

基于改进高斯拟合晶圆切割道边缘检测与质量评价^{*}

冯玉娇 张 静 赵文辉 王永在

(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘 要: 晶圆切割道的崩口缺陷严重影响晶圆的切割品质,亟需高精度检测技术支撑质量评估。提出了一种高斯拟合的亚像素边缘检测方法。首先优化图像质量,并通过感兴趣区域(ROI)提取分离切割道特征;其次实现像素级边缘的精准初定位;最后以像素级边缘点为中心选取边缘点,利用高斯峰值位置估算的亚像素边缘检测算法,通过高斯积分曲线拟合求解亚像素坐标,并结合随机采样一致性(RANSAC)直线拟合与基于密度的空间聚类(DBSCAN)完成异常区域的识别与量化。实验以白光干涉仪测量结果为基准,对 20 处切割道样本检测显示:误差范围为 $-1.92 \sim 3.73 \mu\text{m}$,与 Zernike 矩亚像素算法、插值法及传统高斯拟合算法相比,所提方法误差较低,稳定性较好。可为工业化批量检测提供可靠技术方案。

关键词: 亚像素边缘检测;高斯拟合;切割道质量检测;崩口量化

中图分类号: TP391;TN407 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3099

Wafer dicing lane edge detection and quality evaluation based on improved gaussian fitting

Feng Yujiao Zhang Jing Zhao Wenhui Wang Yongzai

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Chipping defects on wafer dicing lanes severely impair wafer dicing quality, creating an urgent need for high-precision detection technology to support quality assessment. This paper proposes a sub-pixel edge detection method based on Gaussian fitting. First, image quality is optimized, and dicing lane features are isolated through region of interest (ROI) extraction. Second, accurate initial localization of pixel-level edges is achieved. Finally, edge points are selected with the pixel-level edge point as the center; a sub-pixel edge detection algorithm based on Gaussian peak position estimation is used to calculate sub-pixel coordinates via Gaussian integral curve fitting. Combined with random sample consensus (RANSAC) line fitting and density-based spatialclustering of applications with noise (DBSCAN) clustering, the identification and quantification of abnormal regions are completed. Experiments were conducted using white light interferometer measurements as the reference. Tests on 20 dicing lane samples show that the error range is $-1.92 \sim 3.73 \mu\text{m}$. Compared with the Zernike moment sub-pixel algorithm, interpolation method, and traditional Gaussian fitting algorithm, this method exhibits lower error and better stability, and can provide a reliable technical solution for industrial batch detection.

Keywords: sub-pixel edge detection;Gaussian fitting;dicing lane quality detection;chipping quantification

0 引 言

晶圆是制作集成电路时使用的圆形半导体硅片^[1]。在制造的后端环节,沿切割道的物理分离是关键工序,切割道边缘的微观异常如局部崩口、轮廓偏移即使在微米级别也可能导致封装失效^[2]。

边缘检测方法通过检测图像的灰度变化判断边缘位置^[3],高金龙等^[4]采用图像直方图对切割道边缘进行检测,将

边缘利用 Hough 变换的线检测拟合成两条平行的直线,利用切割道边缘面积和 Hough 检测的平行双切割道直线的面积差计算出崩口。尚勋等^[5]针对切割片边缘缺口多样性,利用切割片的边缘信息,引入欧氏距离差值法来筛选出边缘轮廓中差值较大的像素点坐标,从而得到缺口边缘轮廓点集,但检测精度为像素级。仓跃等^[6]为检测注塑制品缺陷,利用二值化突出边缘信息进行骨架提取,利用直线斜率判断的方式将异常区域作为缺陷检测出来,识别率达到 97.8%。

收稿日期:2025-10-18

^{*} 基金项目:辽宁省科技计划联合计划(技术攻关计划)(2024JH2/102600216)项目资助

针对以上问题,本文提出基于高斯拟合的晶圆切割道边缘检测方法,首先对采集的晶圆图像的进行预处理,获取感兴趣区域(region of interest, ROI),通过优化图像质量,精准分离切割道特征,为后续检测奠定基础;再用8方向Sobel梯度融合Canny算法;改进传统2方向梯度局限,实现像素级边缘的精准初定位,有效解决漏检问题;以像素级边缘点为中心,利用高斯峰值估算与积分曲线拟合求解亚像素坐标,结合随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)直线拟合与基于密度的空间聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)算法,构建工业标准异常量化体系,完成从定位到评估的闭环,提升亚像素定位稳定性与异常识别准确性。

