

文章编号 1004-924X(2007)08-1263-06

利用图像处理技术评价硅片表面清洗率

王续跃,许卫星,司马媛,吴东江,康仁科,郭东明

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:介绍了一种基于 Matlab 图像处理工具箱技术的评价硅片表面污染颗粒激光清洗率的新方法。借助 Matlab 图像处理工具箱,对清洗前后硅片表面光学显微镜照片进行处理,编写硅片表面激光干法清洗率的评价程序,统计清洗前后硅片表面评价区域的污染颗粒个数,对清洗效果进行定量评价。研究结果证明,利用此方法统计的颗粒数准确度达 97.6%,得到的激光清洗率准确度达 99.2%。结果表明,借助图像处理技术评定清洗效果是一种高效、快速、准确的新方法。

关键词:激光清洗;硅片;清洗率;图像处理

中图分类号:TG665;TP391.4 **文献标识码:**A

Evaluation of efficiency for silicon wafer cleaning by image processing

WANG Xu-yue, XU Wei-xing, SI Ma-yuan, WU Dong-jing, KANG Ren-ke, GUO Dong-ming

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on Image Processing Toolbox of Matlab technique, a new evaluation method of cleaning efficiency is presented in dry laser cleaning particles of silicon wafer surface. Image Processing Toolbox of Matlab is used to recognize optical information of silicon wafer surface before and after laser cleaning and the evaluating programs are developed to count the number of pollution particles on the silicon wafer and to evaluate the cleaning efficiency. The results show that the statistical accuracy of the method is 97.6%, and the laser cleaning accurate reaches 99.2%. The research achievement offers a effective, rapid and accurate new evaluation method.

Key words: laser cleaning; silicon wafer; cleaning efficiency; image processing

1 引言

随着半导体和微电子器件的生产向着高集成度和小尺寸方向的发展,污染物的尺寸和数量控

制成了一个关键的问题^[1-3]。对吸附在基体表面的微米级亚微米级的颗粒,理论和试验都证明其粘附力和自身重量之比的数量级高达 10^9 ^[4]。传统的清洗技术,如 RCA 清洗、超声波清洗、机械双面刷片法,或者不能有效地去除微米级和亚微

收稿日期:2007-02-06;修订日期:2007-05-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52090101);国家“863”高技术计划资助项目(No. 2002AA421230)

米级颗粒,或者能够去除,但损伤基体表面。激光清洗是一种新的非接触式清洗技术,是激光材料加工与硅片表面清洗相结合的产物。它既具有激光加工的特点,又满足硅片表面清洗技术发展的要求,是大直径硅抛光片表面清洗技术发展的趋势。该技术具有清洗效率高、可灵活选择清洗区域、无环境污染等优点,在清洗阈值和损伤阈值之间的能量密度范围内,既可满足表面洁净技术的要求,又不破坏硅片表面的原始形貌,是一种非常具有发展潜力及实用价值的清洗技术^[5-8]。

目前硅片表面清洁度主要用颗粒计数器检测,即用一束探测光束(激光、X射线)照射到硅片表面,借助光的散射原理来确定硅片表面颗粒沾污的个数,但由于颗粒分散不均且存在团聚现象,致使干涉现象严重,结果不准确^[9]。此外还可采用原子力显微镜(AFM)、扫描电子显微镜(SEM)、X光电子能谱仪(XPS)等设备对基体表面杂质颗粒的分布和组分进行观测和分析,可是这些方法或者对硅片表面造成损伤,或者检测、分析复杂,不能准确、快速地定量分析清洗效率^[6,10]。

本文将 Matlab 图像处理技术应用到硅片表面颗粒数检测上。在清洗前后硅片表面的光学显微镜照片上选取评价区域,借助 Matlab 软件的工具箱(Image Processing Toolbox)^[11],对图像进行预处理,颗粒形态分析,最后统计出符合要求的颗粒数,并对评价程序进行封装,设计友好界面,实现评价过程的自动化。

2 评价程序的开发

2.1 评价程序的基本原理

2.1.1 灰度调整原理

灰度调整是一种图像增强的方法,其中直方图均衡化是把原始灰度图像的直方图变换成均匀分布的形式,以增加像素灰度值的动态范围,从而达到增强图像整体对比度的效果^[12]。

将原始图像的灰度级 r 归一化,即 $0 \leq r \leq 1$ ($r=0$ 代表黑, $r=1$ 代表白),设经直方图均衡化后的灰度级为 s ,则二者之间的关系为

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(\omega) d\omega, \quad (1)$$

