

测量微小粒子高度的显微投影方法研究

唐春晓¹ 李恩邦¹ 吴亚北²

(¹ 天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387
² 西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要 在半导体生产过程中, 半导体基片在生长制作时表面会存在一些细微突起结构, 这些突起的尺寸通常为微米量级, 若突起的尺寸过高, 在流水线上被打磨抛光时极易产生不合格的产品, 从而影响生产效率。因此, 需对平面上单一(或几个稀疏分布的)非球形粒子的高度进行实时在线测量。针对这一问题提出了一种测量微小粒子高度的方法: 显微投影法。介绍了基于显微投影法的微小粒子高度测量系统, 实现了约 100 μm 高度的单一不规则形状微小粒子的测量。

关键词 测量; 图像处理; 显微成像; 投影光学

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.081201

Research of Minute-Particle Height Measurement Method Based on Microscopic Imaging and Projection Optics

Tang Chunxiao¹ Li Enbang¹ Wu Yabei²

(¹ School of Information and Communication Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China
² School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract There are some minute peaked particles on the surface of semiconductor substrate during production. Sizes of the particles are usually several microns. If the height of any particle exceeds a standard value, there will be many defect wares during snagging and buffing when processed on the assembly-line. All that could affect the producing efficiency. It is desired to give test simultaneously on the height of single or several sparsely distributed non-spherical particles. We aim at offering a method to measure the height of minute particles. We also introduce a system of measuring small particle's height on the basis of microscopic projection and successfully measure single randomly shaped minute particle with height around 100 μm .

Key words measurement; image processing; microscopic imaging; projection optics

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 280.4788; 120.2830; 120.6660

1 引言

工业生产中常会遇到各种不同的微小颗粒, 尺寸范围通常在 $10^{-8} \sim 10^{-3} \text{m}$ 之间, 统称“粒子”包括固态粉末、悬浊液中的散浮粒子、大气尘埃、烟雾、水珠等^[1]。随着科技的发展, 新材料不断出现, 生产工艺也在不断更新, 与粒子有关的技术问题也越来越多, 粒子对工业生产所产生的影响逐渐凸显。粒子的特性与工作效率、产品质量以及生产过程等有着直接的关系^[2]。例如: 在测量液体的流动速度时, 可以在液体里播撒示踪粒子, 通过示踪粒子的位置随时间变化的关系来测量流速; 此时粒子的密度、尺寸和疏密程度将直接影响到粒子在流体中的跟随性, 即粒子的速度跟流体的速度是否一致^[3]。因此, 粒子的尺寸测量越来越受到人们的重视, 并且逐渐发展成为现代测量学中的一个重要分支。

在 20 世纪后期, 工业生产和科研领域对粒子尺寸测量的要求主要集中在以下两个方面: 粒子平均粒径

收稿日期: 2012-03-21; 收到修改稿日期: 2012-05-18; 网络出版日期: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(60877049, 61177078)和高等学校博士学科点专项科研基金(20101201120001)资助课题。

作者简介: 唐春晓(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电子科学与技术等方面的研究。E-mail: tangyifei82@hotmail.com

的测量以及粒子的疏密程度。针对这两个从实际工程中提炼出的问题,各种各样的粒子测量技术及测量仪器不断涌现。传统粒子测量的方法大体可分为机械测量^[4](如筛选法、沉降法、过滤法、离心法等)、电气测量^[4](如库尔特法等)和光学测量(如显微观察法^[5]、成像法^[6,7]、消光法^[8]、光散射法^[9~12]、全息法^[13~15]等)。

近两三年,随着半导体行业的快速发展,出现了一些新的属于粒子尺寸测量领域的工程问题。例如半导体基片在生产和制作的过程中,在不平整不透明基片上会存在一些尖利的微小突起(这种突起也可以被称为微小粒子)。这些微小粒子的高度是随机变化的,一般均为微米量级。这些半导体基片在制作成为电子元件芯片之前需要打磨抛光处理。在半导体行业的流水线生产过程中,基片的打磨和抛光是由自动化设备实现的,只有基片上的微小粒子的高度小于某一标称值时才能被正确地打磨和抛光,否则会生产出不合格产品,影响生产效率。因此,在打磨和抛光环节之间,需要用一种高速的在线检测技术将高度超标的尖形微粒检测出来。又如当前快速发展的基于微机电系统(MEMS)的器件,其特征结构尺寸在微米量级。对于这类器件的测量不仅需要高精度和高分辨率,还要求测量系统具有在线和快速测量功能。这些新问题中对于微小粒子或机构的测量具有新的特性:1)粒子数量很少,甚至只有单一粒子;2)粒子形状不规则,颗粒沿不同取向的尺寸不同,甚至差别很大;3)在实际应用中仅需要测量粒子的高度即可。针对微小粒子高度的测量方法并不多,主要包括机械探针法(主要用于毫米量级的测量)和原子力显微镜测量法(主要用于纳米和亚微米量级)。但是在微米至毫米之间,目前仍存在一定的技术空白。针对这一方面的需求,本文提出利用光学投影的原理,结合显微成像技术实现微米级别粒子高度测量的方法,这一方法被称为显微投影法。

