

光学散射法表面特征的测量与分析 *

陈淑妍^{1,2}, 齐立红, 陈 波

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 光学表面评价和检测对光学研究, 尤其是短波段光学研究具有重要的意义。介绍了短波段掠入射表面散射线性模型, 并根据这个理论, 建立了软 X 射线掠入射表面逆散射模型。利用这个数学模型对由软 X 射线反射率计测得的数据进行计算, 得到通过散射测量所获得的样品表面特征值, 所测结果与 WYKO 测量结果吻合。测量结果表明: 掠入射软 X 射线光学散射法能够较为精确地计算出光滑表面粗糙度和表面自相关函数, 可以很直观地反应出光学表面形貌特征。

关键词: 表面散射; 软 X 射线; 掠入射; 表面特征

中图分类号: O434.11 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2006)01-0082-04

Measurement and analysis of surface profiles
by optical scattering method*CHEN Shu-yan^{1,2}, QI Li-hong, CHEN Bo

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Evaluation and measurement of surface profiles are very important especially to short-wavelength optical research. A linear system treatment of short-wavelength surface scattering theory is introduced, and based on this, a new inverse scattering mathematical model of soft X-ray grazing incidence optics is established. By using these scattered light distributions of super-smooth surfaces measured by a soft X-ray reflectometer, the surface profiles of super-smooth surfaces are computed by means of inverse scattering mathematical model of soft X-ray grazing incidence optics. The calculating results are in accordance with those measured by WYKO. It can be concluded that the soft X-ray grazing incidence optical scattering method can calculate micro-roughness and surface auto correlation function of smooth surface accurately, and can give optical surface profiles intuitively.

Key words: Surface scattering phenomenon; Soft X-ray; Grazing incidence optics; Surface profiles

收稿日期: 2005-05-12; 修订日期: 2005-06-20

* 基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目(10333010)

作者简介: 陈淑妍(1975-), 女, 吉林省吉林市人, 博士生, 研究方向为短波光学技术。

0 引言

随着科学技术的飞速发展,尤其是短波段光学研究的不断深入,对光学元件的表面加工也提出了越来越高的要求。因此,光学表面评价和检测成为一个亟待解决的问题。

在光学表面特征检测中,目前国内外采用的方法主要有光学测量法、扫描探针显微技术和光学散射法等。光学测量法包括光学探针法和干涉法,是一种结构简单、成本低的快速非接触测量法,但不能分辨微米以下更细微的形貌,对被测表面的清洁度要求较高。扫描隧道显微镜、原子力显微镜是两种有代表性的扫描探针显微镜,具有很高的纵向和横向分辨率,但扫描隧道显微镜要求被测件必须导电,测量范围小,必须在真空中进行;而原子力显微镜易于受灰尘干扰。利用光学散射法,即逆散射法来评价光学元件表面特征,是一种行之有效的光学元件表面特征评价方法,也是光学散射研究特性的基础。这种方法具有测量精度高和仪器结构简单等优点。由于它测量的是被测表面的平均特性,故不能给出表面的形貌,属于一种参数测量技术。

早期的研究主要集中在激光器的工作波段和硬 X 射线波段。因为激光器的工作波长远大于超光滑表面粗糙度值,并且激光相干性好,所以其散射结果的干涉、衍射严重,无法用激光器对超光滑表面进行光学散射测量。自 20 世纪 70 年代末以来,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,这种表面粗糙度的测量方法也更引起人们的重视,并在超光滑表面的评价中发挥了重要作用^[1-3]。

本文介绍了短波段掠入射表面散射线性模型,并且根据这个理论,建立了软 X 射线掠入射表面逆散射模型。下面将针对掠入射光学系统,把表面散射作为标量衍射过程,探讨光学散射与光学元件表面特征的关系,进而评价光学表面。

1 掠入射光学逆散射原理

在描述光学表面特征时,通常采用表面粗糙度均方根值,但仅仅用它来评价表面形态是不够的。表

面自相关函数(ACF)或它的傅里叶变换——光学表面功率谱密度函数(PSD)则包含表面的横向统计信息,因此通常用 ACF 和 PSD 与一起来表征光学表面。另外,光学表面还分为各向同性表面和各向异性表面,而本文仅限于研究各向同性的光学表面。

