g$  决定:

收稿日期: 2000-11-17; 修订日期: 2000-12-16

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室基金资助项目

$$g = \frac{4\pi^2\sigma^2}{\lambda^2} (\sin\theta + \sin\theta)^2$$

$$F = \frac{(1 + \sin\theta\sin\theta - \cos\theta\cos\theta\cos\varphi)}{\sin\theta(\sin\theta + \sin\theta)^2}$$

对于指数和高斯型自相关函数  $C(\tau)$ ,  $W_n$  表示如下:

$$W_{n,e} = \frac{2\pi(T/n)^2}{[1 + (T/n)^2V_{xy}^2]^{\frac{3}{2}}}$$

$$W_{n,g} = \frac{\pi}{n} T^2 \exp((-V_{xy}^2 T^2/4n)$$

其中  $V_{xy}^2 = |k_1 - k_2| = (\cos^2\theta - 2\cos\theta\cos\theta \cdot \cos\varphi + \cos^2\theta) \frac{4\pi^2}{\lambda^2}$ ,  $k_1$  和  $k_2$  分别为入射光波矢量和反射光波矢量,  $g$  和  $W_n$  中包含表面的全部统计性质. 当粗糙度  $\sigma$  很小时 ( $g < 1$ ), (1) 式中中级数的高阶项可忽略,  $I_{\text{specular}}$  与  $W_1$  成正比.

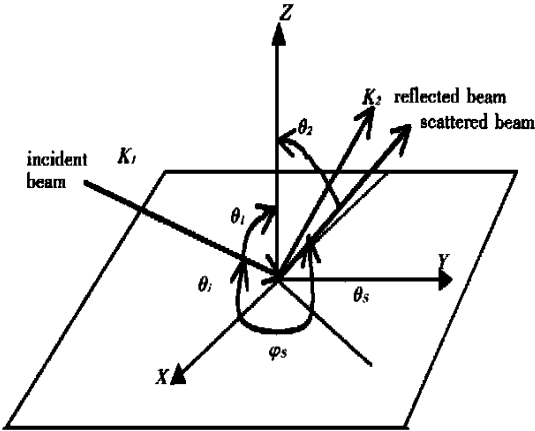


Fig 1 Scattering geometry from an arbitrarily rough surface

矢量理论考虑光的偏振性和表面反射率对散射的影响. 常用的一阶微扰矢量理论需要满足  $(k\sigma\sin\theta)^2 \ll 1$  的条件,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\sigma$  是均方根粗糙度,  $\theta$  是掠入射角. 对于非磁性表面, 单位立体角内散射强度<sup>[3]</sup>:

$$\frac{dI}{d\Omega} = \frac{k^4}{\pi^2} I_0 \sin\theta \sin^2\theta \cdot Q \cdot W(p, q) \quad (2)$$

其中  $d\Omega = \cos\theta d\theta d\varphi$ ,  $I_0$  是入射光总强度,  $Q$  取决于表面的复折射率和入射光束偏振特性,  $W(p, q)$  是二维表面粗糙度功率谱密度函数,  $p = k(\cos\theta\cos\varphi - \cos\theta)$ ,  $q = k(\cos\theta\sin\varphi)$ . 在小角散射条件下 ( $\theta \approx \theta$ ),  $Q$  等于表面菲涅耳反射率, 因此散射强度的分布与功率谱密度函数

$W(p, q)$  成正比.

$$p = k\theta\alpha, \alpha = \theta - \theta, q = k\varphi \quad (3)$$

$$W(p, q) = \frac{1}{I_R} \left( \frac{\pi^2}{k^4} \frac{1}{\theta\varphi} \right) \frac{dI}{d\Omega} \quad (4)$$

此处  $I_R$  是反射光总强度,  $d\Omega = d\theta d\varphi$ , 从功率谱密度函数可以推导出表面粗糙度方差  $\sigma^2$  和表面斜率方差  $m^2$ . 从这两方差可得表面粗糙度自相关长度  $T = (2\pi\sigma)/m$  当  $\theta \approx \theta$  时有:

$$(2\pi\theta)^2 = \frac{1}{I_R} \frac{dI}{d\Omega} d\Omega \quad (5)$$

$$(2km\theta)^2 = \frac{1}{I_R} (p^2 + q^2) \frac{dI}{d\Omega} d\Omega \quad (6)$$

由方程(5), (6)可求得与表面粗糙度有关的参量.