2 原理阐述与系统设计

显微投影法的基本原理为:利用已知的两条不同角度入射光下粒子投影的长度差异来测量微小粒子的高度,由于微小粒子的尺寸为微米量级,因此需在显微镜下采集粒子和投影的像,并通过图像处理技术得到最终的粒子高度。在选取适当的投影平面材料和显微倍数的情况下,可实现高度为几微米至几百微米的形状不规则粒子的高度测量。测量微小粒子高度的基本原理如图1所示。

设在载物平台上有一微小粒子,其高度为 H ,在入射角为 α_1 的平行光照射下,在平台上产生阴影 S_1 ;在角度为 α_2 的平行光照射下,在平台上产生阴影 S_2 ,则有

$$S_1 = \frac{H}{\tan \alpha_1}, S_2 = \frac{H}{\tan \alpha_2} \Rightarrow H = \frac{(S_1 - S_2) \sin \alpha_1 \sin \alpha_2}{\sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_2}. \quad (1)$$

两束照明用光束的入射角度 α_1, α_2 已知,再测得两种入射光下粒子阴影的长度差 $\Delta S = S_1 - S_2$,结合(1)式即可得到微小粒子的高度。

本文所设计的微小粒子高度测量系统如图2所示,采用输出平行光束的LED灯作为照明光源,以带有CCD相机的反射式显微镜作为图像采集系统。反射式显微镜可选择生物显微镜或金相显微镜,本文的测量系统选取上海长方光学仪器公司生产的XSP-9CE系列透反射式生物显微镜及配套CCD相机实现微小粒子影子图像的采集。

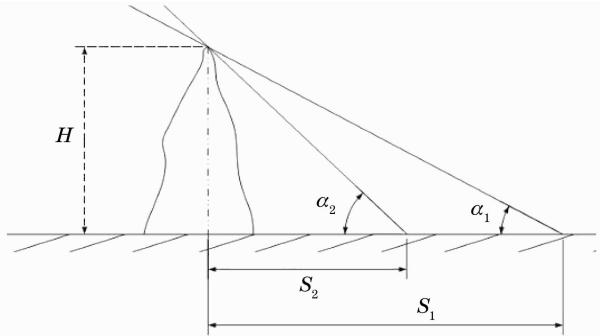


图1 投影法测量微小粒子高度原理

Fig. 1 Principle of particle height measurement based on projection imaging

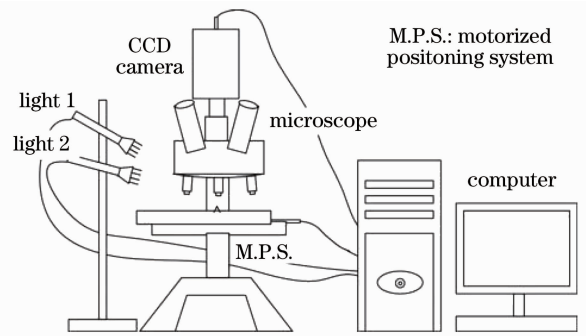


图2 显微投影法微小粒子高度系统

Fig. 2 Particle height measurement system based on cast shadow imaging under microscope