粗糙表面对入射光的反射分为镜向反射和散射。散射减小了到达像面的光通量,降低图像对比度和光学系统的分辨率,对短波段光学系统的影响尤为严重。引起散射光的来源也有很多,而本文仅限于研究软 X 射线波段,由表面高度随机变量反射带来的位相扰动所造成的散射^[4-6]。

因为衍射孔径可以是复合的,呈现连续的振幅和位相变量,表面散射可以看作是标量衍射过程,同时,假设光学表面是随机、各向同性、各态历经的,它的高度分布服从高斯分布。应用线性系统理论,经过分析可得出掠入射光学系统散射表面传递函数^[6,7]:

$$H_s(\hat{x}, \hat{y}; 0) = \exp \left\{ - \left[4 \sin^2 \phi_s \right]^2 \left[1 - \hat{C}_s \left(\frac{\hat{x}}{\hat{l}}, \frac{\hat{y}}{\hat{l} \sin \phi} \right) / \hat{l}_s^2 \right] \right\} \quad (1)$$

公式(1)也可以写成:

$$H_s(\hat{x}, \hat{y}) = A + BQ(\hat{x}, \hat{y}) \quad (2)$$

$$A = \exp \left[- \left(4 \sin^2 \phi_s \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$B = 1 - A = 1 - \exp \left[- \left(4 \sin^2 \phi_s \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$Q(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{\exp \left[\hat{C}_s \left(\frac{\hat{x}}{\hat{l}}, \frac{\hat{y}}{\hat{l} \sin \phi} \right) \left(4 \sin^2 \phi_s \right)^2 / \hat{l}_s^2 \right] - 1}{\exp \left[- \left(4 \sin^2 \phi_s \right)^2 \right] - 1}$$

式中 \hat{C}_s 为二维表面自相关函数; \hat{l}_s 为正则化的表面粗糙度均方根值; \hat{l} 为表面自相关函数的相关长度; ϕ 为掠射角; A 和 B 分别为镜向反射的总体反射能和总体积分散射; 采用的标量坐标都用波长正则, 即: $\hat{x} = x/\lambda$, $\hat{y} = y/\lambda$, $\hat{z} = z/\lambda$, 与其相应的方向余弦空间坐标为: $\hat{x} = \hat{x}/\hat{r}$, $\hat{y} = \hat{y}/\hat{r}$, $\hat{z} = \hat{z}/\hat{r}$, 及 $\hat{l}_s = \hat{l}_s/\lambda$, $\hat{l} = \hat{l}/\lambda$ 。

从公式(1)可以看出, 掠入射反射镜的散射传递函数用掠射角、表面粗糙度均方根值、波长及表面自相关函数来表征, 这样就把散射表面的微观形态和掠

入射时镜片表面的散射机制结合起来,为散射表面微观形貌特征的研究提供了一个行之有效的办法^[7]。

角度扩散函数 $S(\hat{x}, \hat{y}; \hat{r})$ 和表面传递函数 $H_s(\hat{x}, \hat{y})$ 互为傅里叶变换,即:

$$S(\hat{x}, \hat{y}; \hat{r}) = F[H_s(\hat{x}, \hat{y})] = A(\hat{x}, \hat{y}; \hat{r}) + s(\hat{x}, \hat{y}; \hat{r}) \quad (5)$$

式中 $s(\hat{x}, \hat{y}; \hat{r})$ 为散射函数。

$$s(\hat{x}, \hat{y}; \hat{r}) = BF[Q(\hat{x}, \hat{y})] \quad (6)$$

从公式 (1) 可以得出表面自相关函数为:

$$\hat{C}_s\left(\frac{\hat{x}}{\hat{l}}, \frac{\hat{y}}{\hat{l}\sin\phi}\right) = C\left(\frac{x}{l}, \frac{y}{l\sin\phi}\right) = \left(\frac{1}{4\sin\phi}\right)^2 \ln[H_s(\hat{x}, \hat{y})] + s^2 \Big|_{\hat{x}=x/l, \hat{y}=y/l, \hat{r}_s=r_s/l, \hat{l}=l} \quad (7)$$

式中,

$$H_s(\hat{x}, \hat{y}) = A + BQ(\hat{x}, \hat{y}) = A + F^{-1}[S(\hat{x}, \hat{y})] \quad (8)$$