### 3 实验装置

我们用自行研制的软 X 射线反射率计进行软 X 射线散射测量. 反射率计由 Henke 光源、空阴极光源、激光等离子体光源、常偏角单色仪、样品室、数据采集系统、高真空系统及微机控制系统组成. 如图 2 所示, 调 QNd:YA G 激光器(工作波长  $1.06\mu\text{m}$ ,  $0.532\mu\text{m}$  和  $0.226\mu\text{m}$ , 脉冲频率 10Hz, 脉冲能量 2J, 脉宽约 5ns~9ns)轰击 C、Fe、Cu、Ti 或 W 靶产生激光等离子体, 进而由激光等离子体辐射出 4nm~30nm 波段的软 X 射线连续谱. 由掠入射恒偏角单色仪选出单色软 X 射线辐射. 单色仪选用  $6001/\text{mm}$ ,  $R = 3\text{m}$  的凹面光栅, 出射光线和入射光线间的夹角为恒偏角  $166^\circ$ . 单色软 X 射线经出射狭缝(0mm~2mm 可调)后进入样品室, 在出缝处装有中空微通板用来监测入射光强. 经样品反射的光强由电子倍增器探测. 整个测量过程由计算机控制, 测量数据经计算机采集、存储和绘图. 真空样品室内装有探测器和样品分立转动、三维平动的五维精密样品台, 可实现  $0.005$  角分辨率的探测器转动和样品转动. 样品台平移精度  $5\mu\text{m}$ , 运动范围 50mm. 在无样品时, 用探测器直接测量入射光束分布, 然后移入样品, 用探测器测量反射光束分布. 测得的数据分别存入计算机或打印出来.

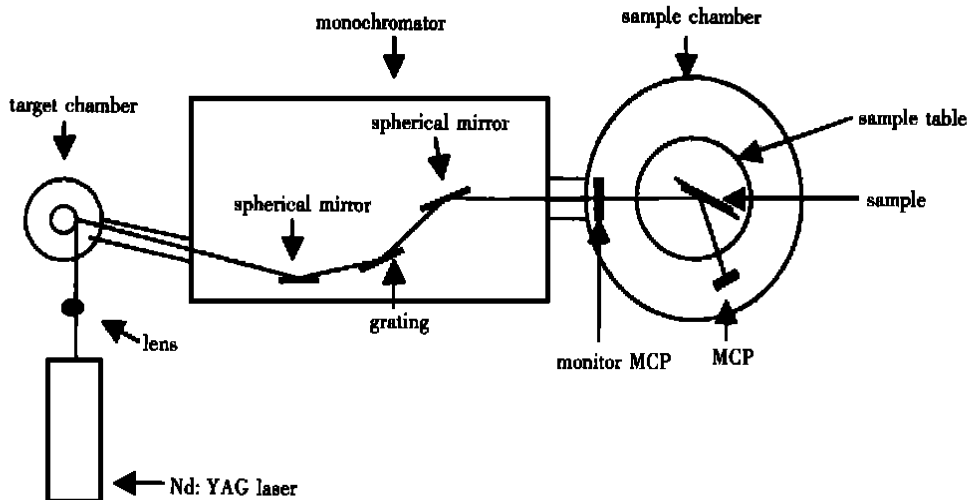


Fig 2 Schematic diagram of the soft x-ray reflectometer

### 4 数据处理及结果

我们利用上述测量装置测得的散射测量结果分别给出矢量和标量理论得出的样品均方根表面粗糙度值。图 3 是 Henke 源碳靶产生的 4.3nm 散射光束相对强度随角度的分布。角度范围从 -1° 到 +1°; 从此图可得峰值的半角宽度是 0.5°。图 4 是玻璃样品反射光的相对强度随散射角的分布。散射角范围从 -3.45° 到 +2.5°; 入射光波长仍为 4.3nm, 掠入射角是 2.55°。从此图可以计算出反射光总强度, 它是从 -3.45° 到 +2.5° 曲线下全部积分面积, 同时曲线下从 -0.25° 到 +0.25° 即半角宽度范围内积分所得的面积也可求得。两者之差是散射光强度值。因此散射光与反射光强度的比值可以计算出来。再由 (6) 式计算出均方根表面粗糙度如表 1。

Table 1 rms roughness of sample

Measurement method	ratio of the scattered intensity to the incident intensity (%)	rms roughness (nm)
Vector method	10.3	2.1
WYKO		2.2

