

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108113

用于晶圆键合的对准标记定位算法*

鲁沛昕^{1,2}, 杨开明^{1,2}, 鲁森^{1,2}, 朱煜^{1,2}

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084; 2. 清华大学摩擦学国家重点实验室 北京 100084)

摘要:对准标记精确定位是晶圆键合精度实现的关键,为了提高对准标记定位算法的精度、实时性及适应性,提出了一种基于边缘检测拟合定位的高精度对准标记定位算法。该方法结合分级金字塔模型对对准标记进行逐级定位,获得像素级的目标区域粗定位结果,根据目标区域粗定位结果,结合 Canny 检测器与改进的高斯拟合法,对对准标记的亚像素轮廓进行拟合,在此基础上结合中心对称的对准标记特征,利用改进后的最小二乘法快速拟合对准标记的中心位置,实现对对准标记的精确定位。通过实验验证了该方法的有效性,实验结果表明,提出的对准标记定位算法在快速定位目标区域的同时,可实现约 0.06 μm 的重复定位误差,满足了晶圆键合对准的精度、实时性和适应性的需求。

关键词:晶圆键合对准;对准标记定位;高精度;亚像素

中图分类号: TP391.4 TH822 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 520.60

A high-precision positioning algorithm of alignment mark for wafer bonding

Lu Peixin^{1,2}, Yang Kaiming^{1,2}, Lu Sen^{1,2}, Zhu Yu^{1,2}

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The accurate positioning of the alignment mark is key to wafer bonding accuracy. To improve the accuracy, speed and adaptability of the alignment mark positioning algorithm, a high-precision alignment mark positioning algorithm based on edge detection and fitting positioning is proposed. The method combines the hierarchical pyramid model to locate the alignment mark stepwise, and achieve the pixel-level coarse positioning result of the target area. According to the coarse positioning result of the target area, the method combines the Canny detector and the improved Gaussian fitting method. In this way, the sub-pixel contour of the alignment mark is fitted. On this basis, the center position of alignment mark is quickly fitted by the center symmetrical alignment mark feature and the improved least square method to realize accurate positioning of the alignment mark. The effectiveness of the method is evaluated through experiments. Results show that the proposed alignment mark positioning algorithm can locate the target area quickly while the repeat positioning error is about 0.06 μm , which satisfies the requirements of wafer bonding alignment in terms of accuracy, speed and adaptability.

Keywords: wafer bonding alignment; alignment mark positioning; high-precision; sub-pixel

0 引言

晶圆对准是晶圆键合过程非常重要的环节之一,直接决定晶圆键合的质量。对晶圆对准标记(以下称 Mark)的精确定位是实现晶圆对准的关键环节。实际的对准过程中对准标记的成像效果容易受到光照、噪声、光学镜头及视觉传感器等因素的影响,导致对准标记的成

像质量受到制约,因而对晶圆 Mark 识别定位算法提出了更高的要求^[1-3]。目前已有晶圆对准项目主要采用康耐视公司的 VisionPro 软件进行晶圆 Mark 识别定位,但此软件需使用康耐视公司相应硬件设备和计算设备,极大提高了系统成本,降低了系统整体性。因此需研究可替代 VisionPro 定位算法的视觉算法,在提高定位精度和速度的同时,后续也可将视觉算法和控制算法同时部署在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)

收稿日期:2021-06-17 Received Date: 2021-06-17

* 基金项目:摩擦学国家重点实验室基金(SKLT2020D23)项目资助

等硬件上,提高系统整体性和运行速度,降低系统成本。

目前主流 Mark 定位算法可分为两类:边缘检测拟合定位算法与模板匹配定位算法。边缘拟合法基于边缘检测算子检测轮廓边缘,在边缘基础上拟合轮廓中心,此类方法对边缘检测精度和中心拟合精度要求较高,主要针对圆形、矩形及十字等形状 Mark^[4-6]。基于模板匹配的目标定位算法以模板图像和原始图像的相似度为依据,在原始图像上寻找具有相同或相似特征的区域,具体包括:1) Ballard 等^[7]通过检测图像边缘几何元素来衡量相似度,这种方法占用图像处理系统的资源较多,效率不高;2) Di 等^[8]利用不受线性变化光强影响的归一化互相关系数(normalized cross-correlation, NCC)来计算原始图像和模板的相似度,继而得到相似度最高的区域;3) Kwon 等^[9]利用模板图像边缘点和原始图像边缘点的 Hausdorff 距离来衡量相似度,减少了物体被遮挡带来的影响;4) Ulrich 等^[10]计算目标边缘的描述算子来衡量相似度,实现了高精度的目标定位。

基于以上方法,许多学者展开了 Mark 定位算法的研究,张舞杰等^[11]基于改进的随机抽样一致(random sample consensus, RANSAC)算法进行椭圆 Mark 定位,有着较高的定位精度,然而 RANSAC 算法需要多次迭代,耗时较长且稳定性较差;周欣等^[12]利用 hough 变换方法检测圆形 Mark 中心,耗时较长,工程应用价值较小;Zou 等^[13]利用轮廓拟合法定位十字 Mark 的中心,定位误

差为 1 pixel,无法满足工程需求;徐兵等^[14]基于自归一化积相关方法(self-normalized cross correlation, SNCC)实现了十字中心对称 Mark 的准确定位,但是计算量过大,无法满足实时性要求;刘磊等^[15]基于形状模板匹配实现了亚像素级的十字 Mark 定位,定位误差在 0.25 pixel。