1 视觉测量系统

1.1 视觉测量系统的组成

视觉测量系统如图1所示。该系统由工业CMOS相机、远心镜头、环形光源及计算机组成,相机型号为MV-CA004-10GM/C,分辨率达720 pixel×540 pixel,最大帧率为312.9 FPS,支持自动曝光控制,像素尺寸为6.9 μm;搭配的WWH40-65CT远心镜头,物方工作距为65 mm,视野范围为1.6 mm×1.2 mm。环形光源采用多波段单色光组合设计,其光谱构成包括红色波段波长范围620~630 nm、蓝色波段波长范围460~475 nm及绿色波段波长范围520~530 nm,且支持0%~100%连续光强调节功能,可根据晶圆表面反光特性及成像需求动态优化照射强度。系统开发环境采用Python3.9与OpenCV4.7的组合,为后续图像处理与检测算法的实现提供支持。

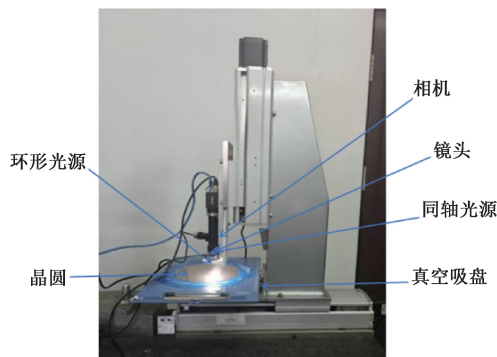


图1 视觉测量系统

Fig.1 System of visual measurement

1.2 晶圆切割分析

晶圆有多种规格尺寸,其表面具有典型的阵列结构:相邻晶粒间预留50~100 μm宽的切割道,如图2所示,其边缘轮廓理论上为连续平滑直线。实际切割过程中,受金刚石切片刀磨损、进给速度波动等影响,边缘易出现微观异常:当异常深度超过切割道宽度的15%时,会显著增加封装开裂风险。切割道图像特征如图3所示,灰度分布呈现

“中间低、两侧高”的特性,异常区域表现为局部灰度突变。

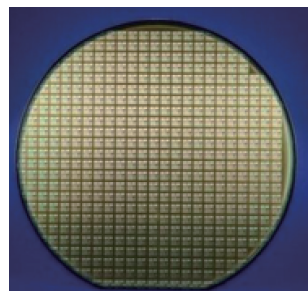


图2 晶圆表面布局

Fig.2 Layout of the wafer surface

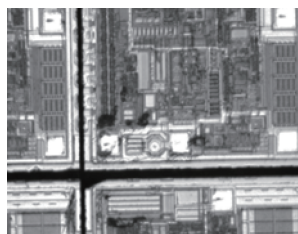


图3 切割道图像

Fig.3 Image of dicing path

2 改进的亚像素拟合算法

亚像素边缘点存在于图像灰度值连续过渡的区域,其灰度梯度即一阶导数服从高斯分布,可通过拟合获取亚像素边缘点位置^[7]。该方法首先通过Canny算法提取图像中的初始边缘轮廓,得到像素级的边缘点集,随后以这些像素级边缘点为中心,其次计算各点的梯度幅值和方向角,将梯度幅值按从小到大排序,依次检查对应位置的方向角与中心边缘点的角度差,选取这些点进行曲线拟合,求解亚像素级边缘坐标。

2.1 Canny边缘粗定位

Canny边缘检测核心是借助数学方法捕捉灰度值突变区域:首先对原始灰度图像进行高斯降噪;其次计算图像梯度;该方法利用Sobel算子的0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°的8方向卷积核近似求解梯度幅值与梯度方向,最后基于梯度幅值和方向进行非极大值抑制,再通过双阈值边界跟踪确定最终边缘,为后续处理奠定基础,求解图像中每个像素在不同方向上的梯度值的公式为:

$$G_i = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 I(x, y) \cdot S_i(i, j) \quad (1)$$