其中 $0 \leq s \leq 1$, $T(r)$ 在 $0 \leq r \leq 1$ 上单值且单调递

增, p 代表概率密度。

数字图像中灰度值是离散的,依据莱布尼茨准则,代入离散值 $p_r(r_k) = \frac{n_k}{n}$,可得直方图均衡化公式

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, L-1,$$

其中, n 为图像中的像素总和, k 为离散的灰度级, n_k 为灰度级为 r_k 的像素个数, L 为图像中可能的灰度级总数。

2.1.2 最优阈值法分割原理

人们希望将目标与背景尽可能准确地分离开来,即将误分割减少到最低,而选取最优阈值(T)是一种常用的方法,因此这里的最优阈值是能使误分割率最小的分割阈值^[12-15]。图像的直方图可视为像素灰度值的概率密度函数,设一幅图像主要有两类灰度值区域,分别为背景区与目标区,平均灰度值为 μ_b 和 μ_o ,其均方差为 σ_b 和 σ_o 。概率密度为 p_b 和 p_o ,先验概率为 P_b 和 P_o 。其中

$$P_b + P_o = 1, \quad (3)$$

整幅图像的混合概率为 $p(z)$

$$p(z) = P_b p_b(z) + P_o p_o(z), \quad (4)$$

当 $\sigma_b = \sigma_o$ 时

$$T = \frac{\mu_b + \mu_o}{2}, \quad (5)$$

当 $\sigma_b \neq \sigma_o$ 时,

$$T = \frac{\mu_b + \mu_o}{2} + \frac{\sigma^2}{\mu_b - \mu_o} \ln\left(\frac{P_o}{P_b}\right), \quad (6)$$

其中 $p(z)$ 与直方图 $h(z)$ 间的均方差为

$$e_{ms} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [p(z_i) - h(z_i)]^2, \quad (7)$$

其中, L 为直方图的灰度级别,当 e_{ms} 取最小时可以确定 $p(z)$ 的各个参数,进而求出最优阈值 T 。

2.2 评价程序的功能要求与对策

(1) 激光清洗率是对同一样片上同一评价区域清洗前后的颗粒而言,必须保证清洗前后所选评价区域的一致性。为此,程序中借助样片上的十字定位标记,采用人工定位和自动定位相结合,并显示所选区域的大小和位置,以保证清洗前后评价区域的一致性。

(2) 不同的图片分辨率存在差异,同一颗粒所占有的像素也不同,因此,不同的图片颗粒的取舍与计数应当存在不同。本程序中采用人工选取标

准颗粒的方法对不同的图片进行处理,以保证统计结果的一致性。

(3)硅片表面的沾污颗粒采用人为沉积的方法,可能存在团聚现象,因此图像上的一个“颗粒”不一定是实际的一个颗粒。为此程序中先计算标准颗粒的面积(像素数),然后依据这个值评价其他颗粒,计算有效颗粒数,对于面积特别小的“颗粒”,将作为干扰舍去。

2.3 评价程序的实现

评价程序主要包括四个部分,具体操作流程如图 1 所示。

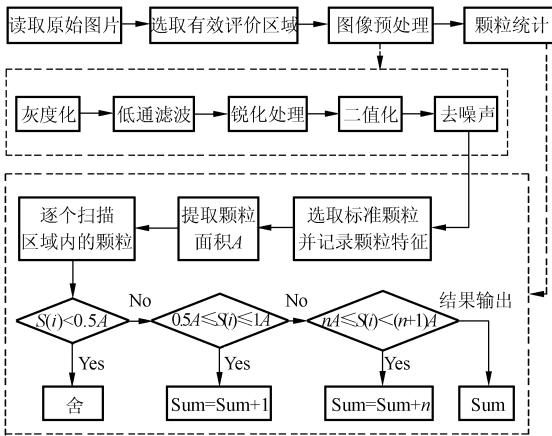


图 1 清洗率评价程序流程图

Fig. 1 Flow chart of evaluating program for laser cleaning efficiency

(1)读取硅片表面光学显微镜照片。借助样品上的十字标记,从读入的图像中选取有效的评价区域(保证清洗前后所选区域的一致性),并将其显示出来。接着对图像进行预处理,先将其转化为灰度图像并通过调整灰度增加图像对比度,再对图像低通滤波除去噪声,然后对低通滤波后的图像进行锐化处理,以突出颗粒边界,最后依据颗粒背景灰度由系统自动选取灰度阈值,将图像转化为只有黑白两种灰度的二值图像。