表面粗糙度均方根值 s_s 可由公式 (3) 得出,即:

$$s_s = \frac{1}{4\sin\phi} \sqrt{\ln \frac{1}{1-B}} \quad (9)$$

其中总体积分散射 B 可以通过对散射光分布的实验数据进行数值积分来得到。

2 实验装置

在光学表面散射的实验中,光学散射对反射镜的影响体现在反射镜的有效面积上。基于实验室现有的设备和条件,采用软 X 射线反射率计对光学表面散射进行测量。反射率计由激光等离子光源、单色仪、探测器、样品台和探测器工作台及数据采集系统组成,如图 1 所示。光源是实验室自行研制的激光等离子光源,工作气体为 Kr, YAG 激光器 (Continuum 9000) 用于产生等离子体,它的最大工作频率是 10 Hz,工作波长为 1.06 μm ,脉冲宽度是 10 ns,每个脉冲能量是 1 J。单色仪选用刻划密度为 600 g/mm、曲率半径为 3 m 的凹面光栅,出射光线和入射光线间的夹角恒为 166°。测试所采用的探测器是通道电子倍增器,它在软 X 射线波段有较高的量子效率和很低的噪声。该反射率计共用两个探测器,一个是监视探测器,即图

1 中的 Monitor CEM,用来监测光源的强度变化,校正由于光源不稳定性所带来的测试误差。另一个是图 1 中的 CEM,通过转动它来探测样品对软 X 射线的散射分布,输出电脉冲信号。测试所使用的样品台为六维精密回转平台,可以实现三轴平移,一轴旋转;而探测器工作台可以实现圆周运动。另外,整个反射率计处于真空系统中,采用真空无油步进电机驱动。

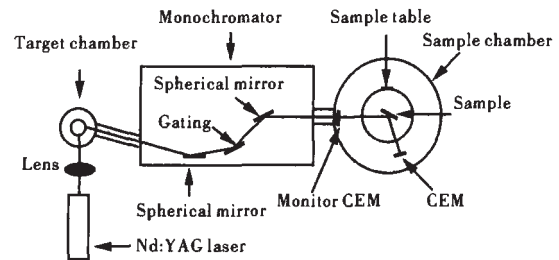


图 1 软 X 射线反射率计结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the soft X-ray reflectometer

激光等离子体光源产生的软 X 射线谱线经过狭缝和单色仪,选出所需工作波长的单色光,然后进入样品腔内;单色软 X 射线经样品反射镜反射后的光强由通道电子倍增器探测,实现散射的测试。两个探测器对应两个数据通道,用两组数据的比值来分析样品的散射分布。另外,在无样品时,只需通过探测器直接测量入射光束分布。探测结果经过数据采集系统由计算机输出。

3 实验数据与分析

测试采用了两块样品,即硅片和微晶玻璃材料。下面利用前面的理论对上述测量装置测得的数据进行计算,得到由散射测量所获得的样品表征值。

图 2(a) 是当工作波长为 11 nm,掠射角为 2° 时,实验测得的样品 1(硅片)的散射分布,其中横坐标为散射角 2θ 的余角。根据前面的理论,从测得数据可以得到总体积分散射 $B=0.00359$,计算出样品 1 的表面粗糙度均方根值 $s_s=1.50$ nm,同时得出表面自相关函数 $C\left(\frac{r}{l}\right)$,如图 2(b) 所示,从图中可以看出样品 1 的自相关长度为 10 μm 。图 3 为 $\lambda=11$ nm, $\theta=2^\circ$ 时,样品 2 的计算结果曲线,它的表面粗糙度均方根值 $s_s=1.90$ nm,自相关长度为 21.5 μm 。同时,采用 WYKO

干涉显微镜分别对两块样品的光学表面粗糙度进行测定, 结果如图4所示, 图中放大率为41.7。图4(a)为样品1的测定结果, $s_s=1.3$ nm; 图4(b)为样品2的测定结果, $s_s=1.5$ nm。从图4可看出, WYKO测得的表面粗糙度和由逆散射法得到的样品表面粗糙度基本吻合, 但仍存在一定的差异。该误差主要来源于以下几个方面:

(1) 进行散射测试时, 由实验装置带来的误差。软X射线反射率计中各种传动机构, 如样品工作台和探

测器工作台的传动机构, 波长选择机构在测试中产生的回程差、爬坡现象等传动误差最终影响了逆散射法计算表面粗糙度的精确度。

(2) 在建模和计算过程中, 由于建立逆散射模型作了一些假设和近似, 难免会带来计算误差。

(3) 在散射测试中还存在一些人为误差, 如光路调整、样品台调整、探测器的初始位置确定等。

4 结束语

实验证明, 通过对掠入射软X射线表面散射的测量, 能直观地反应出光学表面形貌特征。应用自行研制的反射率测量装置测得数据, 利用软X射线掠入射光学散射法, 能较为精确地计算出光滑表面粗糙度和表面自相关函数, 所测结果与WYKO的结果接近。