以上相关研究的定位算法主要针对圆形 Mark 和十字 Mark,通用性不足,同时定位精度较差,无法满足晶圆键合对准的精度和速度需求。

本文提出一种快速的 Mark 定位方法,该方法通过分级金字塔模型实现目标区域(region of interest, ROI)快速粗定位,首先定位 Mark 所在 ROI 区域,然后在 ROI 区域内进行 Mark 的高精度定位;为提高定位精度,采用改进后的高斯拟合方法提高轮廓边缘定位精度;利用最小二乘法拟合 Mark 中心,提高了算法的适应性,获得高精度的轮廓中心定位。

1 高精度 Mark 定位算法

为实现快速的高精度定位算法,采用粗精定位+亚像素的技术路线,分 4 个阶段求取 Mark 中心。实现流程如图 1 所示。首先提取 ROI 区域,为提高定位精度,需要对 ROI 区域进行预处理,对预处理之后的 ROI 区域提取亚像素轮廓,最后根据亚像素轮廓拟合中心,得到 Mark 准确位置。

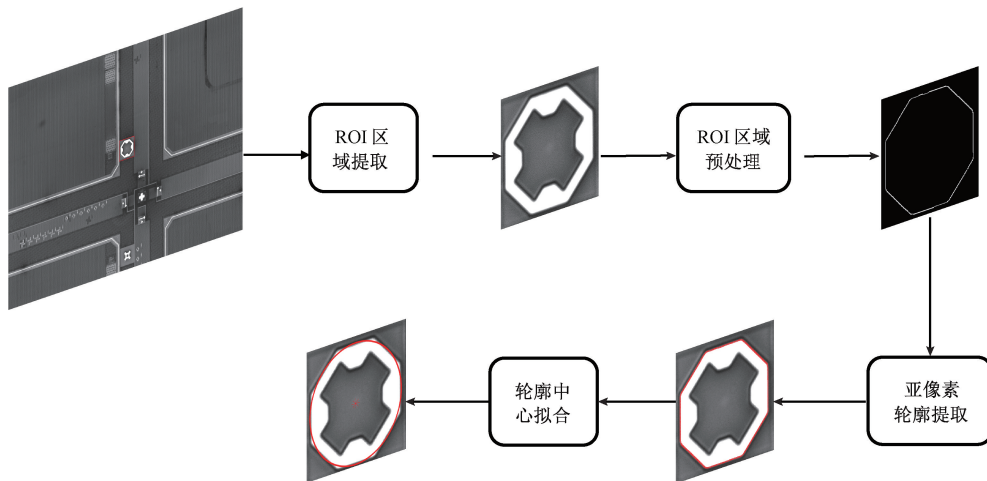


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

1.1 ROI 区域提取

待提取区域如图 1 所示,视场范围干扰较少,拟采用模板匹配算法提取 ROI 区域,然而,直接在 2 748×3 480 的范围内直接提取 232×232 ROI 区域耗时过长,无法满足实时性要求,拟采用分级金字塔提高计算速度,如图 2 所示,在原始 Level 1 级图像基础上逐级分层计算,逐步

得到所需的 ROI 区域。

Level 1 层为原图像,如图 1 所示,利用 bicubic 插值法,将 Level 1 层图像进行 10 倍降采样,得到 275×384 的 level 2 层图像,降采样过程保留了 level 1 层图像特征信息,不影响 Mark 粗定位范围的识别,但极大降低了计算量。

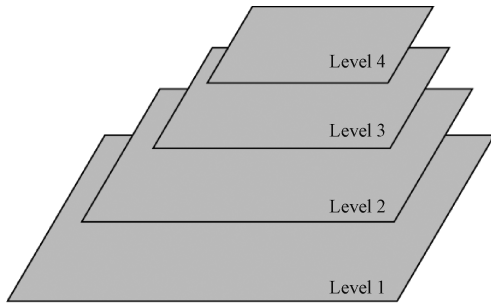


图2 分级金字塔模型

Fig. 2 Hierarchical pyramid model

若直接在 level 2 层图像上做模板搜索匹配,计算量过大,观察图像可知,在 Mark 处的灰度值较大,其余像素处灰度值较小,具体灰度分布如图 3(a)所示,实线框内为 ROI 区域,可设置合理阈值分割 Mark 区域和其余像素,阈值分割后图像如图 3(b)所示,所需的 Mark 特征得以保留,可在实线框内搜索所需 Mark 初始范围。

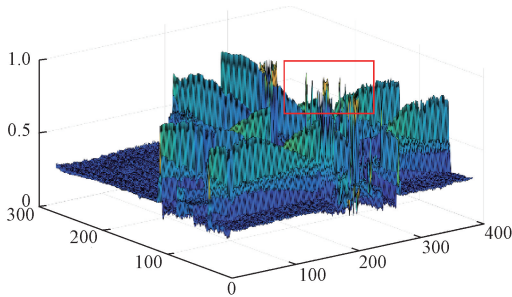
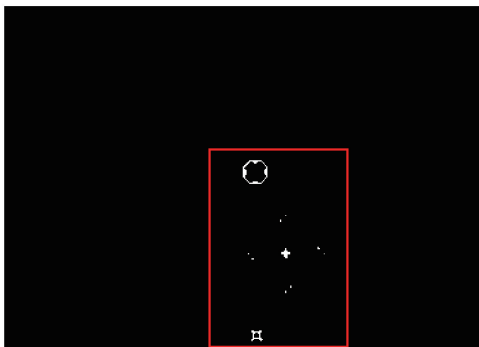
(a) Level 2 层图像灰度分布
(a) Gray distribution of Level 2(b) Level 2 层阈值分割后图像
(b) Results after threshold segmentation of Level 2

