

# 用激光散斑相关方法实时测量表面粗糙度

郑月明 王 策 凌德洪  
(苏州大学激光研究室)

## 提 要

本文提出一种实时测量表面粗糙度的结构简单、光路调节方便的实验系统。用双棱镜产生的两束不同方向的平面波同时照射粗糙表面,从散射光场的相关度得到表面粗糙度。结果表明,选择较小的棱镜角和入射角,可使粗糙度的测量范围达 $1\mu\text{m}\sim 40\mu\text{m}$ ;实验结果与泰勒雪夫-5型粗糙度检查仪的测试值符合得较好。

## 一、引 言

相干光从粗糙表面反射时,在空间会形成散斑,已有许多学者对散斑统计性质进行了研究,指出散斑统计性质与表面粗糙度有关,因而提出了几种表面粗糙度的测量方法<sup>[1~5]</sup>。本文的工作是在激光散斑相关测量表面粗糙度的理论上,对 Léger<sup>[5]</sup>所提出的测量手段及实验光路进行简化。实验采用一只双棱镜来产生两束不同方向的平面波,并选择较小的棱镜角和入射角,不用任何补偿系统,光路简单、调节方便,而且粗糙度测量范围较大,达到 $1\mu\text{m}\sim 40\mu\text{m}$ ,对比较粗糙的表面,特别是粗糙度大于光波长的表面也能方便地进行测量。最后,实验对光洁度标准样块进行了粗糙度测量,测试结果与泰勒雪夫-5型粗糙度检查仪给出的粗糙度值符合得较好。

## 二、原 理

实验原理如图1所示。当粗糙表面 $S$ 被入射角为 $\theta_1$ 、 $\theta_1+\delta\theta_1$ 的两束相干平面波同时照明时,遵照 Léger<sup>[5]</sup>的理论分析可知,粗糙表面散射的光场分布之间的相关性质与光波入射角 $\theta_1$ 、 $\theta_1+\delta\theta_1$ 及粗糙表面的标准偏差 $\sigma$ 有关。用迈克尔逊干涉仪来研究散射场的相关性质,当干涉仪调节到 $\delta\theta_2$ 满足

$$\delta\theta_2 = \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \cdot \delta\theta_1 \quad (1)$$

时,能使在 $\theta_2$ 、 $\theta_2+\delta\theta_2$ 两个方向散射的场分布进入干涉状态。两个场满足一定程度相关时,在干涉仪后焦面将出现干涉条纹。条纹对比度为

$$V = \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\sin(\theta_1+\theta_2)}{\cos\theta_2} \sigma \delta\theta_1\right)^2\right], \quad (2)$$

当 $\theta_1=\theta_2$ ,则

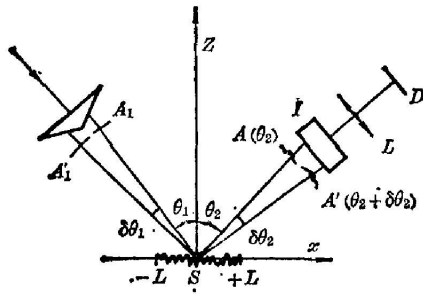


图 1 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of principle

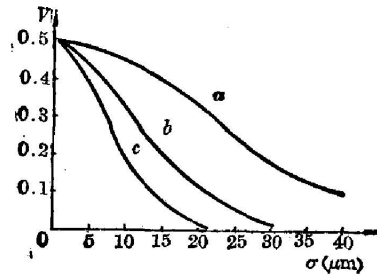


图 2 V-σ 曲线

Fig. 2 V-σ curves

$$V = \frac{1}{2} \exp \left[ -2 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \sigma \sin \theta_1 \delta \theta_1 \right)^2 \right] \quad (3)$$

图 2 给出了对比度  $V$  在  $\theta_1$  和  $\delta\theta_1$  不变的情况下随粗糙度  $\sigma$  的变化规律。曲线  $a$  中  $\theta_1 = \theta_2 = 15^\circ$ ,  $\delta\theta_1 = \delta\theta_2 = 30'$ ; 曲线  $b$  中  $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ ,  $\delta\theta_1 = \delta\theta_2 = 30'$ ; 曲线  $c$  中  $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ ,  $\delta\theta_1 = \delta\theta_2 = 30'$ 。从  $V-\sigma$  曲线可知, 在其它条件不变的情况下, 要扩大粗糙度测量范围必须减小光波的入射角。取  $\theta_1 = 15^\circ$ , 测量范围可达  $1 \mu\text{m} \sim 40 \mu\text{m}$ 。