其中, I 为边缘点像素值集合。 S_i 为第 i 个方向的卷积核。

2.2 亚像素边缘定位

晶圆边缘的灰度变化呈平滑过渡,其梯度幅值即灰度变化率的分布符合高斯曲线特征,曲线以真实边缘位置为峰值,左右两侧对称,梯度值从峰值向两端逐渐递减,如图4所示。

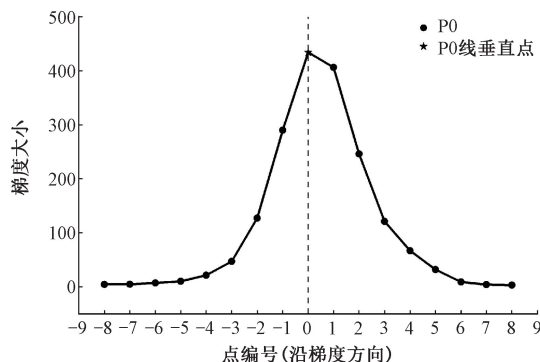


图 4 像素点梯度值

Fig. 4 The gradient value of the pixel points

由图 4 可知当样本采集数量少于 17 时,易导致有效特征信息覆盖不足,使得数据集中的关键有效信号被随机噪声干扰或直接忽略,难以构建具有统计代表性的样本分布模型,进而影响后续算法对目标特征的提取与分析精度,无法准确反映研究对象的真实特性。样本采集数量过多,一方面可能引入大量冗余数据与异常离群样本,增加数据处理的计算复杂度与时间成本;另一方面,过多非核心样本会稀释有效样本的权重占比,导致模型训练或特征分析过程中对关键信息的学习偏向性减弱,使最终分析结果的鲁棒性与可靠性受到影响,难以精准聚焦研究对象的核心特征。故像素边缘的每个边缘点沿梯度方向前后各延伸 8 个像素,采样 17 个点,得到采样点集:

$$P = \{(x_m, y_m, g_m) | m = -8, -7, \dots, 7, 8\} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_m = x + \lfloor \cos \theta_{\max} \times m \rfloor \\ y_m = y + \lfloor \sin \theta_{\max} \times m \rfloor \\ g_m = I(x_m, y_m) \end{cases} \quad (3)$$

其中, g_m 为第 m 个采样点的灰度值, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整函数。

对于采样点,灰度分布近似符合高斯函数:

$$g(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + B \quad (4)$$

其中, B 为背景灰度值。通过最小二乘法求解高斯函数参数,拟合误差:

$$E = \sum_{m=-8}^7 (g_m - g(x_m))^2 \quad (5)$$

取最小值,计算亚像素偏移量 Δx 。

$$\Delta x = \frac{1}{4(k-1)} \sum_{m=1}^{k-1} \left[\frac{p(m) - p(-m)}{p(m) - p(m+1)} - \frac{p(-m) - p(m+1)}{p(-m) - p(-m-1)} + 4 \right] \quad (6)$$

为了直观体现本文高斯峰值位置估算结果的准确性,将其与高斯拟合的曲线峰值进行对比,如图 5 所示。

其中, $p(m)$ 表示采样点 m 的灰度值。结合梯度方向修正边缘点的亚像素坐标 (x, y) , 随后通过式 (7) 计算亚像素坐标, 即:

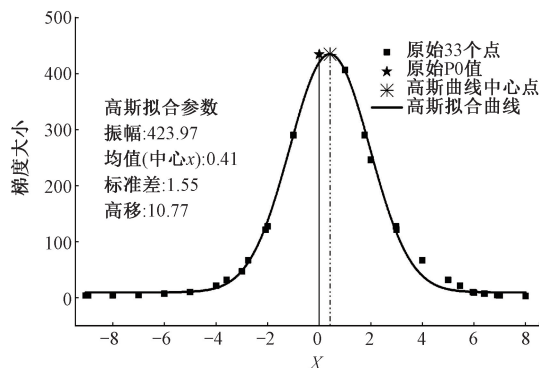


图 5 拟合点像素点位置及原坐标点位置对比

Fig. 5 Comparison of the pixel positions of the fitting points and the original coordinate points positions

$$\begin{cases} x = x + \frac{\Delta x \cos^2(\theta_{\max})}{|\sin(\theta_{\max})| + |c \cos(\theta_{\max})|} \\ y = y + \frac{\Delta x \sin^2(\theta_{\max})}{|\sin(\theta_{\max})| + |c \cos(\theta_{\max})|} \cdot \text{sign}(\sin(2\theta_{\max})) \end{cases} \quad (7)$$

2.3 边缘定位检测

评价边缘定位算法优劣的指标主要用准确度。准确度是用于描述亚像素边缘定位算法提取的边缘与真实边缘相符合的程度^[8], 本文定位准度的验证分别用 Canny 边缘检测, Zernike 边缘检测、插值法边缘检测, 以及本文提出的高斯积分边缘梯度拟合算法对量块局部边缘进行亚像素定位。