(2)统计硅片上的污染颗粒个数。利用鼠标人工选取一个标准颗粒,借助程序结构“探针”记录下所选颗粒的特征,从这些特征中提取颗粒的面积值 A (颗粒所占像素数)。接着利用“探针”对图像内的颗粒进行逐个扫描,每遇到一个就提取其面积特征 $S(i)$ 并与 A 做比较。如果 $S(i) < 0.5A$,则作为干扰舍去,如果 $0.5A \leq S(i) \leq A$,则

颗粒计数器加 1,如果 $nA \leq S(i) < (n+1)A$,则颗粒计数器加 n ,扫描结束即输出统计颗粒数。

最后,借助 Matlab 的 Guide 功能对程序进行封装,得到可以独立运行的硅片表面清洗效果评价程序,实现评价过程自动化(程序界面如图 2)。

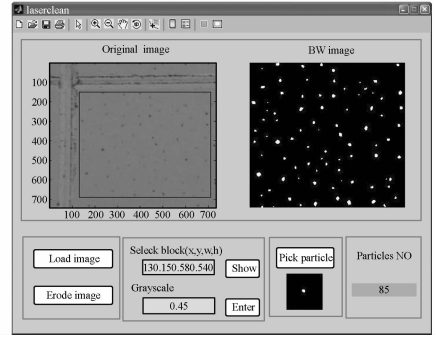


图 2 清洗率评价程序界面

Fig. 2 Interface of evaluating program for laser cleaning efficiency

3 试验应用

3.1 样片制备

3.1.1 硅片标记、制备

制备一批硅抛光片(100片, $Ra = 0.001 \mu\text{m}$),厚度为 $650 \mu\text{m}$,大小为 $5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,在每个样片中心做宽度为 $5 \mu\text{m}$ 左右的十字标记,试验过程中可利用引导光束使激光束辐照到十字标记处,同样可以辅助选取评价区域,确保激光清洗前后所取评价区域的一致性。

3.1.2 颗粒的分散与附着

试验采用人为沉积的方法使颗粒附着在硅片表面。首先选取溶剂为 99.7% 的乙醇,将 $1 \mu\text{m}$ Al_2O_3 颗粒与溶剂混合制备成为悬浮液,采用机械搅拌分散和超声分散的方法使颗粒在溶剂中分散,然后将悬浮液沉积在样片表面,最后通过甩膜,利用离心力的作用使颗粒沉积在硅片表面,以保证颗粒在样片上分布均匀。

3.2 试验条件和设备

激光光源为波长 248 nm 的 KrF 准分子激光器,设定脉宽为 30 ns 、频率为 5 Hz ,控制单个脉冲能量密度,使在 $30 \sim 120 \text{ mJ/cm}^2$ 内变化。样片被固定在一个可进行 X 、 Y 、 Z 方向移动的工作台上,对样片进行逐点单个和多个脉冲的激光辐

照,激光垂直照射到硅片表面的长方形光斑面积为 $1\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。试验装置的示意图如图 3。试验采用 MX40 光学显微镜对激光清洗前后的硅片表面进行观测,并拍摄清洗前后的照片。

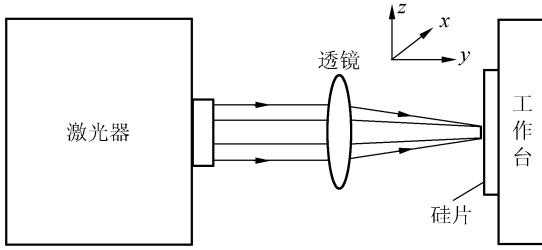


图 3 激光清洗装置示意图

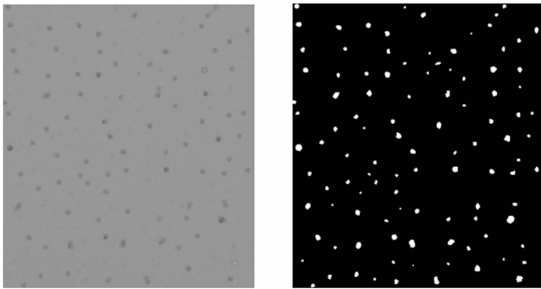
Fig. 3 Sketch map of laser cleaning device

3.3 颗粒统计

对于硅片表面颗粒数在激光清洗前后的统计,试验依据光学显微镜拍到的照片,采用三种方法:

3.3.1 人工计数

先对所选评定区域放大,然后对评定区内的颗粒逐一计数,并对已计算过的颗粒采用特殊颜色标记,以防重复累计,造成统计有误(见图 4(a))。



(a) 人工计数

(b) "白点颗粒"统计

(a) Manual counting

(b) "White particle" counting

图 4 颗粒统计

Fig. 4 Particle counting

3.3.2 评定程序计数

运行评价程序,读取图片,选取评价区域,用鼠标拾取标准颗粒,由程序依据指定的算法,自行统计评价区域的颗粒数,以验证程序的可行性(见图 2)。

3.3.3 "白点颗粒"计数

此过程中不拾取标准颗粒,仅仅统计二值图

像中的“白点颗粒”个数,用于对比第二种方法(如图 4(b))。

在这三种方法的运用过程中,对所选定区域采用矩形边框标记,以保证前后两种方法所选区域的一致性。试验分别对不同激光能量密度下清洗的硅片,采用上述三种方法进行颗粒统计,清洗前后的结果如图 5、6 所示。可以看出“白点颗粒”计数的结果比实际值偏大,且偏大程度不稳定,硅片表面颗粒数越多,不稳定程度就越大;而程序计数的结果比实际值略小,同实际值的偏差程度基本保持稳定,与颗粒数的多少关系不大。

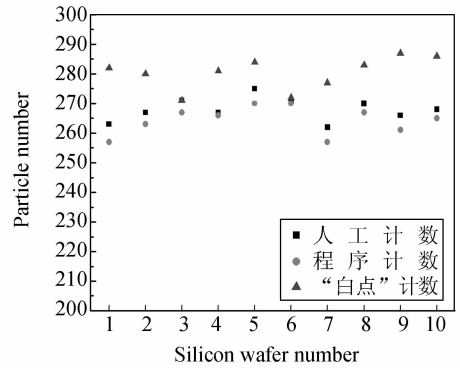


图 5 清洗前计数结果

Fig. 5 Counting results before cleaning

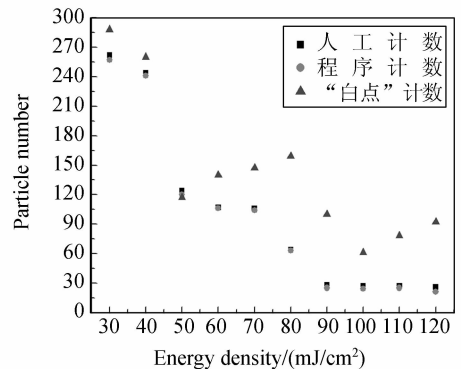


图 6 清洗后计数结果

Fig. 6 Counting results after cleaning

最后利用所得结果分别计算激光清洗率,即记录清洗前硅片表面颗粒数为 N_a ,清洗后表面颗粒数为 N_b ,则清洗率被定义为 $(1 - N_b/N_a)$,结果如图 7 所示。可见清洗率随激光能量密度的增加而增加, 30 mJ/cm^2 时开始出现清洗效果,并逐渐增加,到 90 mJ/cm^2 时清洗率高达 89.4% ,接着随能量密度的增加,清洗率在 90% 左右波动。对

于“白点颗粒”计数得到的清洗率,同其颗粒计数结果一样与实际值存在不稳定波动,而程序计数得到的清洗率与实际值保持一致,波动很小。

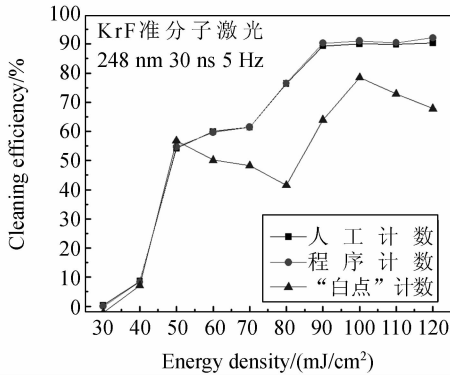


图7 清洗率计数结果

Fig. 7 Counting results of cleaning efficiency

3.4 评价方法的分析与讨论

对于“白点颗粒”计数,由于其统计的仅仅是图像预处理后二值图像内的“白点”,因此,里面包含了很多杂点和非清洗对象的微小颗粒,导致结果与实际值偏差较大,且误差值不稳定。通过提取标准颗粒面积特征,并以此为依据取舍其它“颗粒”,等价其它点的颗粒个数,统计精度得到很大提高。因为存在部分颗粒重叠现象,使结果相对真实值略偏低,得到的结果误差约为2.4%,也正是如此使得最后所得的清洗率误差仅为0.8%。可以看出,在激光干法清洗硅片表面的清洗结果评价中,借助 Matlab 图像处理工具箱,编制自行

