

# 测量最佳平表面粗糙度的仪器

**摘要** 制造了测量来自一个标准的和一个检验的反射镜的散射光大小的仪器，并且进行了试验。虽然仪器的数据处理依赖于高斯理论，但我们用非高斯表面也获得了好的结果，这篇报告描述了仪器，它的理论和试验结果。

## 引言

我们制造了测量散射光的仪器，它的原理是依赖于已知粗糙度的参考表面与检验表面的比较，并对这台仪器进行了试验。该仪器设有样品夹持架，其上可以安装两块反射镜，并可移动夹持架进入光束。一个1毫瓦的氦氖激光束以与垂直方向成 $5^\circ$ 角的方向直接射入反射镜，光在反射镜上以 $8^\circ$ 圆锥方向散射，并由光电倍增管收集测量。以与垂直方向成逆 $75^\circ$ 的方向扫描过圆锥中心，以获得散射光的角度分布。入射和单向反射光的附加测量由一光电晶体管电路来完成，这些是对一标准和一检验反射镜的测量。应用高斯统计学计算粗糙表面散射的简化公式以算出检验反射镜的均方根粗糙度。

## 系统的描述

图一是测量仪器的系统图。在反射和入射测量电路中透镜和毛玻璃屏用来否定在标准和检验反射镜表面之间由于缺乏精确平行而造成的测量偏差。在反射方向上稍微的偏差可以引起光电晶体管光能量的稍许变化，因为(1)即使入射方向发生变化，透镜几乎仍然聚焦在第一块毛玻璃屏上同一点。

(2) 尽管入射光方向发生小的变化，但二块毛玻璃屏散射的光仍然是均匀的。

入射和反射光测量电路如图2所示。它的光电晶体管联到LM301-AN集成电路工作放大器上。这个探测器的灵敏度

是0.4毫安/毫瓦/厘米<sup>2</sup>，因此，1%的强度变化是容易测量的。

散射光测量电路如图3所示，一个EMI 9-658 R光电倍增管与Philbrick Nekus 140802工作放大器插到管座，可以为这种测量提供充足的灵敏度。在高的SNR情况下，为使这管工作800伏的电压是足够高的。

因为该仪器并不测量绝对值，采用测量散射光/入射光的比值，这就必需除法运算。要完成这样冗长的运算是很麻烦的，因而使用了模拟除法器(Philbrick Q3-MIP乘法—除法器)来计算二者输出的比值，比值以散射角的函数记录在条带式记录器上。

## 分析

这种理论是依据于具备高斯统计理论的粗糙表面散射方程式，这种理论也是建立这种仪器的理论，方程式即：

$$\omega(\theta) = \frac{I(\theta)}{I(\theta_0)} = 2\pi^4 \frac{\alpha^2 \sigma^2}{\lambda^4} (\cos\theta + 1)^4 \sin\theta \exp\left[-\left(\frac{\pi\alpha \sin\theta}{\lambda}\right)^2\right] \exp\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2 \quad (1)$$

式中： $I(\theta)$  = 在 $\theta$ 角的辐射

$I(\theta_0)$  = 单面反射的辐射

$\alpha$  = 表面自相关协方差长度

$\sigma$  = 表面粗糙度的均方根值

$\lambda$  = 波长

在我们的仪器中应用下式的比值

$$\Omega_n(\theta) = \frac{\omega_n(\theta)}{\omega_s(\theta)} = \left( \frac{\alpha_n \sigma_n}{\alpha_s \sigma_s} \right)^2 \exp \left[ - \left( \frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 (\sigma_n^2 - \sigma_s^2) \right] \exp \left[ - \left( \frac{\pi \sin \theta}{\lambda} \right) (\alpha_n^2 - \alpha_s^2) \right] \quad (2)$$