图3 Level 2 层图像特征

Fig. 3 Image feature of Level 2

如图 3(b)所示,为得到图 2 所示 Mark 的有效范围,可固定 23×23 的搜索范围,在图像上定步长搜索,步长设置为 4,由于 Mark 范围内像素值为 1 的像素占较大,可凭 23×23 范围内灰度最大值确定 Mark 区域,区域确定后可在原图中得到 Mark 所在的有效区域,得到 level 3 层图像,如图 4(a)所示。

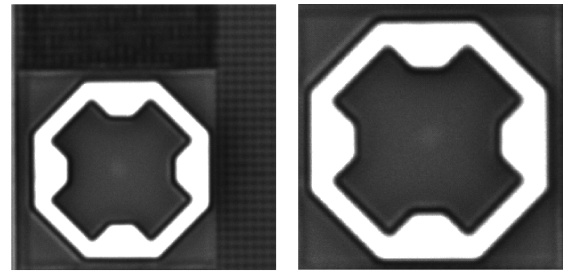
(a) Level 3 层图像
(a) Image of Level 3(b) ROI 区域
(b) ROI region

图4 像素级 ROI 区域求解结果

Fig. 4 Solution result of pixel-level ROI region

为从 level 3 层图像得到 Mark 的准确区域,需在图像范围内定步长搜索,若步长太小会致搜索计算量过大,此处采用粗精搜索结合方式,初步设定步长为 5,匹配因子可以选取 NCC、均方误差(mean square error, MSE)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)等,结合应用场景和因子计算量,采取 MSE 因子。

MSE 计算方式如式(1)所示,为提高对比度,采用 MSE 指标的导数作为搜索结果,如图 4(b)所示,可以得到 ROI 区域附近的图像,在最大值处向四周扩展 5 pixel,进行步长为 1 的搜索,可以得到如图 2 所示 ROI 区域的准确位置,完成像素级 ROI 区域提取。

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f'(i,j) - f(i,j))^2 \quad (1)$$

1.2 ROI 区域预处理

为提高定位精度,减少噪声影响,需要对 ROI 区域进行预处理并对图像进行灰度变换,提升 Mark 和背景的对对比度,有利于后续处理,采用自适应灰度变换得到灰度变换图像,光学系统成像过程易受到各类噪声影响,为降低噪声对图像边缘提取效果影响,对灰度变换后图像进行中值滤波,得到中值滤波图像。

采用模板匹配定位轮廓位置过于复杂,因 ROI 区域中干扰因素较少,只需对中值滤波后图像进行边缘检测,即可确定像素级边缘位置。常见边缘检测器有 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子、Laplacian 算子及 Canny 算子,其中 Canny 检测算子因不易受到噪声影响、检测弱边缘效果优异等特点被广泛使用。Canny 检测器首先使用式(2)所示高斯函数计算高斯核,对原始图像进行滤波后使用式(3)所示 Sobel 算子计算 x 和 y 方向的梯度值,判断是否为边缘点,再经非极大值抑制和弱边缘抑制后可得到像素级边缘^[16]。

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

如图 5(a) 所示为求解的像素级边缘,为提取所需外轮廓边缘,可采取 8 连通域求解法,然而在边缘不连续处容易出现连通域断裂的情况,稳定性较弱。本文采取蒙版区域法提取外轮廓,从图 5(a) 可看出外轮廓中心和图像中心接近,因此可用以图像中心为圆心的圆划分内外轮廓,图 5(b) 为提取外轮廓所需的蒙版图像,蒙版图像取反后和图 5(a) 做点积便可准确求取像素级外轮廓边缘。

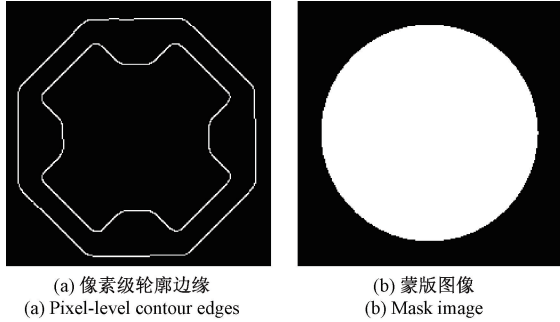


图 5 轮廓提取
Fig. 5 Contour extraction

1.3 亚像素轮廓提取

Canny 边缘检测器只能检测像素级轮廓边缘,无法合理利用边缘像素点附近像素信息,定位精度较差,因此需要在像素级边缘点处提取亚像素信息,提高边缘定位精度,进而提高轮廓质心定位精度。理想边缘界面间分界线明显,可直接求取精确边缘位置,实际成像过程会受到各种噪声和成像条件影响,同时受限于传感器的分辨率,不能直接定位实际边缘准确位置,需结合边缘处像素点信息,合理运算得到亚像素边缘位置。

目前主流亚像素边缘求解算法可分为矩方法、插值法及曲线拟合法。矩方法充分利用以边缘点为中心的 $n \times n$ 范围内像素信息,计算各阶矩特征以拟合边缘位置,可采用的矩特征包含:灰度矩、空间矩及 Zernike 矩特征,此类方法可利用多像素信息,拟合效果较好,但是采集信息过多,容易受到噪声点影响致使边缘求解出现偏移,实际应用效果较差^[17-18]。插值法利用多像素信息和梯度信息进行多项式拟合,计算插值像素信息进而得到亚像素位置,但插值法对于多项式阶数要求较高,低阶多项式拟合效果较差,高阶多项式计算量过大,无法满足实时性要求^[19-20]。曲线拟合法利用已有的边缘模型拟合实际边缘,进而求解极值得到亚像素边缘位置,主流的边缘模型包括:双曲线函数模型^[21]、抛物线函数模型^[22]及二维高斯函数模型^[23]等,此方法求解准确,不易受到边缘噪声影响。

