

## 一种测量光学表面粗糙度的全积分散射仪

张贵彦<sup>1,2</sup>, 袁宏韬<sup>1,2</sup>, 缪同群<sup>1</sup>

(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 100049)

**摘要:** 运用全积分散射理论, 结合积分球的光度特性, 研制了一种用于粗糙度测量的比较法全积分散射仪。用原子力显微镜分析了用相同的抛光工艺制备的三片超光滑硅片的表面粗糙度, 其结果均在 0.14~0.19 nm 之间, 说明了此抛光工艺的稳定性; 用原子力显微镜测量值为 0.143 nm 均方根粗糙度的超光滑硅片作为参考样片, 比较了其他三片相同工艺制备的硅表面的全积分散射测量结果, 结果显示与标准片的测量结果非常接近, 均在 0.14~0.18 nm 之间, 验证了全积分散射法的合理性; 进一步分析了锗、铝、碳化硅等表面的全积分散射测量结果, 结果呈现出明显的差异, 说明该方法具有较高的灵敏度和较大的动态范围。

**关键词:** 全积分散射; 积分球; 均方根粗糙度; 超光滑

**中图分类号:** TN247      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2007)增(激光)0265-05

## Total integrated scatterometer for the application in optical surface roughness measurement

ZhANG Gui-yan<sup>1,2</sup>, YUAN Hong-tao<sup>1,2</sup>, MIAO Tong-qun<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2.Graduate school of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on Total Integrated Scattering(TIS) theory and the photometric characteristics of the integrating sphere, a total integrated scatterometer by comparison method for the application in optical surface roughness measurement was established. Measurement results of three polished silicon surfaces with the same process by AFM are analyzed and the root-mean-square roughness values are very close within the range of 0.14~0.19 nm, which shows the stability of the polishing process. Three other silicon surfaces with the same polishing process were measured by TIS method and the results were compared with that of the Si#1 sample by AFM calibrated. The close data within 0.14~0.18 nm were obtained which indicate the validity of the TIS method. Several pieces of germanium, aluminum mirror and silicon carbide were also measured by TIS method and obvious differences appear among their roughness values, which shows the high sensitivity and high dynamic range of the scatterometer.

**Key words:** Total integrated scattering; Integrating sphere; Root-mean-square roughness; Super-smooth

收稿日期: 2007-04-23

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2003AA311050)

作者简介: 张贵彦(1978-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事光学检测的研究。Email:guiqueena@yahoo.com.cn

## 0 引言

表面粗糙度是衡量光学表面的一个重要指标,它反应了物体表面的微观几何形状误差。而散射与表面粗糙度有着直接的联系。一般,粗糙度越大,带来的表面散射损耗就越大。在研制高性能的激光陀螺仪时<sup>[1]</sup>,要求环形腔中的高反射镜片具有很低的散射损耗,因为激光腔各元件产生的背向散射是导致其出现闭锁的主要原因,而要获得高质量的低损耗膜层就要严格控制基底表面的粗糙度;在光通讯领域,为了获得高质量 DWDM 滤光片,要求基片为超光滑表面;在短波光学域<sup>[2]</sup>,表面粗糙度引起的散射更是不容忽视。表面粗糙度尤其是超光滑表面粗糙度的测量显得越发重要。

目前,光学表面粗糙度的测量方法主要有:探针法、干涉法、扫描电子显微镜法和散射仪法等,而散射法中的全积分散射法<sup>[3-4]</sup>具有高灵敏度,快速,不损伤表面等特点而受到关注。以下主要介绍全积分散射的原理和实验装置,并对几种光学表面的实际测量结果进行了比较分析。

## 1 基本原理

### 1.1 随机表面的统计描述

随机表面通常可以用统计量来描述。设二维随机表面的位置函数为  $z(x,y)$ ,则可以用下面三个统计量来表征表面:

- (1) 表面的平均高度  $\mu$ ,  $\mu = \langle z(x,y) \rangle$ ;
- (2) 均方根高度  $\sigma$ ,代表表面高度起伏相对于平