式中，下角n为检验表面，s为标准表面，设  $\alpha_n \cong \alpha_s$ ， $\sigma/\lambda \ll 1$  时得到下面方程式

$$\Omega_n(\theta) \cong (\sigma_n/\sigma_s)^2 \quad (3)$$

虽然这种假设是随意的，但我们发现与其它方法的测量结果十分符合。理想上，如方程(3)所示， $\Omega_n(\theta)$ 与角度无关，但实际上并非如此，我们测量的检验表面指出并不具有高斯统计，为了解决这一问题我们测量了许多角度的  $\Omega_n(\theta)$  并获得了平均值，即：

$$\bar{\Omega}_n = \sum_{i=1}^N \frac{\Omega_n(\theta_i)}{N} \quad (4)$$

这样我们获得到  $\sigma_n$  的解，

$$\sigma_n = (\bar{\Omega}_n)^{1/2} \sigma_s \quad (5)$$

在这个仪器中我们实际上并没测量  $\omega(\theta)$ ，而是

$$\int_{\theta} \omega(\theta) d\theta$$

这里  $\theta$  正常是  $8^\circ$ ，我们选择间隔  $\theta_i$  为  $5^\circ$ ，这种样片测量法已经与绝对总散射光测量仪器（在China Lake由H. E. Bennett）和FELO干涉仪（由J. Bennett）测量结果进行了比较。

因为我们仪器测量的角度是依赖于散射光，所以能获得比均方根表面粗糙度更多的数据，例如，我们能关闭光电倍增管的接收角，这样获得了  $\omega(\theta)$  的真实测量。用这种仪器测量了铜反射镜，在散射光曲线中见到了规则的峰值，这个峰值与表面的周期性有关，这个周期表面的散射理论说明散射光首先进入由下列方程规定的方向。

$$\sin \theta_{2m} = \sin \theta_1 + m\lambda/\Lambda \quad (6)$$

式中  $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ ，

$\theta_1 =$  入射角

$\Lambda =$  周期性的波长

进入这个方向光辐射强度通过周期分布图来测定，这个理论由 Beckmann 和 Spizzichino 来描述，在这里将不再进一步推敲。

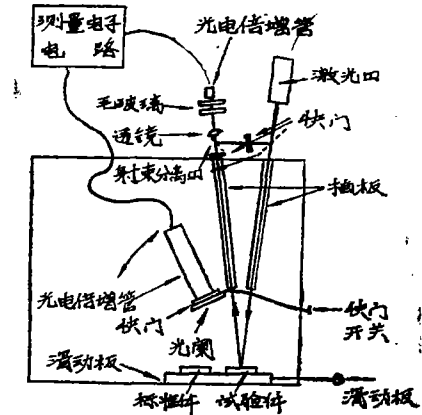


图1 仪器简图

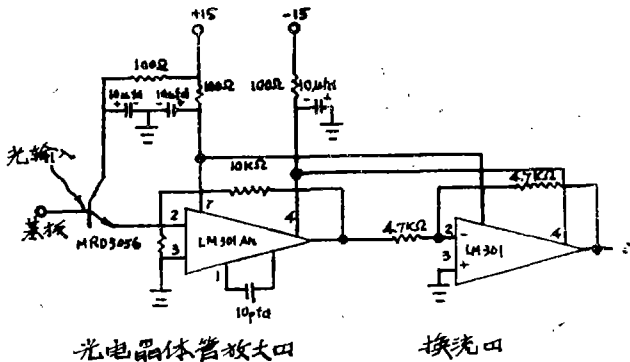


图2 反射光测量系统电路图

# 试 验

按计划制造了这个仪器，目的是为了评价为高能CO<sub>2</sub>激光器用的反射镜材料的溅射铜。样片是在OFHC铜毛坯上通过溅射沉积的方法形成一个1/3毫米厚的弥散硬铜层。这个表面然后研磨好并最后用Politex D抛光布和India油墨抛光好。

参考反射镜是石英材料的，采用真空铝层保证10 Å均方根值粗糙度。这块反射镜是由China Lake的Michelson实验室H.E. Bennete供给的。在绝对散射仪上测量了它的粗糙度。