本文采取高斯模型拟合求解亚像素轮廓位置,鉴于二维高斯函数需要利用多像素点信息,计算速度较慢,一维高斯函数^[24]求解迅速,对非梯度方向上的噪声点具有很好的抑制效果,因此采取一维高斯函数拟合亚像素位

置,此方法需初步求解边缘梯度方向,计算梯度方向上的梯度信息,在此基础上做高斯拟合,可快速且准确求解亚像素边缘位置。

取像素级边缘点 3×3 区域内像素点信息,将梯度算子和待求解区域卷积得到梯度信息,梯度算子包含 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 215° 、 270° 及 315° 等 8 个方向算子,鉴于一维高斯函数拟合的梯度模值可取负数,为降低计算量,用 $0^\circ \sim 135^\circ$ 方向信息替代 $180^\circ \sim 315^\circ$ 方向信息,快速求解亚像素边缘位置。 $0^\circ \sim 135^\circ$ 梯度算子如式(4)所示,将梯度算子和待求解区域卷积得到每个方向的梯度值,取最大值得到梯度方向。

$$G_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad G_{45} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G_{90} = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad G_{135} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

计算得到梯度方向后,利用一维高斯函数模型拟合梯度方向上的像素点信息,一维高斯函数模型为:

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中: μ 为实际边缘位置; σ 为函数拟合标准差,为方便求出极值位置,需将上式两边做对数变换:

$$\ln(F(x, y)) = \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} - \frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

观察上式可得到 $\ln(F)$ 和 x 符合二次函数关系,即满足 $\ln(F) = ax^2 + bx + c$, 利用最小二乘原理拟合二次曲线,即令式(7)取最小值。

$$S = \sum_{i=1}^n (\ln(F) - ax^2 - bx - c) \quad (7)$$

对式(7)求偏导,并令其偏导数为 0 可求解得:

$$a = \frac{m_1 \times m_2 - m_3 \times m_4}{m_5 \times m_1 - m_4 \times m_4}$$

$$b = \frac{m_3 - m_4 \times a}{m_1} \quad (8)$$

其中:

$$m_1 = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i$$

$$m_2 = n \sum_{i=1}^n x_i^2 \ln(F)_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n \ln(F)_i$$

$$m_3 = n \sum_{i=1}^n x_i \ln(F)_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n \ln(F)_i$$

$$m_4 = n \sum_{i=1}^n x_i^3 - \sum_{i=1}^n x_i^3 \sum_{i=1}^n x_i$$

$$m_5 = n \sum_{i=1}^n x_i^4 - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (9)$$

根据上式可得到:

$$\mu = -\frac{b}{2a} \quad (10)$$

同时考虑计算量、精度以及噪声的影响, n 取 7 以求解亚像素边缘, 结果如图 6 所示, 从图 6 中可看出亚像素级轮廓相对像素级轮廓更平滑, 和轮廓的契合度更高, 为后续 Mark 定位奠定了基础。

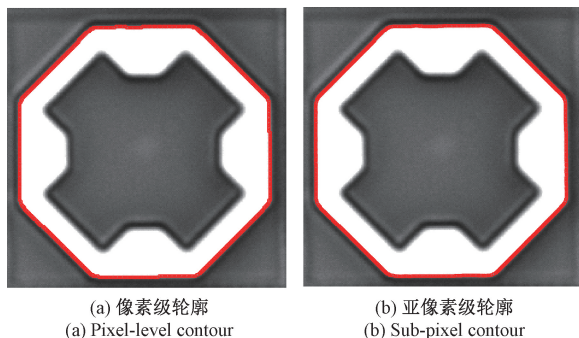


图 6 轮廓提取结果
Fig. 6 The solution result of contour

1.4 轮廓中心拟合

为求解八边形轮廓中心, 常见方法为 Hough 变换法和矩形拟合法。Hough 变换法通过检测轮廓中直线信息, 进而拟合八边形各条边的位置, 得到各条边所在直线方程, 拟合得到八边形中心, 此方法需不断迭代, 计算量过大且求解限制过多。矩形拟合法将八边形的 4 个对边拟合为 4 个矩形, 求解 4 个矩形中心进而加权得到轮廓中心, 此方法未考虑八边形整体特征, 同时求解复杂, 未能满足实时性要求。针对上述问题, 本文采用改进后的最小二乘法快速求解中心, 可适应多种中心对称 Mark, 具有很高的求解精度和适应性。

对准 Mark 属于中心对称图形, 其中心为唯一求解目标, 因此可将 Mark 轮廓拟合为圆轮廓, 利用圆轮廓对 Mark 轮廓做滤波处理, 平衡像素误差, 提高定位精度, 同时利用最小二乘法求解圆轮廓中心坐标^[25], 最小二乘法拟合圆轮廓时对孤立噪声点较为敏感, 本文方法亚像素轮廓提取可保证轮廓点位置的准确性, 噪声点的影响非常微小, 因此最小二乘法可用来拟合圆轮廓中心坐标, 此坐标即为待求解的 Mark 中心坐标, 具体求解过程如下:

二维平面中圆的坐标表示为:

$$(x - a) + (y - b) = r^2 \quad (11)$$

其中, r 为圆半径, (a, b) 为圆心坐标, 传统优化误差目标为:

$$S = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - r]^2 \quad (12)$$

上述目标存在均方根, 求解困难, 因此误差优化目标可变为式(13)所示。

$$S = \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (13)$$

误差可改写为:

$$E = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + mx_i + ny_i + p]^2 \quad (14)$$

为使 E 最小, 可令 E 对 m, n 及 p 求偏导, 令偏导数为 0, 可求解得:

$$\begin{aligned} m &= \frac{h_1 \times h_2 - h_3 \times h_4}{h_5 \times h_1 - h_4 \times h_4} \\ n &= \frac{h_3 - h_4 \times m}{h_1} \\ b &= \frac{m_3 - m_4 \times a}{m_1} \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{aligned} h_1 &= n \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + n \sum_{i=1}^n y_i^3 - \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \sum_{i=1}^n y \\ h_2 &= n \sum_{i=1}^n x y - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y \\ h_3 &= n \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \sum_{i=1}^n y_i^2 x_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \sum_{i=1}^n x \end{aligned} \quad (16)$$

$$h_4 = n \sum_{i=1}^n y^2 - \sum_{i=1}^n y \sum_{i=1}^n y$$

$$h_5 = n \sum_{i=1}^n x^2 - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n x$$

可得圆心坐标和半径为:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{m}{2} \\ b &= -\frac{n}{2} \\ r &= \frac{\sqrt{m^2 + n^2 - 4p}}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

将亚像素轮廓数据利用最小二乘法求取中心坐标和半径, 可以得到拟合的圆轮廓, 如图 7 所示, 此方法对中心对称 Mark 的定位非常有效, 可准确求取 Mark 中心位置。

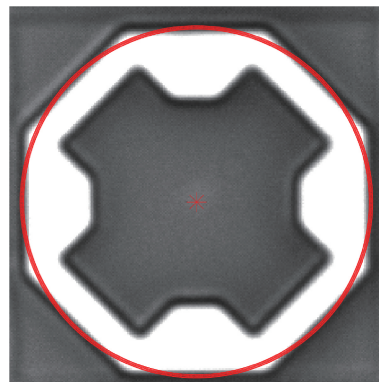


图 7 轮廓中心拟合结果

Fig. 7 The fitting result of contour center

为进一步减小误差,对上述方法做出优化:上述圆轮廓将 Mark 轮廓分割为内外两部分,设外部轮廓像素点数为 m_1 ,内部像素点数为 m_2 ,分别对内外部轮廓按最小二乘法拟合圆轮廓,得到对应圆心坐标分别为 (a_1, b_1) , (a_2, b_2) ,两者和初始圆轮廓坐标进行加权平均,合理优化内外轮廓不均衡导致的误差,最终得到 Mark 中心坐标为:

$$a_{end} = \frac{1}{2} \left(a + \frac{m_1}{m_1 + m_2} a_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} a_2 \right)$$

$$b_{end} = \frac{1}{2} \left(b + \frac{m_1}{m_1 + m_2} b_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} b_2 \right)$$
(18)

2 ROI 区域提取速度分析

本文实验验证部分在实验室自建晶圆键合平台上进行,如图 8 所示,实验照片如图 1 所示,图像分辨率为 $2\ 748 \times 3\ 840$,ROI 区域大小为 232×232 ,单个像素实际尺度为 $0.334\ \mu\text{m} \times 0.334\ \mu\text{m}$ 。实验过程中移动 Mark 并间断拍摄图像,计算两帧图像在 x 和 y 方向上的距离,判断 Mark 定位的准确性。

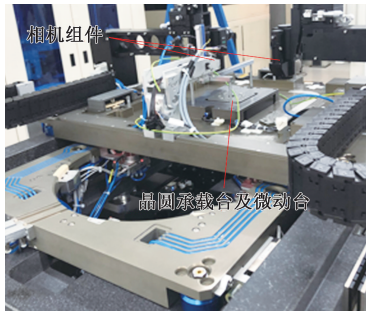


图 8 实验室自建晶圆键合平台
Fig. 8 Wafer bonding platform in laboratory

采用 1.1 节方法快速提取 232×232 的 ROI 区域,编程环境为 MATLAB R2020b,处理器为 Intel i7-10 700 K (3.8 GHz),在实验平台上拍摄多张图片,分别提取 ROI 区域,所有图片均可精确定位到像素级,计算时间如表 1 所示,平均提取时间在 0.03 s 左右,可满足实时性需求。

表 1 ROI 区域提取用时
Table 1 Extraction time of ROI s

参数	最大值	最小值	平均值
时间	0.033 9	0.028 1	0.030 2

MATLAB 平台提供标准匹配定位函数: normxcorr2,opencv-python 平台提供标准匹配定位函数: matchTemplate,其中可选择的因子分别为:相关匹配(TM_CCOEFF)、标准相关匹配(TM_CCOEFF_NORMED)、相

关匹配(TM_CCORR)、标准相关匹配(TM_CCORR_NORMED)、差值平方和匹配(TM_SQDIFF)、及标准差值平方和匹配(TM_SQDIFF_NORMED),分别求解并和本文方法对比,结果如表 2 所示,可看出,本文方法的实时性更好,更能满足工程需要。

表 2 各方法用时对比

方法	用时
Matlab_normxcorr2	1.443 1
TM_CCOEFF	0.172 5
TM_CCOEFF_NORMED	0.251 3
TM_CCORR	0.138 7
TM_CCORR_NORMED	0.163 6
TM_SQDIFF	0.152 6
TM_SQDIFF_NORMED	0.230 4
本文方法	0.030 2