### 三、实验装置及结果

测量表面粗糙度的实验光路如图 3 所示。

功率为  $6 \text{ mW}$  的氦氖激光器产生的光束通过扩束准直后经过双棱镜  $P$  分成两束夹角为  $30'$  的平面波同时照射粗糙表面  $S$ 。透镜  $L_2, L_3$  组成远焦系统, 粗糙表面  $S$  成像于  $L_3$  的后焦面上。由迈克尔逊干涉仪来研究散射光。平面镜  $M_1, M_2$  设置在  $L_3$  的后焦面上, 调节  $M_1$  或  $M_2$ , 则在透镜  $L_4$  的后焦面上可观察到任意两个不同散射方向散射的光场干涉结果。当调节到  $\delta\theta_2$  满足关系式(1)时, 出现的干涉条纹处于最佳状态。干涉条纹的对比度最大值不超过 0.5, 在其它条件不变时, 对比度随表面粗糙度的增加而减小。

本实验采用固定两束入射光夹角  $\delta\theta_1$  的方法, 同时使散射光在镜面反射方向被接收, 即  $\theta_1 = \theta_2$ 。这样调节迈克尔逊干涉仪的  $M_1$  或  $M_2$ , 使  $\delta\theta_2 = \delta\theta_1$ , 对比度处于最佳状态。通过测量干涉条纹对比度, 利用公式(3)求得表面粗糙度参数  $\sigma$ 。

对比度测量是将光电倍增管中输出的电信号经光子计数器显示强度, 用函数记录仪所

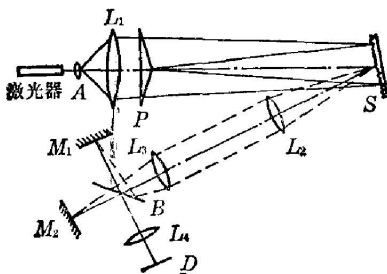


图 3 实验光路

Fig. 3 Experimental set-up

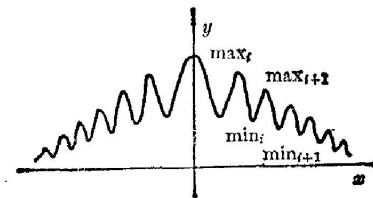


图 4 信号对比度曲线

Fig. 4 Curve of signal visibility

记录下的条纹对比度曲线(如图4所示)。对比度的数据处理采用下面的计算公式:

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{y_{\max_i} - y_{\min_i}}{y_{\max_i} + y_{\min_i}}$$

在本实验中,取  $N=10$ ,在  $y$  轴左右各取五个峰谷值。

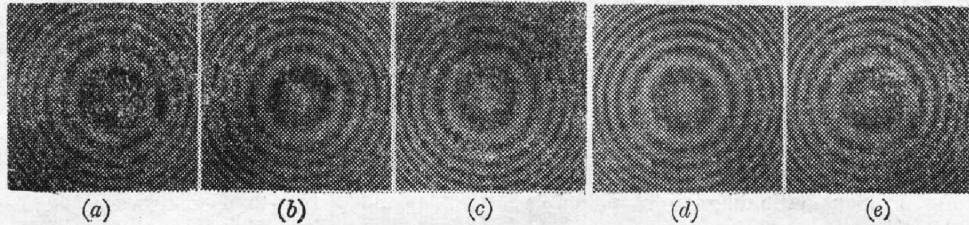


图5 干涉条纹照片

Fig. 5 Photograph showing interference fringes

表1  $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ, \delta\theta_1 = 30'$  时的实验数据

Table 1 Experimental data for  $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ, \delta\theta_1 = 30'$