使用石英参考反射镜测量其它材料的散射由方程(1)和(2)证明是恰当的，并知道散射与反射率无关。因为我们测量的是辐射而不是振幅，于是反射时相位变化的差就被否定了，参考与检验样片的不同偏振特性理论上对测量结果有影响，但我们并没观察到任何这种影响。

图4—6是处理过的典型的散射数据图，使用该仪器凭经验形成下述标准程序。首先，每个样片的表面用参考标记分割成90°，使光电倍增管固定在 $\theta = 25^\circ$ 沿着随意选择的轴进行水平扫描，在入射光束下用手滑动样

片，其距离恰好等于样片宽度，这样选择一个产生最小散射的位置，然后以5°步进方式移动光电倍增管通过 $20^\circ < \theta < 75^\circ$ 范围并把数据记录下来。这样产生的样片数据相当于从一个标准的最小25°散射的位置获得的样片数据，获得这些数据的位置在图形上示出。

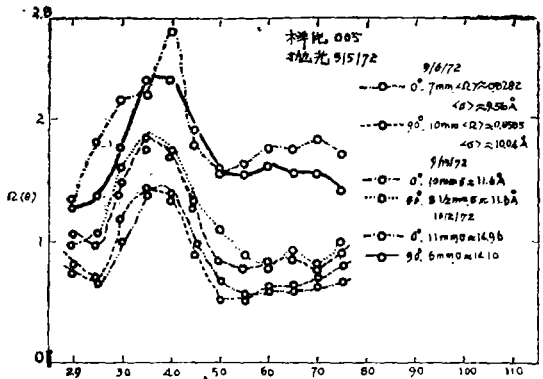


图4 样片005用8°角度孔径记录的散射数据

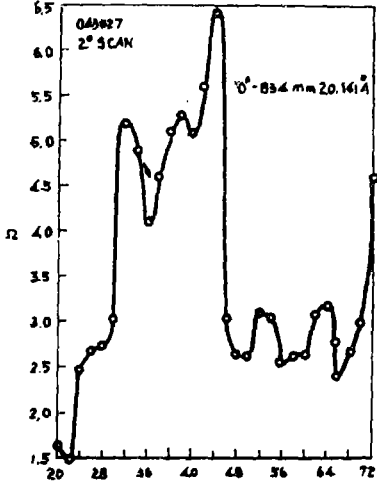


图5 样片043—27用2°角度孔径测量的散射数据

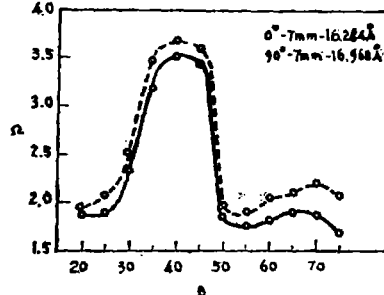


图6 样片043—27采用8°角度孔径测得的散射数据

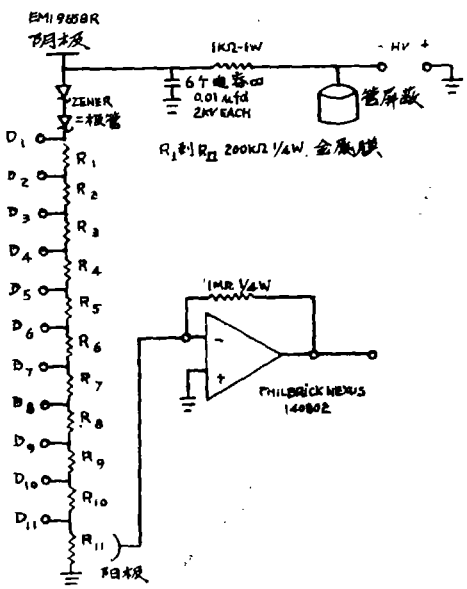


图3 散射光测量系统电路图

图4所示是从1972.9.6~1972.10.2期间在样片005上所获得的散射数据,在这段时间内样片存储在非真空的dessicator瓶内,在此期间内样片表面粗糙度(均方根值)从10 Å到15 Å,这是典型的最平滑的表面产生的,这在Nomaski微分干涉对比图形上能够测出来,但在那时对于表面污染的本性和下降的详细机理是不知道的。有时候在Ivory清洁剂和冷水中洗涤可以恢复最初的表面平度,但我们还应当获得更多的经验来确定可恢复和不可恢复的表面下降的本质和原因。

这样的样片被送到在China Lake Michelson实验室的H.E.Bennete,并在他的总散射光测量仪上进行了测量,其绝对测量值与在我们仪器上测量的一致度在3 Å之内(均方值高度)。

因为如图4所示表面粗糙度是随存储时间而增长的,所以详细比较结果是困难的,测量是分别在二个实验室一周之内完成的,散射数据之间符合程度是在1 Å以内,在测量的时期内由于时间的增长测量的差异就增大,这种情况可由最近的样片变化说明。在1973年4月23日测得样片044 30和044 32的粗糙度分别是15 Å和17 Å,在5月17日 Michlson