3 Mark 定位精度分析

首先验证 1.2~1.4 节算法可行性,首先人为构建了标准中心对称 Mark 图形,如图 9(a) 所示,图像大小为 522×556 ,Mark 中心在图像正中心,且边缘模糊,利用 1.2~1.4 节算法求解 Mark 中心,和标准中心进行对比,求解效果如图 9(b) 所示。

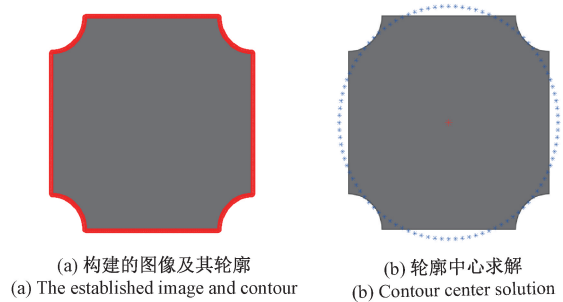


图 9 理论可行性验证结果

Fig. 9 The verification results of theoretical feasibility

同时将 Mark 分别沿 x 轴和 y 轴的正负两个方向移动 10 pixel 后再进行对比,对比结果如表 3 所示,由此可知本文方法具有理论可行性,求解精度高且稳定。

验证算法可行性后,考虑到机台结构、传动、材料等因素对定位精度影响较大,因此采取静态重复定位精度作为验证指标,设计实验如下:在基准位置处每隔 1 s 拍摄 1 张图片,共拍摄 30 张图片用以计算静态重复定位精度,其后保持其他条件不变,移动纳米台,在 x 和 y 方向上各移动 $20\ \mu\text{m}$,分别移动 4 次后反向运动 4 次回到

表3 拟合中心坐标对比结果

Table 3 Comparison results of fitting center coordinates

图像名称	标准 Mark 中心坐标	拟合 Mark 中心坐标
$x-0_y-0$	(278.00,261.00)	(278.00,261.00)
$x-10_y-0$	(268.00,261.00)	(268.00,261.00)
$x-0_y-10$	(278.00,251.00)	(278.00,251.00)
$x+10_y-0$	(288.00,261.00)	(288.00,261.00)
$x-0_y+10$	(278.00,271.00)	(278.00,271.00)

初始位置,在每个位置处拍摄30张图片,共270张图片,同时在每个移动位置处记录30组纳米台传感器数据,实验结果如图10所示,其中图10(a)和(b)分别为 x 和 y 方向上的传感器测量值、VisionPro计算值及本文算法计算值,可以看出三者数据均到达预设位置附近,并且在预设位置附近不断波动。

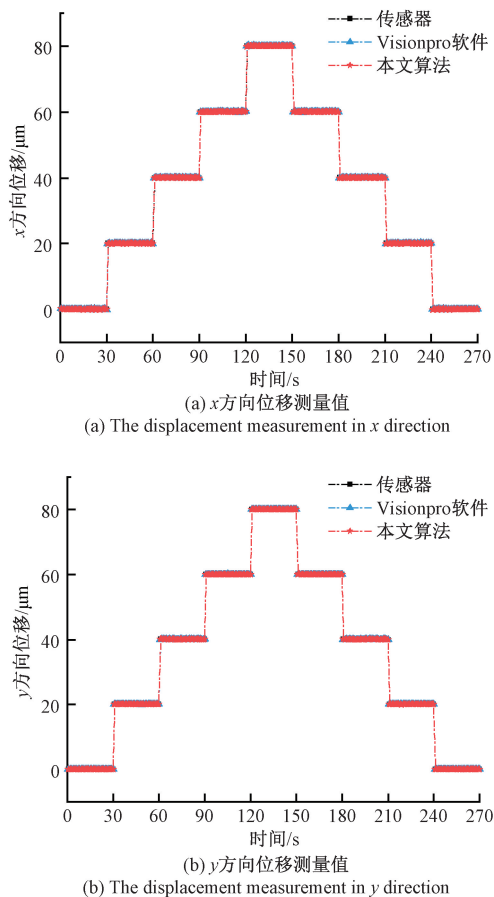


图10 实验位移测量值

Fig. 10 The experimental displacement measurement values

图10反映了实验台在 x 和 y 方向的位移测量值和计算值,为反映测量值和计算值的波动情况,将传感器测

量值和图像计算值分别减去预设位置,将不同位置处的波动情况合并观察整体的波动情况,继而可通过统计学方法来拟合误差分布情况,结果如图11所示,其中传感器测量值在 x 和 y 方向的波动均控制在 $0.01\ \mu\text{m}$ 以内,受机台结构及实验条件影响, x 方向的图像测量计算值约在 $\pm 0.15\ \mu\text{m}$ 范围内波动, y 方向的图像计算值约在 $\pm 0.04\ \mu\text{m}$ 范围内波动, y 方向的测量受影响较小,更能反映图像测量精度和实际定位精度的关系,因此只分析 y 方向的测量误差波动即可。