统计颗粒数的程序,不仅实用,而且准确、高效。

4 结 论

(1)针对传统检测方法存在的一些问题,研究了一种激光干法清洗硅片表面颗粒效率检测的新方法。这种方法根据数学形态学图像处理的基本思想,利用了一个称作结构元素的“探针”,借助 Matlab 软件的图像处理工具箱,对激光清洗前后的硅片表面光学显微照片进行分析,并收集图像信息,统计硅片表面的颗粒数。

(2)试验采用人工计数和程序计数的方法,对同一评定区域进行颗粒数统计,对清洗表面颗粒进行定量分析。通过对比两组数据发现,采用程序计数得到的颗粒数准确度在97.6%,而采用程序计数得到的清洗率的准确度在99.2%。

(3)试验还表明,1 μm Al₂O₃ 颗粒的清洗率随激光能量密度的增加而增加,30 mJ/cm² 时开始出现清洗效果,并逐渐增加,到90 mJ/cm² 时清洗率高达89.4%,并在90~120 mJ/cm² 的能量密度下保持稳定。

(4)该方法为激光干法清洗硅片表面污染颗粒提供了评定依据。它不仅实现了统计、评定过程的自动化,而且统计结果准确、高效,是一种非常实用的技术。

只要对程序稍加改动,本方法同样适用于其它清洗方法清洗率的检测。也可用于其它形式的类似于“颗粒”形式的检测统计。

参考文献:

- [1] ANDREW C T, HEE K P, COSTAS P G. Laser cleaning of surface contaminants [J]. *Applied Surface Science*, 1998, 127(129): 721-725.
- [2] 刘传军,赵权,刘春香,等. 硅片清洗原理与方法综述[J]. 半导体情报, 2000, 37(2): 30-36.
LIU CH J, ZHAO Q, LIU CH X, et al.. Theory and method of silicon wafer cleaning [J]. *Semiconductor Information*, 2000, 37(2): 30-36. (in Chinese)
- [3] 刘红艳,万关良,阎志瑞. 硅片清洗及最新发展[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(增): 144-149.
LUI H Y, WAN G L, YAN ZH R. Silicon wafer cleaning and new development [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(Supp.): 144-149. (in Chinese)
- [4] MITTAL K L. *Particles on Surfaces*; III [M]. New York: Plenum Press, 1991.
- [5] SONG W D, HONG M H, ZHANG L, et al.. Laser cleaning technology and its application [J]. *SPIE*, 2002, 4426: 280-283.
- [6] FERNANDES A, KANE D. Dry laser cleaning threshold fluency-How can it be measured accurately [J]. *SPIE*, 2002, 4426: 290-295.

- [7] 司马媛. 激光清洗硅片表面颗粒污染的试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005.
SIMA Y. *Experimental study on laser cleaning of particle contaminants from silicon wafer surface* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [8] 吴东江, 许媛, 王续跃, 等. 激光清洗硅片表面 Al_2O_3 颗粒的试验和理论分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 764-770.
WU D J, XU Y, WANG X Y, *et al.*. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al_2O_3 particle on silicon wafer surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (5):764-770. (in Chinese)
- [9] 许彦华. 干涉效应对颗粒测量的影响[J]. 武汉大学学报, 2002, 35(4):109-112.
XU Y H. Influence of interference effect between particles upon particle size distribution measurement [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, 35 (4):109-112. (in Chinese)
- [10] NEBES P, ARRONTE M, VILAR R, *et al.*. KrF excimer laser dry and steam cleaning of silicon surfaces with metallic particulate contaminants [J]. *Appl. Phys.*, 2002(74):191-199.
- [11] 孙兆林. MATLAB 6. X 图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
SUN ZH L. *MATLAB 6. X Image Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)
- [12] RAFAEL C G, RICHARD E W. *Digital Image Processing (second edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [13] 王延杰, 宋建中. 一种实时自适应图像二值化方法 [J]. 光学 精密工程, 1994, 2(5):17-21.
WANG Y J, SONG J ZH. An adaptive method for image binarization in real-time [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(5):17-21. (in Chinese)
- [14] 同武勤, 凌永顺, 黄超超, 等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 138-144.
TONG W Q, LING Y SH, HUANG CH CH, *et al.*. Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):138-144. (in Chinese)
- [15] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3):509-514.
LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3):509-514. (in Chinese)

作者简介:王续跃(1960—),男,大连理工大学机械工程学院副教授,博士后,主要研究方向为特种加工、精密加工,发表论文 60 余篇,其中 SCI 收录 20 余篇。E-mail:wbzdd@dlut.edu.cn