参考文献:

- [1] WANG Ming-jun, DONG Yan-bin, WU Zhen-shen, et al. Research on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction[J]. Infrared and Laser Engineering(王明军, 董雁冰, 吴振森, 等. 粗糙表面光散射特性研究与光学常数反演. 红外与激光工程), 2004, 33(5): 549-552.
- [2] LU Yuan, SHI Jia-ming, LING Yong-shun, et al. Research on infrared passive location[J]. Infrared and Laser Engineering(路远, 时家明, 凌永顺, 等. 红外被动定位研究. 红外与激光工程), 2001, 30(6): 406-409.
- [3] WANG Ri, XU Yu-bin, SUN Bao-ju, et al. Study of simulation algorithm on target detection by laser[J]. Infrared and Laser Engineering(王日, 徐玉滨, 孙宝举, 等. 激光探测目标仿真算法研究. 红外与激光工程), 1999, 28(3): 55-58.
- [4] HARVEY J E, THOMPSON P L, VERNOLD C L. Understanding surface scatter effects in grazing incidence X-Ray telescopes[C]// Proceedings of SPIE, X-Ray Optics, Instruments and Missions, 1998, 3444: 518-525.
- [5] HARVEY J E, LEWOTSKY K L, KOTHA A. Effects of surface scatter on the optical performance of X-ray synchrotron beam-line mirrors[J]. Applied Optics, 1995, 34(16): 3024-3032.
- [6] HARVEY J E, MORAN E C, ZMEK W P. Transfer function characterization of grazing incidence optical systems[J]. Appl Opt, 1998, 27: 1527-1533.
- [7] HARVEY J E. Transfer function characterization of scattering surfaces[J]. J Opt Soc Am, 1976, 66: 1136.

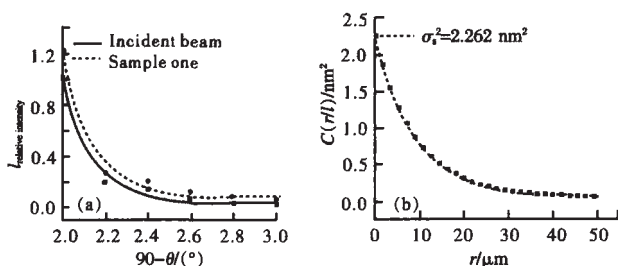


图2 由样品1散射测量得到的表面自相关函数

Fig.2 Surface autocorrelation function for sample one predicted from scattered light measurements

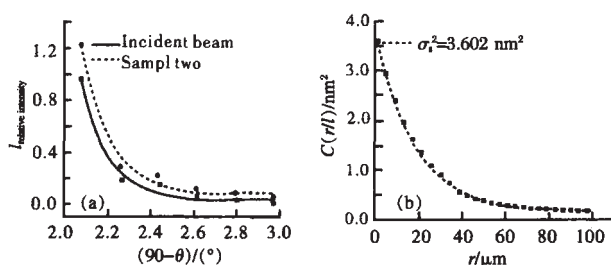


图3 由样品2散射测量得到的表面自相关函数

Fig.3 Surface autocorrelation function for sample two predicted from scattered light measurements

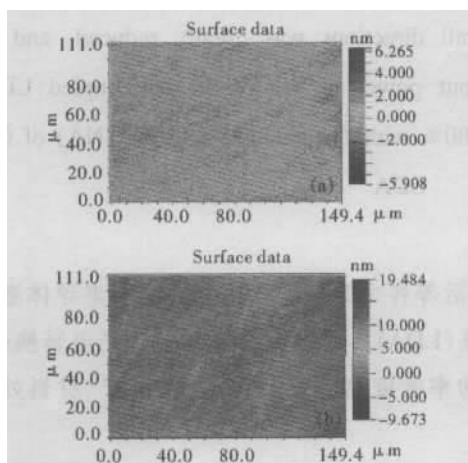


图4 WYKO测得的表面微粗糙度

Fig.4 Surface micro-roughness measured by WYKO