实验室对二个样片测量,结果是27 Å,然后用Feco测量结果分别是24 Å和21 Å。在5月25日,用我们的仪器测量,结果分别是24 Å和21 Å。虽然结果并不完全一致,但通过这种简单的方法,结果获得了在均方根粗糙度数值方面要求高可靠性的地方是允许的。

图5所示的曲线是角度孔径减小到2°的情况,注意,在数据中的多重峰,这些峰值最好的符合于方程(6),我们推演这个表面存在一个 $8.7 \pm 0.25$ 微米基本周期性。为了比较,在图6我们示出了用8°验收孔径扫描的同一样片,图示说明了早期讨论的平均结果。

## 结 论

我们这里讨论了一个简单的用于测量粗糙度20 Å或少些的散射光仪器。它的原理是依据于样片表面和标准表面光散射的比值,测量的结果与在China Lake绝对值测量仪上测得的结果极好的符合,通过修改可以成为一台比用其它标准方法测量数据更好的仪器。例如,详细的角度分布能用于估算表面不规则的周期性和方向性。

译自 App.Optics Vol 13. No1. 1974.1 p177

(扬志中译 于和平校)

(上接第52页)

二块方解石立方晶体,一厘米的在一边,采用XR-63-488弹性胶胶合(胶层厚约0.05毫米)并使它的轴垂直。另一立方体采用同样的弹性胶,胶合到铝块上,这个组件在温度-30°C和+50°C之间大约以5°C/分钟速率经受八个热周期没有发现晶体破裂及脱胶现象。三元件对称的Wollaston棱镜一边的尺寸为1厘米用D.C 93-500胶合装配起来,并用D.C93-500胶合在铝内腔两边。它经受了类似的热冲击周期,后来这个组件采用随机振动,正弦波谱直到200赫兹并加速到100g没有发现破裂或脱胶。

上面所述只有一个例子,D.C 93-500在温度90°C和 $10^{-6}$ 真空情况下,二天后没

有明显逸气,其它损耗是它重量的1%。

这样一来,D.C93-500对于所述特殊任务来说是最好的材料。然而,其它的某些试验也是适于光胶用途的,在那里并没有涉及逸气问题或仅有小面积暴露在真空中。

硅弹性胶的缺点是在作为光学胶合剂时它的折射系数显得低些(对绿光是1.43),同时附着强度也差。但低的附着强度并不是一个主要问题,因为对于重物的支撑问题并不要求。薄层胶合的附着力也是足够大的,例如:用手就不能容易地把二块胶合的透镜分开。

译自 App.Optics Vol 9. No11.

1970. 11. p2581.

(杨志中译 叶铁树校)