图 6 所示实验结果表明, 3 种算法所确定的亚像素边缘具有良好一致性, 这一结果证实了本研究算法在亚像素边缘确定环节的可靠性。鉴于量块测量面精度达 $0.05 \mu\text{m}$, 满足理想基准条件, 故将误差补偿后的成像边缘检测结果拟合为理想直线。进一步对经误差补偿的提取亚像素边缘进行处理, 计算各边缘点到该拟合直线的距离, 结果如图 7 所示, 以此完成边缘定位算法定位准确度的评价。分析图 7 数据可得, 插值法与 Canny 算法的距离值存在显著起伏, 而本研究采用的高斯梯度拟合法, 其距离变化呈现出优异的稳定性, 更适用于高精度边缘检测场景。

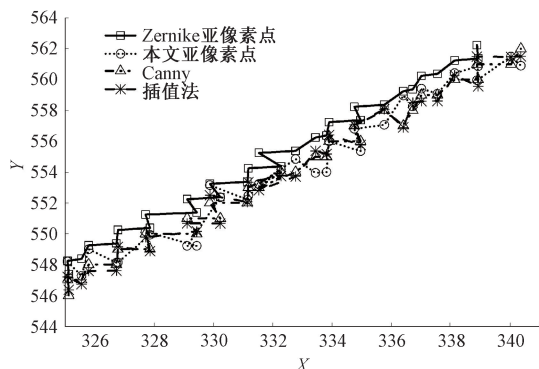


图 6 亚像素边缘定位

Fig. 6 Localization of sub-pixel edges

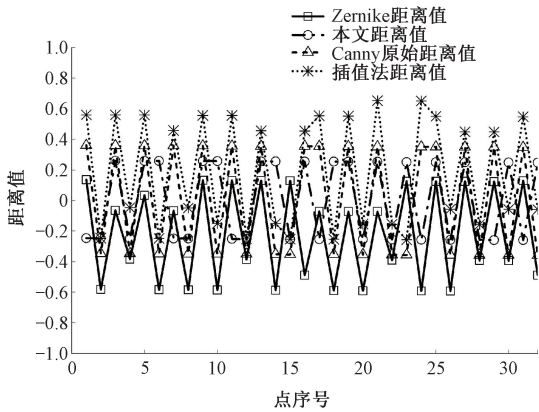


图7 各边缘点到拟合直线的距离

Fig. 7 The distances from each edge point to the fitted straight line

以 $0.05 \mu\text{m}$ 级标准量块为基准,对比本文方法与3种亚像素算法的定位效果,结果显示:本文方法距离波动范围 $\pm 0.30 \mu\text{m}$ 小于 Zernike 矩算法的 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 、插值法 $\pm 0.35 \mu\text{m}$ 及 Canny 法的 $\pm 0.42 \mu\text{m}$,稳定性最优。

3 切割道质量评价

由于晶圆材料的脆性,晶圆切割时导致晶圆切割道的边缘出现崩口,如果崩口区域过大将影响晶圆的功能,导致良品率降低^[9-11]。

3.1 切割道质量检测

通过对切割道图像进行分析,崩口区域可利用 RANSAC 算法拟合的直线与亚像素边缘点形成的区域检测出来,崩口的大小可由面积计算得出,检测算法的具体步骤包括:

- 1) 对采集到的图像进行预处理,降低背景噪声的影响;
- 2) 提取晶圆图像中切割道区域,即 ROI 区域;
- 3) 用 Canny 边缘检测算法提取像素级边缘点坐标;
- 4) 以像素级边缘点为中心,提取 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 范围内的离散点,进行高斯拟合,提取亚像素边缘点;
- 5) 根据亚像素边缘点判断是否存在崩口,存在则计算崩口面积;
- 6) 若判断存在崩口,利用 RANSAC 算法拟合直线,结合亚像素边缘点检测崩口区域。对高斯拟合得到的亚像素边缘点排序,依次计算边缘点与该直线的距离,若距离值连续超过预设阈值;
- 7) 计算崩口区域面积。先基于亚像素拟合边缘点到拟合直线的距离检测缺陷点,将距离大于计算均值的连续点作为缺陷点;再对缺陷点集用 DBSCAN 算法聚类,对于点数大于3的聚类,通过凸包算法生成闭合轮廓,利用格林公式计算面积,返回各缺陷区域的凸包面积值,实现崩口大小的量化分析;
- 8) 若不存在边缘缺陷或距离值未连续超过阈值,进入下一刀痕图像的检测流程,重复上述步骤,直至所有待检测

图像完成检测。

3.2 崩口量化

对于晶圆的缺陷严重程度,采用面积量化,缺陷区域由缺陷点和拟合切割边缘上的对应点,构成闭合多边形。通过获取包裹所有点的最小凸多边形即凸包,再用公式计算面积将视觉上的缺陷转化为可量化的面积数值即可用于缺陷严重程度的客观评估^[12-14]。