微小粒子的阴影图像经处理后得到的粒子阴影长度是以像素为单位的,可将其用 S'_1 和 S'_2 表述,而实际的影子长度是以微米为单位的,可表述为 S_1 和 S_2 。因此,定义一个长度/像素的转换系数 $\beta = \frac{S_1}{S'_1} = \frac{S_2}{S'_2}$ 来表述粒子阴影的长度差在图像处理技术中的像素值与实际工程中的长度值的换算关系。同时,设计了长度/像素的转换系数在线自动检测方法以实时自动获取长度/像素的转换系数:将显微镜的载物台改装为电动位移平台,微小粒子放置在电动位移平台上,先采集一幅粒子的阴影图像,控制电动位移平台移动一个已知距离 D (单位: μm),再采集一幅粒子图像,与第一幅图像做对比即可得到图像中的位移 D' (单位:pixel),这一过程可通过软件控制相机和电动位移平台自动实现。根据公式 $\beta = \frac{D}{D'}$ 即可得到成像系统的长度/像素的转换系数。

3 实验与分析

实验中的被测粒子为金刚砂。用筛选法将金刚砂粒子用 180 目($80 \mu\text{m}$)与 280 目($53 \mu\text{m}$)的标准筛反复过筛,使其在各个方向上的尺寸均位于 $60 \sim 90 \mu\text{m}$ 之间以确定粒子高度的取值范围。将金刚砂粒子放置在玻片上,在显微镜下获取的金刚砂粒子的图像如图 3 所示。

通常而言,在基于图像处理的光学测量技术中,被测物图像的背景很重要,对测量精度有很大影响。本文所述的显微投影法同样如此。作为背景载物薄板应满足以下条件:1)颜色为浅色,阴影的颜色通常为灰黑色,深色的背景易混淆阴影的边缘;2)表面应具有适当的粗糙度,首先,若要阴影图像清晰,其周边区域应为亮色,由于光源是倾斜入射,只有具有一定粗糙度度的表面才能保证有足够的散射光进入显微物镜,光滑表面会将入射光反射出去,使得粒子背景成为黑色从而采集不到阴影图像;其次,粗糙度不可过高,否则薄板表面的起伏会产生阴影,影响待测粒子阴影的图像识别。

在实际实验中,选取的显微物镜倍率为 4 倍,背景薄板为柯达牌数码照片彩色打印机用打印相纸。两个光源的入射角分别为 30° 和 60° ,通过测量一个已知高度的标准物体的阴影加以标定。CCD 所得图像尺寸为 $352 \text{ pixel} \times 289 \text{ pixel}$,电动平移台为北京大恒光电的 GCD-402050M,线性移动精度为 0.00025 mm 。

实验中两入射光依次照明,实际得到的微小粒子阴影图像如图 4 所示。选取适当的阈值将图 4 中的数据进行二值化,可以得到如图 5 所示二值化图像。以图像的横向为 x 轴方向时,对图 5 做边缘提取,可以得到粒子及阴影的轮廓线,在轮廓线中 x 值最大的点即为粒子阴影的顶点位置。采用 Robert 算子对二值化后的图像做边缘提取,可得到边缘提取图,如图 6 所示。

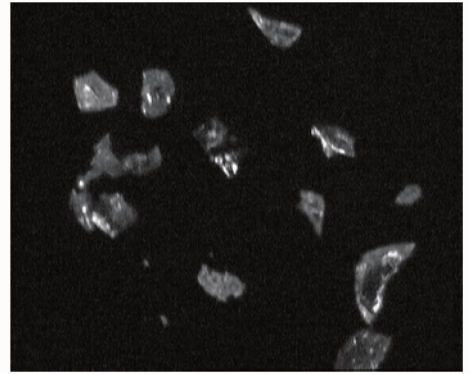


图 3 显微镜下金刚砂的图像

Fig. 3 Picture of carborundum under microscope

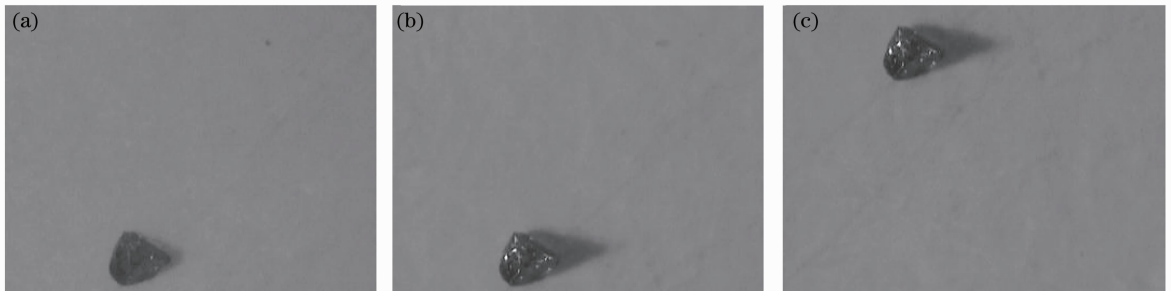


图 4 由显微成像系统采集到的金刚砂粒子阴影的图像。(a)光线 1 照明下的阴影图像;
(b)光线 2 照明下的阴影图像;(c)光线 2 照明下平台位移 D 后的粒子图像

