

## 一种无触点快速测量表面粗糙度的方法

李田泽

(山东工程学院, 淄博, 255012)

张静华

(山东淄博师专, 淄博, 255013)

**摘要:** 提出一种使用激光束快速测量表面粗糙度的无触点光学方法。一束照射在样品表面的激光束随着表面粗糙度的增大反射光的密度分布将被扩展, 可用 PCD 测出从铝制样品表面反射光的密度分布。被反射光的密度曲线可通过高斯函数近似地求出。密度分布曲线的宽度由高斯曲线系数的标准差计算出来, 此标准差近似等于密度曲线的高斯函数的标准差, 密度曲线的中线平均粗糙度随着高斯曲线系数的增加而增加。粗糙度  $R_a$  在  $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$  的范围内, 可利用实验公式  $R_a = 0.088\text{GCP} + 0.032$  通过测量 GCP 得到。

**关键词:** 激光 表面粗糙度 光学探测器 测量 无损实验 计算机控制

## A new method for noncontact rapid measurement of surface roughness

Li Tianze

(Shandong Institute of Technology, Zibo, 255012)

Zhang Jinghua

(Zibo Teacher's College, Zibo, 255013)

**Abstract:** An optical detection technique for rapid measurement of surface roughness by using a laser beam is proposed. When a laser beam illuminate on the surface of a aluminum specimen, the space distribution of the reflected light intensity will be the function of the roughness of the surface of the specimen. And the intensity distribution can be measured with a plasma-coupled device (PCD) and approximately expressed with Gaussian function. The broadness of the intensity distribution curve can be evaluated with standard deviation called Gaussian curve parameter (GCP). We find a experimental equation  $R_a = 0.088\text{GCP} + 0.032$  to show the relationship between center-line average roughness  $R_a$  and GCP in range of  $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ .

**Key words:** laser surface roughness optical sensor measurement nondestructive test computer control

### 引 言

表面粗糙度通常是利用接触法测出来的, 此方法不但浪费时间, 而且所用触头还易把柔软的被测物表面划坏。由于被测物表面反射的激光束的密度分布曲线随着表面粗糙度的增加而扩展, 所以粗糙度可通过计算反射光密度曲线的宽度而得出<sup>[1,2]</sup>。许多光学方法是通过观测(如光电晶体管或 CdS 光学装置等)光学探测器而测得反射光密度曲线的宽度来计算表面粗糙度。在这些方法中, 密度曲线的宽度是用标准差或曲线密度最宽的一半计算<sup>[1,2]</sup>, 而且这些方法中对用光学接触测量表面粗糙度都做了介绍。由于这些方法均需对包括本底基线在内的整个反射光密度曲线进行彻底测量, 所以都是非常浪费时间的。

我们提出一种新式无触点快速测量表面粗糙度的方法, 是通过应用高斯函数的高斯曲线的系数来计算表面粗糙度。此高斯函数近似等于通过一个固定 PCD 影像探测器测得的反射光密度曲线的峰值。高斯曲线系数是高斯函数的标准差。此系数首先是由 Kurita<sup>[3,4]</sup> 在利用高斯函数计算 x 射线衍射光线的宽度提出来的。

### 一、通过高斯曲线法计算反射光密度分布曲线的宽度

从样品表面反射的激光束将会反映样品表面粗糙度的增加。反射激光束的宽度可通过应用近似等于反射光密度分布曲线峰值的高斯函数标准差计算出来。

在反射光密度曲线峰值周围的高斯函数可通过下式计算

$$g(x) = A \exp[- a(x - p)^2] \tag{1}$$

式中,  $A$  和  $a$  是正的常数,  $p$  是高斯函数的主轴。

$\sigma^2$  为方差, 代表函数的宽度, 其定义为  $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - p)^2 g(x) dx / \int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx$  (2)

由于把原  $x$  坐标轴变换成主轴  $p$  不会改变 (2) 式的方差  $\sigma^2$ , 所以可得到

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx / \int_{-\infty}^{\infty} f(x) d(x) \tag{3}$$

式中,  $f(x)$  为原坐标轴变换到  $p$  轴的  $g(x)$  函数, 定义式为  $f(x) = A \exp(- ax^2)$  (4)

把 (4) 式代入 (3) 式得

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \exp(- ax^2) dx / \int_{-\infty}^{\infty} \exp(- ax^2) dx = \frac{1}{2} \pi/a^3 \quad \pi/a = \frac{1}{2a} \tag{5}$$

$$\sigma = 1/ \sqrt{2a} \tag{6}$$

这个高斯函数标准差称为高斯曲线系数 (GCP)。(6) 式表明, 代表高斯函数密度的高斯曲线系数可通过 (1) 式中接近于反射光密度分布曲线的高斯函数中的常数  $a$  得到。