均值的偏离程度:  $\sigma = \sqrt{\langle (z(x,y) - \mu)^2 \rangle}$ ,属于纵向评定参数。

(3) 横向相关长  $T$ ,表示表面上起伏的疏密程度,是一种横向评定参数。

其中均方根粗糙度与光学表面散射密切相关,是本文研究的内容。

### 1.2 全积分散射理论

根据 Rayleigh-Rice 矢量微扰理论<sup>[5-9]</sup>, 每单位入射光功率产生的散射光功率密度与表面功率谱密度函数之间具有如下关系:

$$\frac{(dP/d\Omega_s)d\Omega_s}{P_i} = \left(\frac{16\pi^2}{\lambda^4}\right) \cos\theta_i \cos^2\theta_s \quad (1)$$

$$QS(f_x, f_y)d\Omega_s$$

式中:  $f_x = \frac{\sin\theta_s \cos\phi_s - \sin\theta_i}{\lambda}$ ;  $f_y = \frac{\sin\theta_s \sin\phi_s}{\lambda}$ ;  
 $\theta_i$  为入射角;  $\theta_s$  为散射角;  $S(f_x, f_y)$  为表面功率谱密度;  $(dP/d\Omega_s)d\Omega_s/P_i$  为每单位入射光功率在  $s$  方向(由  $\theta_s$  和  $\phi_s$  确定)  $d\Omega_s$  立体角内产生的散射光功率;  $Q$  为反射偏振系数,表示材料特性对反射光的作用;它是材料复介电常数,入射角及散射角的函数,根据入射和散射偏振状态的不同有不同的表达式。很多情况下它可以近似为样品表面的反射率。

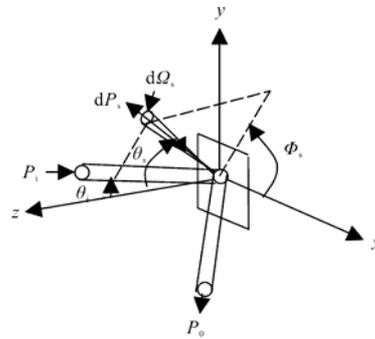


图 1 表面散射原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the surface scattering

公式(1)表明  $s$  方向归一化散射光功率与表面功率谱密度成正比。公式(1)适用于洁净,光滑的前表面反射样品。这里的光滑指表面高度起伏要远远小于波长,即  $\sigma \ll \lambda$ 。全积分散射(TIS)定义为散射功率  $P_s$  与镜面反射功率  $P_0$  之比:

$$TIS = \frac{P_s}{P_0} = \int_0^{2\pi} \int_{\theta_{min}}^{\pi/2} \frac{d_p d\Omega_s}{RP_i} d\Omega$$

根据公式(1),并且  $R = Q$ , 有:

$$TIS = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int \cos\theta_i \cos\theta_s S(f_x, f_y) d f_x d f_y$$

根据均方根粗糙度与表面功率谱密度的关系:

$$\sigma^2 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int S(f_x, f_y) d f_x d f_y, \text{ 得到:}$$

$$TIS = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int \cos\theta_i \cos\theta_s S(f_x, f_y) d_{f_x} d_{f_y} \approx \left(\frac{4\pi\sigma \cos\theta_i}{\lambda}\right)^2$$

$$\sigma = \frac{\lambda\sqrt{TIS}}{4\pi \cos\theta_i} \tag{2}$$

公式(2)即为全积分散射法测量光学表面粗糙度的基本公式。在特定的波长和入射角下,均方根粗糙度 $\sigma$ 与 $(TIS)^{1/2}$ 成正比。只要测出  $TIS$  就可以得到表面的粗糙度。

积分球具有收集散射光的功能,可以用来实现全积分散射测量。积分球的光传输特性可以用  $\phi_i = \eta\phi_0$  描述<sup>[10]</sup>, 其中 $\phi_0$  为入射到积分球内的总光能量,  $\phi_i$  为某开口处出射的光能量,  $\eta$ 为积分球的传输效率,与积分球的几何结构、开口设置、积分球内表面的反射率等因素有关。测得开口处的光能量就可以得到进入积分球的总能量。以下给出利用积分球实现粗糙度测量的积分散射仪的系统结构及工作原理。

## 2 仪器结构及工作原理

仪器结构如图2所示,积分球设计成 $8^\circ$ 角入射,即公式(2)中的 $\theta_i$ 为 $8^\circ$ 。积分球采用参考样板口与

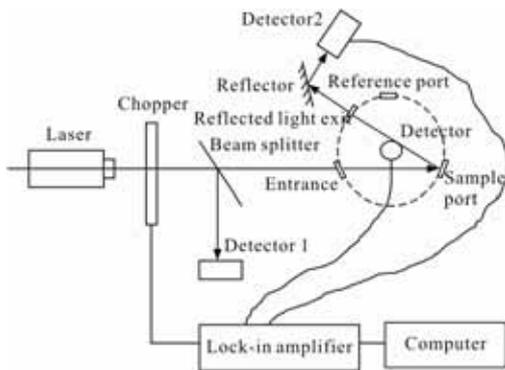


图2 全积分散射测量仪系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the total integrated scatterometer