光洁度样板		$\nabla 7$	$\nabla 6$	$\nabla 5$	$\nabla 4$	$\nabla 3$
$R_q (\mu\text{m})$		1.54~1.70	2.3~2.7	4.8~5.1	9.1~9.4	14.1~14.4
$\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$	$V$	0.495	0.488	0.477	0.330	0.235
	$\sigma (\mu\text{m})$	1.63	2.53	5.43	10.5	14.1
$\theta_1 = \theta_2 = 15^\circ$	$V$	0.499	0.497	0.487	0.456	0.402
	$\sigma (\mu\text{m})$	1.41	2.45	5.13	9.60	14.8

实验对光洁度从  $\nabla 7 \sim \nabla 3$  的平铣样板进行了粗糙度的测量。光电倍增管电压 1100 V, 光子计数器的积分时间取 5 秒, 道宽 0.91 V, 阈值 0.09 V。图 5(a)~(e) 给出了相应于  $\nabla 7 \sim \nabla 3$  五种不同粗糙表面在  $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ, \delta\theta_1 = 30'$  的条件下产生的干涉条纹图的照片。显然, 对比度随粗糙度的增大而减小。表 1 给出了测量数据。

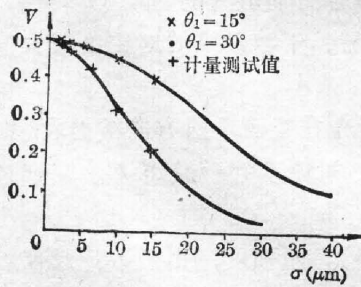


图6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

表 1 中  $R_q$  是泰勒雪夫-5 型粗糙度检查仪给出的计量值,  $R_q$  和  $\sigma$  都代表粗糙表面轮廓的均方根偏差。表 1 也证实了理论分析所得的结论, 减小入射角  $\theta_1$  可扩大粗糙度的测量范围。

图 6 给出了理论曲线和相应的实验值  $\sigma$  与计量值  $R_q$  的比较。实验结果与计量值符合得较好。

#### 四、结 论

本文提出的用激光散斑技术测量表面粗糙度的方法具有以下特点:

在光路设计上用一只双棱镜代替了 Léger 实验中照明部分的迈克尔逊干涉仪和远焦系

统,使实验装置和光学元件都比较简单,而且光路调节也比较方便。

光路排列时,适当地选择了入射角  $\theta_1$  和  $\delta\theta_1$ ,使光路中不需要补偿系统就能得到较理想的干涉条纹,而且具有较大的粗糙度测量范围。

在测量上,本文所做的工作不用进行象 Fujii<sup>[2]</sup>、Goodman<sup>[3]</sup> 等用散斑强度来研究表面粗糙度时所必须的那种大量测量,而是通过测量几条有规则的条纹对比度来计算粗糙度值。如果用计算机处理系统,则能直接读出粗糙度值。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] W. B. Riddens; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 11 (Nov), 2173.
- [ 2 ] H. Fujii, T. Asakura *et al.*; *J. O. S. A.*, 1976, **66**, No. 1 (Jan), 11.
- [ 3 ] J. W. Goodman; *Opt. Commun.*, 1975, **14**, No. 3 (Jul), 324.
- [ 4 ] 程路,张炳泉;《物理学报》,1980, **29**, No. 12 (Dec), 1570.
- [ 5 ] D. Leger, J. C. Perrin; *J. O. S. A.*, 1976, **66**, No. 11 (Nov), 1210.
- [ 6 ] J. C. 丹蒂;《激光斑纹及有关现象》, (科学出版社,1980)。

## Determination of surface roughness by correlation of laser speckle in real time

ZHENG YUEMING WANG CE AND LING DEHONG  
(Laser Research Section, Suzhou University)

(Received 17 July 1984; revised 19 September 1984)

### Abstract

This paper proposes and discusses a new set-up for realtime measurement of surface roughness by correlation of laser speckle patterns. The rough surface is illuminated simultaneously by two plane waves which are obtained from a laser after angular splitting by a biprism. Selecting a small angle of biprism and small angle of incidence, the measurement of roughness covers a dynamic range of  $1\mu\text{m}$ . Finally, the experimental results thus obtained are compared with metrological measurement by TALYSURF-5, the agreement of the data is well.