表面粗糙度相关长度  $T = (2\pi) / \sqrt{p^2 + q^2} = \lambda / \sqrt{\alpha^2 \theta^2 + \varphi^2}$ , 在粗糙度是一维随机分布情况下:  $T = \lambda / (\alpha \theta)$  散射角范围从 -3.45° 到 -1° 表面粗糙度相关长度范围大约  $0.05 \mu\text{m} \sim 0.162 \mu\text{m}$ 。对二维随机分布,  $T$  与  $\sigma$  之间关系较复杂,  $T$  值不易直接计算出来。

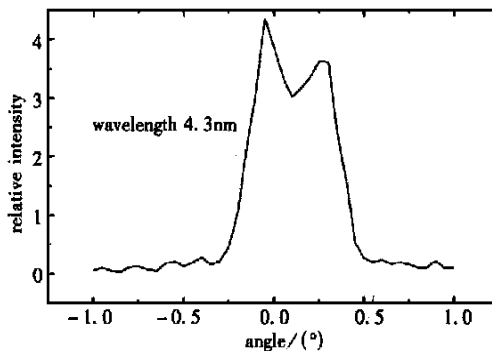


Fig 3 Relative intensity of the incident beam versus angle

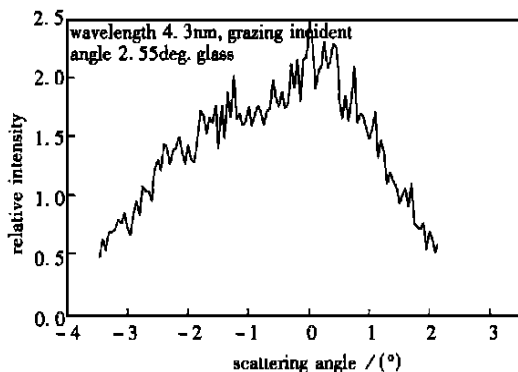


Fig 4 Relative intensity of the scattered beam versus scattering angle

标量理论采用实验数据和理论值进行拟合的方法求出  $\sigma$  和  $T$  的值。利用公式 (1) 的第一项, 从镜向反射率与入射角的关系曲线拟合出  $\sigma$  值, 再利用已知的  $\sigma$  值通过改变自相关长度  $T$  和  $I_{\text{specular}} / I_{\text{scatter}}$  的值拟合出  $T$ 。  $I_{\text{specular}} / I_{\text{scatter}}$  的值取决于探测器有效面积所对的立体角  $\Omega_d$ , 由于  $\Omega_d$  很难测量, 我们可以把它做为一个拟合参数, 因此把  $\sigma, T, \Omega_d$

三者看作拟合参数,  $C(\tau)$  取为指数分布用方程式 (1) 也可以拟合出  $\sigma$  的值, 拟合结果表示如表 2, 并给出 WYKO 测量结果。

Table 2 Fitting results of the sample

Measurement method	rms roughness (nm)	autocorrelation length (nm)
Scalar method	2.7	800
WYKO	2.2	

#### 参考文献:

- [1] Beckmann P, Spizzichino A. The scattering of electromagnetic waves from rough surface[M]. London: Pergamon Press, 1963
- [2] Hogrefe Henning, Kunz Christof. Soft X-ray scattering from rough surface: experimental and theoretical analysis [J]. Appl Opt, 1987, 26(4): 2851- 2859
- [3] de Korte P A J, Laine R. Assessment of surface roughness by X-ray scattering and differential interference contrast microscopy[J]. Appl Opt, 1979, 18(2): 236- 242

### Measurement of surface roughness by scattering method

NI Q i-liang, CHEN Bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The paper describes scalar- and vector-scattering theories. Using a soft X-ray reflectometer, the super-smooth surface has been measured by scattering method, and the roughness of super-smooth surface has been calculated by means of scalar- and vector scattering theories. The calculating results are in accordance with those measured by WYKO.

**Key words:** soft X-ray; scattering; super-smooth surface; roughness measurement

**作者简介:** 尼启良(1967- ), 男, 辽宁省辽阳人, 1990年毕业于长沙电力学院物理系, 1998年在中国科学院长春光机所获理学硕士学位, 现在长春光机所应用光学国家重点实验室攻读博士学位。

## 5 结 论

实验证明软 X 射线表面散射测量能直观地反映出超光滑表面形貌特征。我们用自行研制的高精度软 X 射线反射率计测得散射光相对强度随入射角变化的分布, 较准确地计算出超光滑均方根表面粗糙度和相关长度。所得的测量结果与用 WYKO 测量的结果接近。