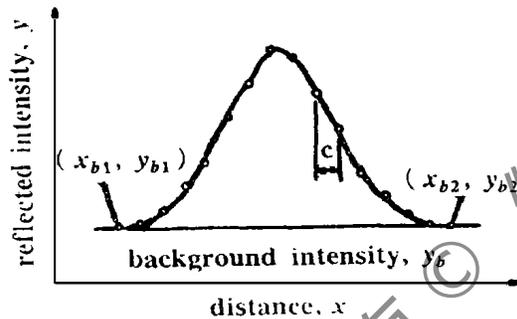


Fig. 1 Schematic reflected light intensity distribution curve

的密度。用  $z$  表示把背景光的密度  $y_b$  校正为光密度, 其关系为  $z = y - y_b$ 。背景光密度  $y_b$  是反射光密度曲线的基线。当没有反射激光束时,  $y_b$  代表输出密度, 这时的密度是由许多光而不是反射激光束造成的, 它受光学观测器和电路特性影响。如果要测量背景光密度  $y_b$ , 可通过连接图 1 中两端点  $(x_{b1}, y_{b1})$  和  $(x_{b2}, y_{b2})$  得到

$$y_b = E y_{b1} + F y_{b2}$$

其中,  $E = (x_{b2} - x) / (x_{b2} - x_{b1})$ ,

$$F = (x - x_{b1}) / (x_{b2} - x_{b1})$$

采用最小平方法对密度曲线底部的几个数据可对背景密度曲线进行更精确的测量。

图 2 是一幅校正背景反射光密度示意图。其中每个数据点是在每个固定的  $c$  间隔上取得的。高斯曲线系数 (GCP) 是通过 (1) 式中高斯函数的常量  $a$  计算得出, 常数  $a$  是通过运用最小平方法对密度曲线峰值附近的几个点的数据计算出来的。GCP 的计算式可由下式给出<sup>[3,4]</sup>

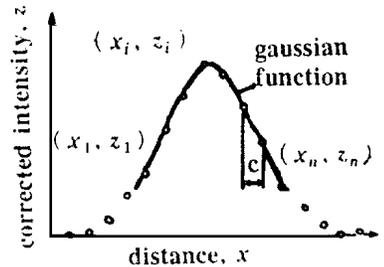


Fig. 2 Gaussian function approximation of reflected intensity distribution curve corrected for background (BG) intensity

$$GCP = k - \sum_{i=1}^n T_i \ln z_i \quad (7)$$

式中,  $T_i = 12t_i^2 - n^2 + 1$ ,  $z_i = i - (n + 1)/2$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $k = c - n(n^2 - 1)(n^2 - 4)/30$  由于关系式  $\sum_{i=1}^n T_i = 0$  适用于(7)式中的  $T_i$ , 所以任何量乘以每个密度数值  $z_i$  将不会改变高斯曲线系数(GCP)的大小。为了得到基本的反射密度, 必须校正本底密度曲线。本底校正将加宽密度曲线的范围, 此范围可通过高斯函数计算出来。

高斯曲线法不但使我们得到代表反射光密度曲线宽度的高斯曲线系数, 而且可得到曲线作为高斯函数主轴的位置<sup>[5]</sup>。本底校正不但影响了峰值位置而且影响了 GCP<sup>[6,7]</sup>。因此, 为了用 GCP 对反射光密度曲线的宽度进行精确的计算, 必须考虑本底误差。

## 二、实验过程

图 3 是实验装置示意图。从激光器发出的激光束在镜面反射后垂直落在样品表面, 并再次被反射, 反射光密度通过 PCD 线性影像探测器测量出来输入电子计算机并利用公式(7)计算出 GCP。中线平均表面粗糙度  $R_a$  是用一种接触装置测量出来的并把此结果和 GCP 进行比较。这里使用的激光波长为 514.5nm 的氩气激光。用来测量反射光密度的 PCD 有 512 个光学探测部分, 每个部分宽度为 50 $\mu$ m, PCD 的总长为 25.6mm。测量反射光密度的累积时间为 20ms, 通过对每个样品的三个位置的测量而得出 GCP, 在每一个照射区测量得出三个表面粗糙度  $R_a$  数值并对它求平均, 2mm 长度的测量区几乎和激光束直径相等。

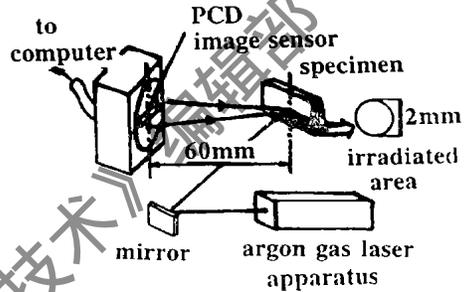


Fig. 3 The system arrangement of measurement of reflected light intensity distribution