样品口独立设置的比较测量方法以保证两次测量中积分球的传输效率尽量一致。从 532 nm 激光器发出的准直光束经调制盘调制后射到分光镜上,反射光由

探测器 1 接收作为参考信号监控光源的波动,透射光经积分球的入光口入射到置于样品口的样片表面,被样品表面反射后,镜面反射光从反射光出口出射并经一反射镜折转光路后被探测器 2 接收,其他偏离镜面反射的散射光被积分球收集后由探测器 3 接收。探测器出来的信号与调制后的参考信号均接到锁相放大器后由计算机采集显示。

主要测量步骤:在样品口放置待测的样品,参口样板口放置相应的参考板,记录此时探测器 1, 2, 3 的读数  $v_1, v_2, v_3$ , 将样品与参考板交换位置,记录探测器 1, 3 的读数  $v_4, v_5$ 。所有数据均用计算机采集显示出来,考虑到光源的波动性,根据记录的数据按照:

$$v = \sqrt{\frac{v_3/v_1 \cdot 1}{v_5/v_4 \cdot v_2/v_1}} \tag{3}$$

由公式(2)计算得到  $v$  值,而  $v$  与  $TIS$  有以下关系:

$$\sqrt{TIS} = k_1 v \tag{4}$$

$$\sigma = \frac{\lambda\sqrt{TIS}}{4\pi \cos\theta_i} = \frac{\lambda k_1 v}{4\pi \cos\theta_i} = kv \tag{5}$$

式中: $k$  为待定标的比例系数,与各探测器的前置放大器的倍数,分束镜的反光比,反射镜的反射比,波长,入射角等有关,是一个比较复杂的常数。但当系统调试完毕后,这个系数在每次测量中是固定不变的。所以得到  $v$  值就得到了粗糙度的相对值。

目前我们没有对系统中所涉及到的与  $k$  有关的各个因素进行相应的定标测试,这种定标工作非常烦琐。很多情况下,能够对不同被测样品之间进行比较测量就可满足要求。应用自己抛光制作的超光滑硅片作为相应的标准样品,其他样品的测量结果与之进行比较,即可得到相应的粗糙度值。从透射光谱看,硅片在 532 nm 处被截止,这就消除了后表面散射的影响,保证了所测的结果反应的是前表面的粗糙程度。虽然由于各种测量仪器所测量的频谱范围有所不同,对于同样的样品不同的仪器测量出来的结果有所不同,但最后所得到的粗糙度值的趋势是相同的,所以实际测量中可以采用这种相对测量的方法来获得需要的数据。

### 3 实验结果及分析

表 1 为三个抛光硅片的原子力显微镜测量结果。三个硅片是用同一种抛光工艺得到的,每个硅片表面用原子力显微镜测五个不同的位置,得到的结果比较接近,其均方根粗糙度的平均值均在 0.14~0.19 nm 之间,说明相应的抛光工艺是比较稳定的。

**表1 三个抛光硅片表面粗糙度原子力显微镜测量结果 /nm**

**Tab.1 AFM measurement results for three polished silicon surfaces /nm**

Position	1	2	3	4	5	Average alue
Si#1	0.141	0.142	0.144	0.142	0.146	0.143
Si#2	0.171	0.185	0.18	0.192	0.189	0.183
Si#3	0.149	0.144	0.139	0.147	0.15	0.145

选用粗糙度为 0.143 nm 的 Si#1 作为粗糙度标准片,其他样品的测量结果与之进行比较,结果如表 2 所示。其中的  $\nu$  为根据公式(3)得到的结果, $\sigma$ 为用 Si#1 作为粗糙度标准片时得到的粗糙度值。

**表2 几种光学表面与Si#1的全积分散射粗糙度测量结果比较**

**Tab.2 Comparison of surface roughness measurement results of several materials by TIS method with that of Si#1**

Sample	Si#1	Si#4	Si#5	Si#6	Ge#1	Ge#2
$\nu$	0.160 3	0.177 1	0.190 3	0.185 2	1.519 6	1.512 2
$\sigma/\text{angstrom}$	1.43	1.58	1.70	1.65	13.56	13.49
Sample	Ge#3	Al#1	Al#2	Al#3	Al#4	ZnS
$\nu$	1.506 1	3.799 9	3.746 2	3.776 9	3.782 5	19.110 3
$\sigma/\text{angstrom}$	13.44	33.90	33.42	33.69	33.74	170.48