通过计算相邻边缘点的梯度方向差,当差值小于设定阈值时,判定为同一连续边缘的点,以此过滤方向突变的噪声点,通过角度差绝对值确保保留的边缘点具有连续方向特征^[15-17]。

基于空间距离聚类,设定聚类参数以区分不同边缘线段。切割道图像崩口区域的判断依据是边缘点与直线的距离是否超过阈值:对高斯拟合获得的亚像素边缘点排序后,依次计算其与直线的距离,若距离值连续超过阈值,则判定为崩口区域计算公式为:

$$\Delta d = \left| \frac{|Ax_1 + By_1 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} - \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \right| \quad (8)$$

$$\Delta d \geq T \quad (9)$$

其中, (x_1, y_1) 为第1点坐标, (x_2, y_2) 为第2点坐标, Δd 为距离差值, A, B, C 为直线方程参数, T 为距离阈值。

对于检测到的缺陷点,计算它们与基准直线围成的区域面积,量化缺陷的严重程度,面积越大,缺陷越明显。按照缺陷点按顺序排列,与基准直线上的对应点组成闭合多边形,来构建缺陷区域。算法为:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)| \quad (10)$$

其中, $x_{n+1} = x_1, y_{n+1} = y_1$, 即首尾相连。

对于缺陷部位的标记如图8所示。其中从左到右分别为部位1,部位2,部位3,部位1面积为 69.8 pixel ,包含14个点,部位2的宽度 $< 1 \text{ pixel}$,故并未计算,部位3面积为 45.7 pixel ,包含10个点。

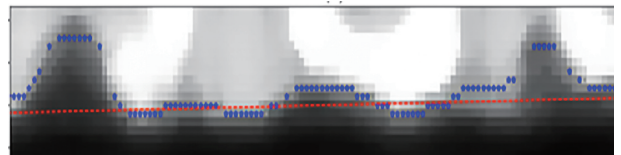


图8 崩口部位标记

Fig. 8 Marking of the fracture site

4 实验验证

4.1 像素当量标定

在视觉测量中,图像处理输出的几何数据以像素为单位,而实际应用需转换为微米级物理尺寸,因此需建立像素

与物理空间的精确映射关系,即像素当量标定。

本研究采用高精度陶瓷点阵标定板作为校准基准,如图 9 所示,其包含 961 个等直径圆,单圆直径 0.2 mm ,尺寸误差 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。通过改进的 Canny 算法结合高斯拟合亚像素定位算法,可获取标定圆边缘点集的亚像素坐标,定位精度 0.1 像素级;针对镜头径向畸变及边缘视场非线性误差,提出中心区域优选策略——选取标定板中心区域标记圆作为校准对象,利用其物理尺寸恒定性规避边缘畸变影响。

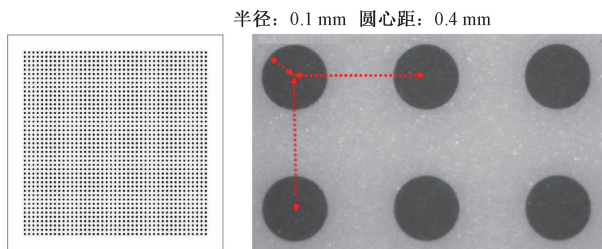


图 9 陶瓷点阵标定板

Fig. 9 Calibration plate of Ceramic dot matrix

为提升圆心定位精度,采用加权最小二乘法进行圆拟合:以边缘梯度幅值为权重,构建边缘点到拟合圆的距离平方和目标函数,实现圆心坐标的高精度估计,该方法在噪声环境下仍保持亚像素级精度,圆心定位重复性误差优于 0.05 pixel ^[18-20]。

像素当量标定过程为:计算中心区域标定圆的半径像素值平均值,与实际物理半径 0.1 mm 对比,即可确定系统像素当量。像素当量的平均值为 $1.716\text{ }78\text{ }\mu\text{m/pixel}$ 。

通过分析标定板不同位姿下的标定结果,验证了方法的稳定性,固定物距与光照条件下结果稳定;以显微镜测微尺上半径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的圆形为检验对象,算法测得其半径为 58.249 pixel ,经转换后物理尺寸为 $99.94\text{ }\mu\text{m}$,误差为 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 。