这里使用的激光波长为 514.5nm 的氩气激光。用来测量反射光密度的 PCD 有 512 个光学探测部分, 每个部分宽度为 50 $\mu$ m, PCD 的总长为 25.6mm。测量反射光密度的累积时间为 20ms, 通过对每个样品的三个位置的测量而得出 GCP, 在每一个照射区测量得出三个表面粗糙度  $R_a$  数值并对它求平均, 2mm 长度的测量区几乎和激光束直径相等。

## 三、实验结果和讨论

图 4 是用接触装置测得的三个典型样品的表面粗糙度轮廓图。图 5 是用 PCD 测得的这

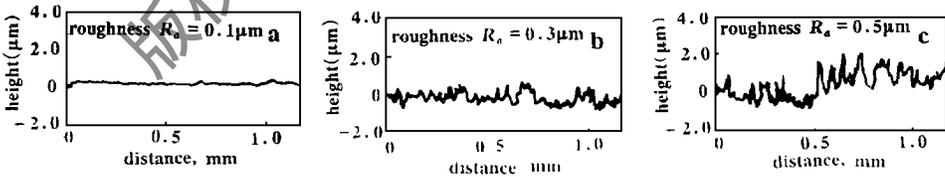


Fig. 4 Surface roughness profiles measured with stylus instrument

些样品的反射光密度分布示意图, 在图 5 中, 反射光密度和在 PCD 探测表面上的距离分别作为纵坐标和横坐标。图 5 中密度分

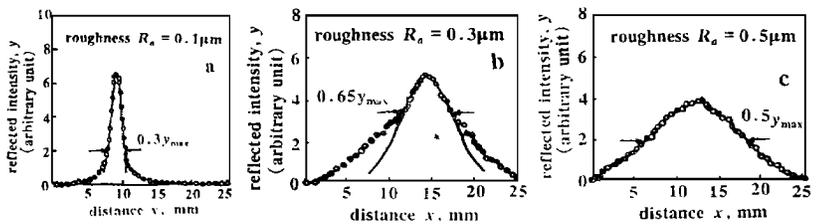


Fig. 5 Gaussian function approximation of smoothed reflected intensity curve

布曲线的密度与图4中用接触装置测得的表面粗糙度的轮廓图相吻合,图5a是最光滑样品表面密度分布曲线,此曲线是直接样品表面发生反射的光产生的。反射光密度可通过伴有入射激光束的高斯函数而近似求出来。在图5中的高斯光束是用图中所示箭头上面的数据点用最小平方方法计算出来的。图5c是粗糙的样品表面发散光的密度分布,在这种情况下,直接反射的光束部分已经完全被消失,扩展的密度分布也可通过高斯函数近似求出来。图5b是表面粗糙度介于图5a和图5c之间的样品的密度分布曲线,有着高斯分布的直接反射光重叠在扩散的发散反射光上。在讨论中,为了方便,GCP可通过图5b中的箭头上数据点的数据计算出来。但更深入的研究需要计算图5b中的重叠的密度分布的宽度。

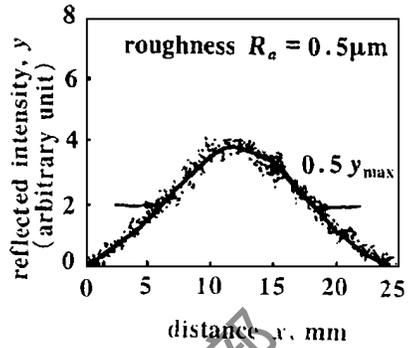


Fig. 6 Gaussian function approximation of actual reflected intensity curve

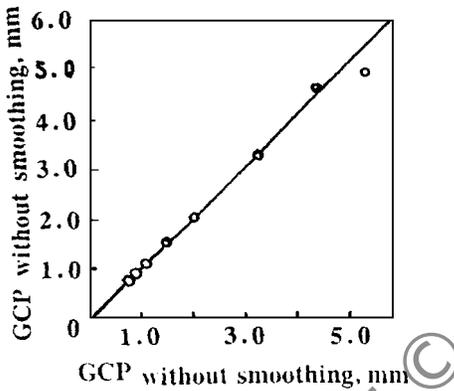


Fig. 7 Relationship between GCP values with and without data smoothing

图5中的数据点是用PCD测得的七个相邻的数据平均后进行平滑而得出。虽然可通过平滑来减小数据的上下波动,但可能会对测得的真实密度曲线进行了轻微的改动。因此,必须进一步平滑对GCP的影响。图6是一幅没有对图5c中样品数据进行平滑的示意图,其中高斯函数是通过用最小平方拟合对测量的密度进行计算得出来的。图7是一幅使用公式(7)计算平滑后和没有平滑的密度得出的GCP大小的关系图。两个数组除了最大值外基本相同。这是因为GCP通过高斯函数得到的,而高斯函数又是用最小平方平均所得数据计算出来的。因此,对于使用GCP得到密度分布曲线密度的