三种材料的测试结果呈现出明显的差异:采用与 Si#1, Si#2, Si#3 相同的抛光工艺制作的另外三片硅(Si#4, Si#5, Si#6)的表面粗糙度与标准片 Si#1 非常接近,其  $\nu$  值均在 0.16~0.20 之间。以 Si#1 的原子力测量结果 0.143 nm 作为标准,则其粗糙度均在 0.14~0.18 nm 之间,进一步说明了该方法的合理性;三片锗(Ge#1, Ge#2, Ge#3)的  $\nu$  值均在 1.50~1.52 之

间,相应的表面粗糙度在 13~14 nm 之间,与硅大约相差一个数量级;而四片铝反射镜(Al#1, Al#2, Al#3, Al#4)的  $\nu$  值在 3.7~3.8 之间,表面粗糙度在 3.3~3.4 nm 之间,约为锗的 2.5 倍;SiC 为压制烧结材料,结构比较疏松,其测量结果明显比前几种材料要大得多,为 17 nm 左右。从超光滑硅表面到相对比较粗糙的 SiC,该系统的测量结果表现出了明显的差异,说明了该系统具有较高的灵敏度和较大的动态范围。初步估计,该系统的相对测量精度在 $\pm 15\%$ 以内,详细的分析还需进一步深入。该方法具有快速无损测量的优点,平均五分钟左右就可以完成一组数据的测量,有利于满足实际生产的需要,实现在线检测。

除了以上不透光材料,本系统还可以用来测量玻璃,晶体等表面粗糙度,但要采用一定的方法消除背面散射,比如在玻璃表面镀一层金属膜,或者采用折射率匹配的方法。这将在以后的文章中进一步分析。

### 4 结 论

根据全积分散射测量光学表面粗糙度的基本原理,研制了一种用于光学表面粗糙度测量的全积分散射装置,并用该系统对硅超光滑光学表面的粗糙度进行了测量分析,通过与原子力显微镜的测量结果进行比较,验证了此方法的合理性。并进一步分析了锗、铝反射镜及硫化锌表面的粗糙度,其结果表现出了明显的差异,说明此系统测量范围可以从超光滑表面到一般的较为粗糙的光学表面,具有较高的灵敏度和较大的动态范围。初步估计该方法的测量精度在 $\pm 15\%$ 以内,详细的精度分析还需进一步展开。

该方法具有快速,高灵敏度,无损的特点,可以为实际生产提供测量手段,为加工工艺的改进提供指导。用该系统测量透明材料表面时,需要采取一些必要的方法来消除降低后表面散射和体散射的影响,比如镀金属膜的方法,采用匹配液的方法等。另一方面,此方法对环境杂光比较敏感,测量需在较暗洁净度较高的环境下进行;被测样品表面在测量之前需要进行比较好的清洁,否则表面残留污染会带来较大的测量误差。

### 参考文献:

- [1] KONG Xiang-gui, FENG Tie-sun, JIN Guo-fan. The effect of retroscattering of cavity mirrors on the lock-in of ring laser

- gyroscope[J]. Applied Laser(孔祥贵,冯铁菝,金国藩.腔反射镜的反向散射模型以及对激光陀螺闭锁阈值的影响.应用激光), 1979,9(3):97-99.
- [2] Windt D L, Waskiewicz W K, Griffith J E. Surface finish requirements for soft x-ray mirrors[J]. Applied Optics, 1994, 33(10):2025-2031.
- [3] John A Detrio,Susan M Miner. Standardized total integrated scatter measurements of optical surfaces[J].Optical Engineering, 1985, 24(3):419-422.
- [4] ISO 13696. Optics and optical instruments-test methods for radiation scattered by optical components[S]. 2002.
- [5] Lord Rayleigh, Pres R S. On the dynamical theory of gratings[J]. Proc R Soc,1907,79(532):399-416.
- [6] Rice S O. Reflection of electromagnetic waves from slightly roughness surfaces[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1951,(4):351-378.
- [7] John C Stover. Optical scattering: measurement and analysis[M]. New York :McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [8] Davies H. Reflection of electromagnetic waves from slightly rough surfaces[J]. Pro Inst Elec Engrs,1954,101:209-214.
- [9] Church E L, Zavada J M. Residual surface roughness of diamond-turned optics[J].Applied Optics, 1975,14(8):1788-1795.
- [10] David G Goebel. Generalized integrating sphere theory[J].Applied Optics,1967,6(1):125-128.