Fig. 4 Shadow pictures of carborundum. (a) Light source 1; (b) light source 2; (c) light source 2 and displacement D

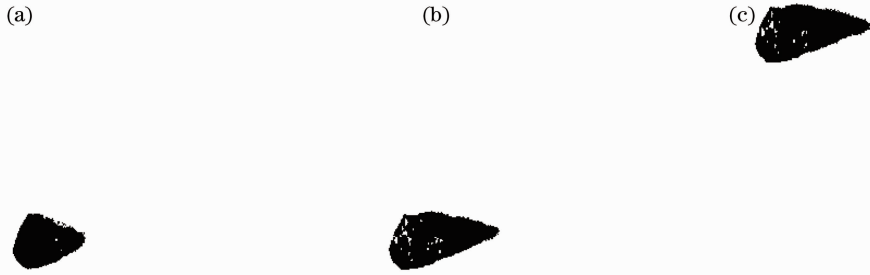


图 5 对应图 4 的金刚砂粒子阴影的二值化图

Fig. 5 Binary images of carborundum shadow corresponding to Fig. 4

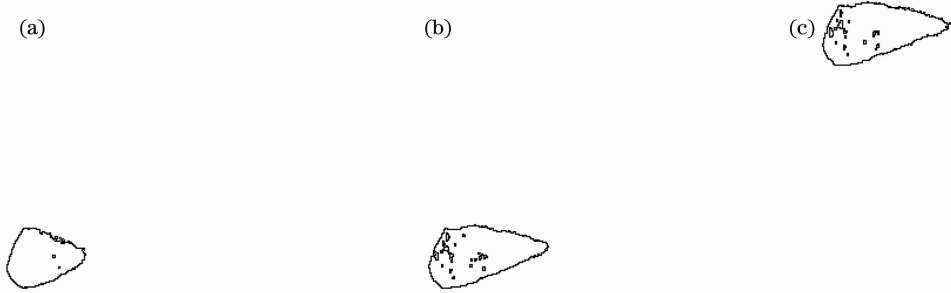


图 6 金刚砂粒子阴影的边缘提取图

Fig. 6 Edge detecting function of carborundum shadow

由图 6 的三幅图像中,提取像素灰度值为 0(黑色)且在横向方向位于最右侧的像素坐标,将其定义为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$, 应得到

$$\begin{cases} y_1 = y_2 \\ \Delta S = S_1 - S_2 = x_2 - x_1 \\ x_2 = x_3 \\ D' = y_3 - y_2 \end{cases}$$

实验时选取实际位移 $D = 400 \mu\text{m}$ 。图 6 中阴影顶点的坐标分别为 $(162, 42), (200, 43), (199, 233)$ (单位: pixel, 以图像的左下角为坐标原点), 可计算得微小粒子的像素高度为 $H' = \frac{200-162}{\sqrt{3}-\frac{1}{\sqrt{3}}} = 32.9 \text{ pixel}$, 放大

倍率为 $\beta = \frac{400}{233-43} (\mu\text{m}/\text{pixel})$ 最终得到微小粒子的高度为 $69.3 \mu\text{m}$, 与筛选法选取的粒子大小范围相符。

将同一粒子顺时针分别旋转 90° 与 180° , 分别进行重复测量, 测量得到的微小粒子高度分别为 $69.1 \mu\text{m}$ 与 $68.5 \mu\text{m}$ 。旋转 180° 的微小粒子阴影如图 7 所示。

针对大量微小粒子做了重复性实验, 实验数据表明: 通过显微投影法得到的粒子高度数值与筛选法的结

图 7 微小粒子顺时针旋转 180° 得到的阴影图像Fig. 7 Shadow pictures of carborundum after clockwise rotation of 180°