4.2 边缘检测精度验证

量块边缘仅具备测量面精度高的单一特征,与晶圆切割道边缘存在显著差异^[21]。为验证所提边缘检测方法对晶圆切割道边缘的适配性,实验选取含典型切割道特征的图像作为样本,并从中截取切割道核心区开展宽度测量^[22];以像素大小为 0.19 nm 、显示分辨率可达 0.001 nm 的白光干涉仪测量结果作为计量基准,通过对比该基准数据与本文方法的实验检测结果,实现对边缘检测误差的量化评估。切割道的测量区域图像如图 10 所示,不同颜色代表表面高度不同,图中白色的点为随意选取的点,主要通过判断两点之间的点的高度变化来测量切割道的宽度。

白光干涉仪的测量原理为:通过内置功能检测晶圆检测表面不同高度的轮廓变化,定位切割道上下边缘的边界坐标,进而计算并读取切割道宽度,其测量操作界面中,图 11 里呈现的空白部分即为切割道的宽度。一方面,其输出的曲线图能直观呈现切割道沿某一方向的高度变化情况,可清晰捕捉到如崩口等缺陷处的高度突变;另一

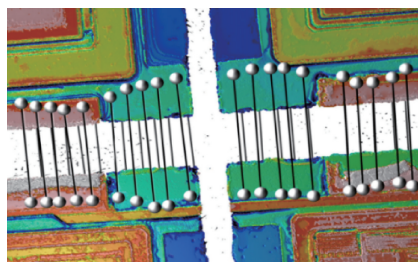


图 10 白光干涉仪拍摄的切割道测量区域图像

Fig. 10 Image of the measurement area of the dicing path captured by the white light interferometer

方面,形貌图以彩色及三维呈现的方式,更直观地展示了切割道区域的立体结构,包括切割道本身以及周围相关结构的形态,有助于从整体上把握切割道的形貌特征,为后续基于亚像素边缘检测等方法的崩口缺陷量化分析提供了可靠的基准测量依据,保障了晶圆切割质量评估的准确性与科学性。

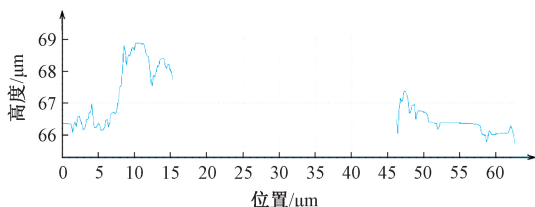


图 11 白光干涉仪切割道宽度测量核心数据截图

Fig. 11 Core data screenshot of the width measurement of the dicing channel in the white light interferometer

选取相同位置的点与白光干涉仪输出的宽度测量结果进行误差比对,该测量方法的原理示意图如图 12 所示,图 13 为单个测量示意图。

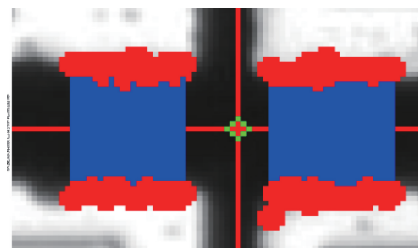


图 12 测量示意图

Fig. 12 Instrumentation plan

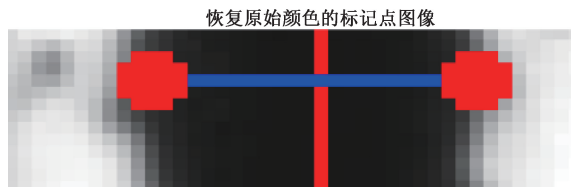


图 13 单个测量示意图

Fig. 13 Single instrumentation plan

针对切割道区域的检测实验采用如下方案设计:选取

包含典型切割道特征的图像作为实验样本,从中选取处切割道区域进行宽度测量。为提升数据的统计代表性,将 20 处测量点依据不同的表面高度,能够涵盖典型切割道形貌特征,划分为 4 组实验单元,每组包含 5 处不同空间位的切割道宽度测量样本。该分组测量设计通过增加空间采样的多样性,可有效削弱单一区域测量偏差对整体结果的干扰,为后续精度分析提供更可靠的实验数据支撑。最终的测试结果如表 1 所示。

表 1 白光干涉仪检测与本文测量切割道宽度测量结果对比
Table 1 Comparison of the measurement results of the dicing groove width obtained by the white light interferometer with those obtained in this paper μm