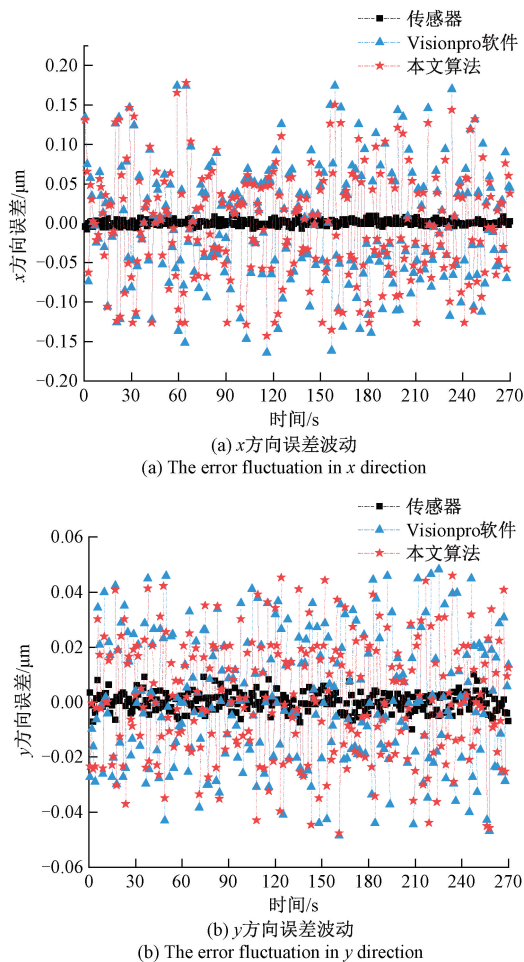


图11 误差波动

Fig. 11 The error fluctuation

传感器测量值和视觉计算值均属于随机误差,本文以正态分布来拟合上述数据,分别计算各组数据对应的误差范围。如图12所示,图12(a)~(c)分别为传感器测量值分布、VisionPro计算值分布以及本文算法计算值分布,其中传感器测量值分布均值为 $-0.000\ 016\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.003\ 3\ \mu\text{m}$; VisionPro计算值分布均值为 $0.001\ 3\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.023\ 0\ \mu\text{m}$; 本文算法计算值分布均值为 $0.001\ 2\ \mu\text{m}$,标准差为 $0.021\ 2\ \mu\text{m}$ 。

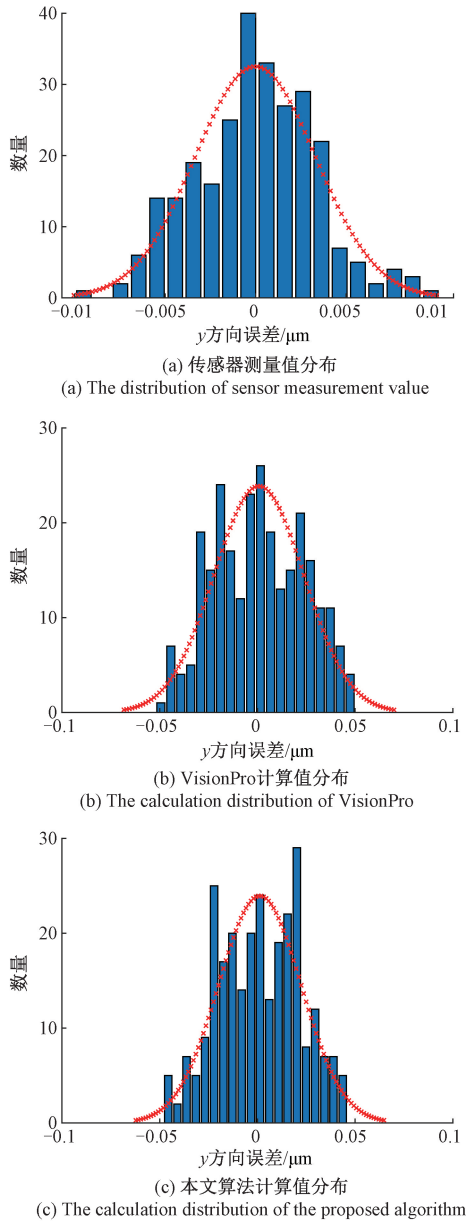


图 12 误差分布

Fig. 12 The error distribution

由此可得,晶圆键合机台静态测量误差约为 $0.01 \mu\text{m}$, VisionPro 和本文算法静态视觉测量误差约为 $0.06 \mu\text{m}$,在工程误差允许范围内,两者均可在一定程度上反映机台定位误差,且本文算法在精度上略优于康耐视算法。

4 结 论

本文针对晶圆键合过程中的对准 Mark 定位问题进行了研究,提出一种快速的高精度定位算法,将 Mark 定位分解为 ROI 区域提取和 ROI 精定位两个阶段,首先利

用分级金字塔模型逐级提取 ROI 区域,将 ROI 区域准确定位在像素级,然后采用边缘检测拟合定位法求取 Mark 中心,将 ROI 区域预处理后利用 Canny 检测器检测像素级边缘,利用改进高斯拟合算法提取亚像素轮廓边缘,最后利用改进的最小二乘法拟合中心位置。本文算法静态重复测量误差约为 $0.06 \mu\text{m}$,略优于 VisionPro 算法,同时后续可结合控制算法联合部署在 FPGA 硬件上,可一定程度降低项目成本,提高系统整体性和运行速度,和 VisionPro 算法相比,在精度、速度、可扩展性及成本等方面均有一定优势,具有很好的工程应用价值。