果相符,所测得的粒子高度数值可信;同一粒子在不同角度下重复测量的高度结果基本一致,误差小于3.3%,证明了这一测量方法的可行性与准确性。

4 结 论

提出了一种基于显微投影成像法测量不规则形状微小粒子高度的方法。该方法利用显微成像法获取两束不同角度入射光下粒子阴影长度的像素差,利用已知位移实时测量显微成像系统的长度/像素转换系数;结合阴影长度的像素差和长度/像素转换系数可获得粒子阴影的实际长度差;根据粒子阴影的实际长度差和几何光学原理即可得到被测粒子的实际高度。搭建了显微投影微小粒子高度测量系统,并通过实际测量加以验证,实现了高度为60~90 μm 的微小粒子的高度测量。

参 考 文 献

- 1 C. F. Bohren, O. R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [M]. New York: Wiley, 1983
- 2 Zhang Baoming. Particle Size Measurement and Distribution Parameter Statistics Based on Image Processing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002
张宝明. 基于图像处理的粒子尺寸测量和分布统计[D]. 天津: 天津大学, 2002
- 3 Li Enbang, Li Zhiping, Li Chun *et al.*. Numerical analysis of following behaviors of particle tracers in turbulence[J]. *Chinse J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(2): 225~231
李恩邦, 李志平, 李 淳 等. 湍流中示踪粒子跟随性的数值分析[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(2): 225~231
- 4 Wang Naining. Optical Particle Size Measurement and its Application[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2000
王乃宁. 颗粒粒径的光学测量技术及应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2000
- 5 Li Chunli. Pictures under Optical Microscope and Scanning Electron Microscope [M]. Beijing: China Machine Press, 1983
李春立. 光学与扫描电子显微镜照片[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 6 Yasuhiro Harada, Terutoshi Murakami. Method for the time-resolved measurement of the size and position of a moving particle using an image sensor [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(33): 4921~4929
- 7 Zhang Xuejun, Zuo Chuncheng, Wen Weili *et al.*. Measurement of sparse scatter particulates based on computer vision[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(4): 611~614
张学军, 左春桢, 文伟力 等. 基于计算机视觉的微观稀疏离散粒子尺寸的检测[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(4): 611~614
- 8 Zheng Gang, Cai Xiaoshu, Wei Jingming *et al.*. A study on measurement lower-limit of particle sizer with light extinction [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1998, **19**(5): 503~507
郑 刚, 蔡小舒, 卫敬明 等. 消光法测量微粒尺寸的测量下限的研究[J]. 仪器仪表学报, 1998, **19**(5): 503~507
- 9 Ge Baozhen, Zhang Yimo, Li Heqiao *et al.*. Laser scattering system for simultaneously measuring the size distribution and velocity of particle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(6): 11~15
葛宝臻, 张以谟, 李贺桥 等. 同时测量粒子尺寸和速度激光散射系统[J]. 光电工程, 1997, **24**(6): 11~15
- 10 Pan Yansheng, Zeng Zhoumo, Wu Weiting *et al.*. Particle size measurement based on PDA[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1998, **35**(12): 30~33
潘寅生, 曾周末, 吴慰挺 等. 基于 PDA 的微粒尺寸测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 1998, **35**(12): 30~33
- 11 Deng Yong, Lu Qiang, Luo Qingming. Measurement of particle size distribution and refractive index using azimuth-resolved based diffuse backscattering light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1214~1219
邓 勇, 鲁 强, 骆清铭. 用基于方位分辨的漫后向散射光确定粒子尺寸分布及相对折射率[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1214~1219
- 12 Xiao Hongbo, Chen Gang. An experimental research on particle size and volume concentration based on light scattering[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(4): 635~638
肖宏波, 陈 刚. 光散射法测量颗粒尺寸、浓度的实验研究[J]. 应用光学, 2009, **30**(4): 635~638
- 13 L. Denis, C. Fournier, T. Fournel. Direct extraction of the mean particle size from a digital hologram [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(5): 944~952
- 14 V. Palero, M. P. Arroyo, J. Soria. Digital holography for micro-droplet diagnostics [J]. *Experiments in Fluids*, 2007, **43**(2): 185~192
- 15 Lü Qieni, Ge Baozhen, Gao Yan *et al.*. Simultaneous measurement of size and velocity of alcohol spray with digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 266~270
吕且妮, 葛宝臻, 高 岩 等. 乙醇喷雾场粒子尺寸和速度的数字全息测量[J]. 光子学报, 2010, **39**(2): 266~270