序号	组别	白光干涉仪 测量长度	本文检测 长度	误差
1	1	30.99	34.32	3.33
2	1	31.93	33.46	1.53
3	1	30.06	32.60	2.54
4	1	30.97	32.60	1.63
5	1	29.63	31.75	2.12
6	2	31.86	30.89	-0.97
7	2	30.27	32.61	2.34
8	2	30.54	33.46	2.92
9	2	30.39	33.46	3.07
10	2	30.37	31.75	1.38
11	3	31.15	30.89	-0.26
12	3	31.33	30.03	-1.30
13	3	31.95	30.03	-1.92
14	3	31.66	34.32	2.66
15	3	31.17	34.32	3.15
16	4	31.37	34.32	2.95
17	4	30.59	34.32	3.73
18	4	29.69	30.89	1.20
19	4	32.39	33.46	1.07
20	4	32.46	34.32	1.86

对 4 组切割道宽度检测实验数据进行统计分析,结果为:

数据统计特征误差分布范围:检测误差介于-1.92~3.73 μm 。整体精度水平:所有样本的平均误差为 1.65 μm ,平均绝对误差为 2.10 μm ,显示检测值与实际物理尺寸的整体偏差较小;组内一致性:4 组实验的组内误差标准差依次为 0.66、1.48、2.07、1.03 μm 。极端值影响:最大误差 3.73 μm 与最小误差 -1.92 μm ,占样本总量的 10%。

5 结 论

本研究首先采用各向异性扩散滤波抑制图像噪声,同时保留边缘细节;结合伽马变换校正晶圆表面因反光导致的灰度不均,使图像灰度标准差从 45 降至 18,为后续边缘提取奠定高质量图像基础。其次,通过 8 方向 Sobel 梯度优化的 Canny 算法获取像素级边缘;斜向边缘捕捉率从 75.3%提升至 98.7%,有效解决斜向边缘漏检问题;再以像素级边缘点为中心,构建 3×3 邻域并提取 17 个采样点,采用加权高斯拟合实现亚像素级边缘定位,该加权策略可降低背景噪声对拟合的干扰,使亚像素定位偏差较传统高斯拟合降低 40%,最后,采用 RANSAC 直线拟合构建切割道理想边缘直线,结合 DBSCAN 聚类筛选连续异常点,通过格林公式计算崩口区域凸包面积,完成异常量化。该方法可满足半导体制造中晶圆切割质量的高精度检测需求,为工业化批量检测提供可靠技术方案。

实验数据验证了该方法的有效性:进行了 20 处晶圆切割道宽度测量实验;采用白光干涉仪作为精度基准,通过该设备采集每处样本的切割道宽度真实值,与本文方法的检测值进行误差对比,以此量化方法精度。该方法的检最大误差为 3.73 μm ,最小误差为-1.92 μm ,低于晶圆切割质量检测的工业允许误差阈值(通常 $\leq 5 \mu\text{m}$)。

参考文献

[1] 胡志强,吴一全. 基于机器视觉的半导体晶圆缺陷检测方法综述[J]. 中国图象图形学报,2025,30(1):25-50.
HU ZH Q, WU Y Q. Survey of semiconductor wafer defect detection method based on machine vision[J]. Journal of Image and Graphics, 2025, 30(1): 25-50.

[2] 李君斌,李太龙,鄢宇扬,等. 3D NAND FLASH 晶圆切割技术原理及其特征分析[J]. 中国集成电路,2021,30(12):61-66.
LI J B, LI T L, YAN Y Y, et al. The principle and characteristic analysis of 3D NAND FLASH wafer cutting technology[J]. China Integrated Circuit, 2021, 30(12): 61-66.

[3] JIAO SH B, YANG W, WU CH Y, et al. Mixed-type micro-defect detection in semiconductor Wafers: A dual-modal feature real-time detection approach via optical topography and lightweight classification network[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, 160: 15.

[4] 高金龙,胡海燕,高阳,等. 面向 QFN 封装视觉定位系统[J]. 电子工业专用设备,2019,48(6):26-30,44.
GAO J L, HU H Y, GAO Y, et al. The vision positioning system for QFN packaging[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2019, 48(6): 26-30,44.

[5] 尚勋,周骅,赵麒. 基于数字图像的切割片缺口检测[J]. 自动化与仪表,2025,40(3):102-105,109.
SHANG X, ZHOU H, ZHAO Q. Cutting chip notch detection based on digital image[J]. Automation & Instrumentation, 2025, 40(3): 102-105,109.