参考文献

- [1] PANIGRAHI A K, BONAM S, GHOSH T, et al. Low temperature, low pressure CMOS compatible Cu-Cu thermo-compression bonding with Ti passivation for 3D IC integration[C]. 2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). IEEE, 2015: 2205-2210.
- [2] DRAGOI V, BURGGRAF J, KURZ F, et al. 3D integration by wafer-level aligned wafer bonding [C]. 2015 International Semiconductor Conference (CAS). IEEE, 2015: 185-188.
- [3] VAN ZEIJL H W, SARRO P M. Alignment and overlay characterization for 3D integration and advanced packaging [C]. 2009 11th Electronics Packaging Technology Conference. IEEE, 2009: 447-451.
- [4] 侯蕊,葛振杰,赵越,等.基于椭圆拟合的医用窥镜图像相对畸变率检测方法研究[J].光学技术,2018,45(3):364-367.
HOU R,GE ZH J,ZHAO Y,et al. Method for detecting the related distortion rate of medical endoscope image based on ellipse [J]. Optical Technique, 2018, 45 (3) : 364-367.
- [5] 王静,王海亮,向茂生,等.基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J].仪器仪表学报,2012,33(7):1460-1468.
WANG J, WANG H L, XIANG M SH, et al. Subpixel accuracy central location of circle target based on nonmaximum suppression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7):1460-1468.
- [6] WANG Z, GONG S, LI D, et al. LED chip accurate positioning control based on visual servo using dual rate adaptive fading Kalman filter [J]. ISA Transactions, 2019, 87: 163-173.

- [7] BALLARD D H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes[J]. Pattern Recognition, 1981, 13(2): 111-122.
- [8] DI STEFANO L, MATTOCCIA S, MOLA M. An efficient algorithm for exhaustive template matching based on normalized cross correlation[C]. 12th International Conference on Image Analysis and Processing. IEEE, 2003: 322-327.
- [9] KWON O K, SIM D G, PARK R H. Robust hausdorff distance matching algorithms using pyramidal structures[J]. Pattern Recognition, 2001, 34(10): 2005-2013.
- [10] ULRICH M, STEGER C. Empirical performance evaluation of object recognition methods[J]. Empirical Evaluation Methods in Computer Vision, 2001: 62-76.
- [11] 张舞杰, 何广栋, 聂新桥. 基于改进 RANSAC 算法的 PCB 板定位方法的研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(9):84-87,162.
ZHANG W J, HE G D, NIE X Q. Research of positioning method in PCB based on Improved RANSAC algorithm [J]. Hydromechatronics Engineering, 2017, 45(9):84-87,162.
- [12] 周欣, 魏海坤, 张侃健, 等. PCB 板 Mark 点的定位算法研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(4): 111-112, 115.
ZHOU X, WEI H K, ZHANG K J, et al. Algorithms of locating mark points on PCB [J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(4): 111-112, 115.
- [13] ZOU F, LIU X, GONG J. A method for positioning mark point on liquid crystal glass based on machine vision[C]. 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2020: 3989-3994.
- [14] 徐兵, 陈跃飞, 周畅, 等. 一种基于 SNCC 的中心对称标记精确定位方法[J]. 光电子技术, 2020, 40(4): 284-290.
XU B, CHEN Y F, ZHOU CH, et al. A measurement method based on SNCC for centrosymmetric markers [J]. Optoelectronic Technology, 2020, 40(4): 284-290.
- [15] 刘磊. 手机屏幕 Mark 点亚像素定位算法研究及应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
LIU L. Research and application of mark point sub-pixel location algorithms on mobile screen [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
- [16] WU J, LI J, XIAO C, et al. Real-time robust algorithm for circle object detection [C]. 2008 The 9th International Conference for Young Computer Scientists. IEEE, 2008: 1722-1727.
- [17] TABATABAI A J, MITCHELL O R. Edge location to subpixel values in digital imagery[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984(2): 188-201.
- [18] SHAN Y, BOON G W. Sub-pixel location of edges with non-uniform blurring: A finite closed-form approach[J]. Image and Vision computing, 2000, 18(13): 1015-1023.
- [19] 徐从裕, 徐俊, 高雨婷, 等. 面向在线测量的亚像素提取与实验验证[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 23-29.
XU C Y, XU J, GAO Y T, et al. Research on improved sub-pixel extraction algorithm for real-time detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 23-29.
- [20] 史博, 汪霖, 曹建福. 立体零件加工质量的在线图像检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 2039-2044.
SHI B, WANG L, CAO J F. On-line image detection method for matching quality of three-dimensional parts [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 2039-2044.
- [21] ARUN K S. Transactions on pattern analysis and machine intelligence[J]. IEEE, 1987(5): 698-770.
- [22] SU C Y, YU L A, CHEN N K. Effective subpixel edge detection for LED probes [C]. 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2016: 379-382.
- [23] YE J, FU G, POUDEL U P. High-accuracy edge detection with blurred edge model[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(5): 453-467.
- [24] 尚雅层, 陈静, 田军委. 高斯拟合亚像素边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 179-181.
SHANG Y C, CHEN J, TIAN J W. Sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss fitting[J]. Computer Applications, 2011, 31(1): 179-181.

- [25] DONGSHENG Q, SUILPNG Q, WEIBIN R, et al. Design and experiment of the wafer pre-alignment system[C]. 2007 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2007: 1483-1488.

作者简介



鲁沛昕, 2019 年于清华大学获得学士学位, 现为清华大学硕士研究生, 主要研究方向为晶圆键合对准技术研究。

E-mail: lpx150@163.com

Lu Peixin received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2019. He is currently a master student at Tsinghua University. His main research interest includes research on wafer bonding alignment technology.



杨开明(通信作者), 1992 年于郑州大学获得学士学位, 1998 年于郑州大学获得硕士学位, 2005 年于清华大学获得博士学位, 现为清华大学副研究员, 主要研究方向为超精密工件台运动控制技术研究。

E-mail: yangkm@tsinghua.edu.cn

Yang Kaiming (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Zhengzhou University in 1992 and 1998, and received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2005. He is currently an associate researcher at Tsinghua university. His main research interests include research on motion control technology of ultra-precision workpiece table.