计算,平滑密度数据是没有必要的。

图8表明了GCP和用接触装置测得的粗糙度的关系,用接触装置测得的八个样品有着不同的表面粗糙度,并对每个样品的三个位置进行测量。图中的斜线是通过最小平方方法计算并由下式给出

$$R_a = 0.088GCP + 0.032 \quad (8)$$

表面粗糙度可利用GCP通过公式(8)计算,GCP可在两秒钟内测出。实际上,在激光束照射到样品表面的同时,可用提出的光学方法计算表面粗糙度。

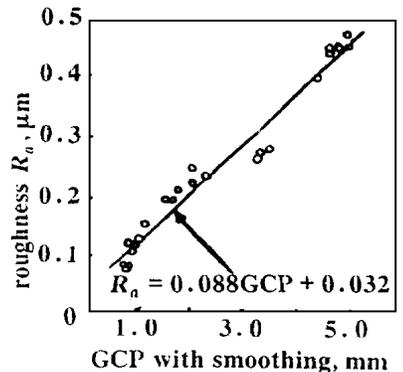


Fig. 8 Center-line averaged surface  $R_a$  as a function of GCP

#### 四、结 论

我们提出的无触点光学法是利用GCP来测量表面粗糙度的。其中GCP代表接近反射密度曲线的高斯函数的宽度。在此方法中,从样品表面反射的激光束的密度分布可通过固定的PCD线性影像观测器测量。

## 功率调谐曲线的理论分析

韩艳梅 张书练 李 岩 李克兰

(清华大学精密仪器与机械学系, 精密仪器与测试国家重点实验室, 北京, 100084)

摘要: 在三级微扰理论下, 利用频率分裂驻波激光器中“单模对”运转情况下的自洽方程组和光强的互饱和和作用对曾报导过的实验现象(不论激光器充 Ne 的单同位素还是充 Ne 的双同位素, 也不管输出光的频差多大, 随着腔长的调谐, o 光和 e 光的功率变化方向始终是相反的)进行理论上的说明。

关键词: 自洽方程 互饱和和作用 极化系数

## Theoretical analysis of the laser power tuning property

Han Yanmei, Zhang Shulian, Li Yan, Li Kelan

(The State Lab. for Precision Measurement Technology and Instruments,

Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** The following experiment phenomenon has been reported before: the power varying trend of o-light and e-light are opposite to each other with the laser cavity tuned, no matter what kind of Ne ( $Ne^{20}$  or the mixture of  $Ne^{20}$  and  $Ne^{22}$ ) is used and how much the mode split is. Now based on the theory of three level perturbation, the phenomenon is analyzed with the self-consistent equations and the mutual gain saturation effect of “the single pair of modes” of the frequency splitting standing-wave He-Ne lasers.

**Key words:** self-consistent equations mutual gain saturation effect polarization index

1. 反射光密度分布曲线峰值和高斯函数近似。

2. 从平均的密度数据点计算的 GCP 和从原始的数据点计算的 GCP 是相同的。因此, 在计算通过 GCP 得到的密度分布曲线宽度时, 没有必要平滑密度数据。

3. GCP 随表面粗糙度  $R_a$  增大而增大。  $R_a$  可在研究测量的粗糙度的范围内通过 GCP 用 (8) 式求出来。

### 参 考 文 献

- 1 Azushima A, Kishi T, Miyagawa M. J JSTP, 1984; 25(284): 765
- 2 Adachi M, Inari T, Kamei M. Trans of Soc of Instrument & Control Engineers, 1984; 20(6): 536
- 3 Kurita M. J JSTP, 1985; 26(295): 869
- 4 Kurita M. Advances in x-Ray Analysis, 1988; 31: 277
- 5 Kurita M. NDT International, 1987; 20(5): 277
- 6 Kurita M. Advances in x-Ray Analysis, 1989; 32: 377
- 7 Kurita M, Ihara I, Ono N. Advances in x-Ray Analysis, 1989; 32: 459

\* \* \*

作者简介: 李田泽, 男, 1962 年 12 月出生。硕士, 副教授。现主要从事无损光电检测, 激光技术等方面的研究工作。

收稿日期: 1996-10-28 收到修改稿日期: 1997-04-19