- [6] 仓传跃,徐志鹏,周彬.基于机器视觉的注塑件缺陷检测方法[J].塑料,2025,54(1):149-153,188.
CANG CH Y, XU ZH P, ZHOU B. Machine vision based defect detection method for injection molded parts[J]. Plastics, 2025, 54(1): 149-153,188.
- [7] 柴瑞武,陈乐,何海森.基于改进亚像素算法的陶瓷天线 PIN 针在线精密检测[J].电子测量与仪器学报,2023,37(11):170-177.
CHAI R W, CHEN L, HE H S. Online precision detection of ceramic antenna PIN needle based on improved sub-pixel algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 170-177.
- [8] CHENG W, GAO F, LI Y, et al. A machine vision-based dimension measurement method of shaft parts with sub-pixel edge[J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36: 055026.
- [9] 刘桂雄,张瑜,蔡柳依婷.机器视觉检测图像拼接融合技术研究进展[J].中国测试,2020,46(1):1-6.
LIU G X, ZHANG Y, CAIL Y T. Overview of image blending technique in machine vision detection[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(1): 1-6.
- [10] 段振云,王宁,赵文珍,等.基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法[J].仪器仪表学报,2017,38(1):219-225.
DUAN ZH Y, WANG N, ZHAO W ZH, et al. Sub-pixel edge location algorithm based on Gauss integral curved surface fitting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 219-225.
- [11] 张喜民,余奇颖,张金博,等.基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(10):47-54.
ZHANG X M, YU Q Y, ZHANG J B, et al. Research on precision measurement method for mobile phone tail plug part based on machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 47-54.
- [12] 杨硕,陆向宁,何贞志,等.基于机器视觉的喷嘴外形关键尺寸检测系统[J].电子测量技术,2022,45(17):107-112.
YANG SH, LU X N, HE ZH ZH, et al. Detection system of key size of jet nozzle based on machine vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 107-112.
- [13] 张庆辉,冯斌.基于边缘检测的盲人图像感知系统设计[J].传感器与微系统,2019,38(6):112-114.
ZHANG Q H, FENG B. Design of blind image perception system based on edge detection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(6): 112-114.
- [14] LI Q H, ZHAO W T, CHENG S Y, et al. Research on concentricity detection method of automobile brake piston parts based on improved Canny algorithm[J]. Applied Sciences-Basel, 2025, 15(8):4397.
- [15] 洪涛,程诚.振动条件下的尼龙拉链厚度尺寸视觉在线测量算法[J].计量学报,2021,42(4):451-457.
HONG T, CHENG CH. Visual on-line measurement algorithm for thickness dimension of nylon zipper under vibration condition[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(4): 451-457.
- [16] 许斌,徐凡颖,辛若铭.基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸视觉测量方法[J].仪器仪表学报,2022,43(5):128-135.
XU B, XU F Y, XIN R M. A visual measurement method for feature size of pendulum substrate based on regional gray gradient difference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 128-135.
- [17] 陈庭欣,姚俊杰,赵毅.基于机器视觉的电池模组极柱焊接缺陷检测[J].组合机床与自动化加工技术,2025(5):136-139,144.
CHEN S X, YAO J J, ZHAO Y. Welding defect detection of battery module pole based on machine vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(5): 136-139,144.
- [18] 戴先鑫,付振山,马栋,等.基于感兴趣区域的螺栓位姿及尺寸检测研究[J].电子测量技术,2024,47(8):134-140.
DAI X X, FU ZH SH, MA D, et al. Research on bolt pose and size detection based on region of interest[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(8): 134-140.
- [19] 段振云,王宁,赵文辉,等.基于点阵标定板的视觉测量系统的标定方法[J].光学学报,2016,36(5):151-159.
DUAN ZH Y, WANG N, ZHAO W H, et al. Calibration method based on lattice calibration plate in vision measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5):115-159.
- [20] 蒋存波,李昕烨,金红,等.注塑件机器视觉缺陷检测的几何矫正方法研究[J].电子测量技术,2024,47(4):127-135.
JIANG C B, LI X Y, JIN H, et al. Research on geometric correction method for machine vision defect detection of injection molding parts[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4): 127-135.
- [21] 关华深,张俊杰,屈盛官,等.架空导线压接对边距的图像测量方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(3):236-244.
GUAN H SH, ZHANG J J, QU SH G, et al. Image measurement of edge distance of the crimped overhead wire[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 236-244.
- [22] 宋佳声,李浩天.一种在尺度空间下基于边缘的角点目标检测方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(2):58-66.
SONG J SH, LI H T. Edge-based target corner point detection method in scale space[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 58-66.

作者简介

冯玉娇,硕士研究生,主要研究方向为视觉测量。

E-mail:1281384568@qq.com

赵文辉(通信作者),博士,教授,主要研究方向为数字化制造与精密测量。

E-mail:zhaowenhui@sut.edu.cn