

硅通孔键合硅片预对准边缘信息采集与处理

黄春霞, 伊锦旺

(厦门理工学院 福建省光电技术与器件重点实验室, 福建 厦门 361024)

摘要: 研究硅通孔即 TSV (through-silicon vias) 键合硅片的预对准边缘信息采集与处理方法; TSV 硅片与标准硅片相比, 有减薄、键合不同心、边缘毛刺多、存在崩边; 缺口被填充、内有鼓胶、镀铜等工艺特点, 使得传统基于线阵 CCD 一维图像采集与处理预对准方法失败; 针对 TSV 硅片的特点, 把线阵 CCD 配合扫描运动采集的一维原始图像集拼接获得二维图像, 应用二维图像处理技术提取边缘信息, 硅片整周边缘数据用最小二乘圆拟合算法识别出圆心位置, 缺口边缘数据用 Hough 直线变换识别出缺口两条斜边, 其交点定位为缺口位置, 从而实现 TSV 硅片的自动预对准; 实际测量表明, 该方法预对准重复性定位精度小于 $20\ \mu\text{m}$ 、预对准时间少于 $40\ \text{s}$, 满足指标需求, 为光刻机能够曝光 TSV 硅片提供有力支持。

关键词: 硅通孔技术; 预对准; 最小二乘圆拟合; 霍夫直线变换

Edge Information Collecting and Processing of TSV Wafer Pre-alignment

Huang Chunxia, Yi Jinwang

(Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Devices, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: This study was focused on edge information collecting and processing of TSV wafer pre-alignment. Compared to standard wafers TSV wafers have features of being thinned or deflected when bonding, with burrs and flaws around the wafer edge, notch with remnant glues and copper in it being covered, which results in failure in traditional pre-alignment based on 1-dimensional image collecting and processing sampled by line CCD. Aiming to TSV wafers, the 1-dimensional images sampled by line CCD were put together to form a 2-dimensional image, working in with scanning motion. The wafer edge information was collected via 2-dimensional image processing technology, the center position was recognized via least square round fitting method, two notch hypotenuses whose jointing point was regarded as notch position were recognized via Hough line transform, thus an automatic TSV wafer pre-aligning method was achieved. The method has been proved its precision and efficiency are up to the standard by practical test, with the repeatability less than $20\ \mu\text{m}$ and consuming time less than $40\ \text{s}$, providing strong support for lithography exposing TSV wafers.

Keywords: TSV technology; pre-alignment; least square round fitting method; Hough line transform

0 引言

光刻机, 当芯片光刻特征线宽从微米级发展到纳米级时, 对各个分系统的要求到了非常苛刻的地步, 使原来近乎独立的硅片传输系统直接参与到整机中来, 它的传输结果直接影响整机精度和生产效率。在硅片传输过程中, 机械手从片盒取出的硅片存在 $\pm 2\ \text{mm}$ 范围的随机偏心以及随机缺口方向, 在工程中要从毫米级一次对准到纳米的精度是非常困难的, 目前普遍采用的方法是硅片在传送到工件台曝光之前要先进行微米级的预对准, 来保证纳米级精对准的实现。硅片预对准平台是保证硅片传输精度的关键部

件, 其所要做的就是识别出硅片圆心、缺口位置, 使硅片圆心移动到指定位置, 缺口转动到指定方向^[1]。传统硅片预对准边缘信息采集与处理方法是通过对线阵 CCD 受旋转台位置信号外部触发来采集硅片边缘图像, 实时处理每帧图像获取硅片最外沿点位置坐标, 然后代入最小二乘圆拟合算法识别出硅片圆心位置, 代入质心法识别出缺口形心位置^[2-4]。该方法在处理标准硅片上是没有问题的。

为了延续摩尔定律的预言, 芯片封装技术也在不断发展, 硅通孔 (through-silicon vias, TSV) 技术是通过在芯片和芯片之间、硅片和硅片之间制作垂直直通, 实现芯片之间互连的最新技术, 具有封装尺寸小、信号传输快、功耗低等优点, 已经成为下一代封装技术^[5]。TSV 硅片需要经过硅片键合, 硅片减薄, 绝缘层、阻挡层和种子层的淀积, 铜的填充、去除和再分布引线, 通孔的形成等多道工艺^[6]。然而硅片在经过 TSV 各道工艺后, 其边缘表现为键合不一致、不同心, 有磨损; 其表面表现为有溅射金属、绝缘胶和划线槽, 有翘曲; 其缺口表现为不穿透、有破损、

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-03-03。

基金项目: 国家自然科学基金(61701422)。

作者简介: 黄春霞(1981-), 女, 福建省厦门市人, 博士, 讲师, 主要从事图像处理、运动控制方向的研究。

伊锦旺(1984-), 男, 福建省厦门市人, 博士, 讲师, 主要从事信号处理、水声通信方向的研究。

被金属或者光刻胶填充或覆盖、有金属线路等状况, TSV 硅片的这些工艺特点导致传统的预对准边缘信息采集与处理方法失败。过去针对 TSV 硅片, 是通过人工上片到 Aligner 设备, 并使用人眼对准标记的方式对硅片进行手动预对准, 然后再曝光。人工预对准方式无法实现自动化作业, 并且 Aligner 设备存在曝光视场过大导致曝光不均匀, 精度低的缺点。为了克服这些缺点, 适应 TSV 硅片量产化的快速发展, 采用封装光刻机对 TSV 硅片进行曝光的需求日益凸显, 而上片曝光前, TSV 各道工艺硅片能够自动预对准是急需解决的问题。

本文提出可兼容标准硅片和 TSV 硅片的预对准边缘信息采集与处理方法, 在硅片边缘和缺口扫描步骤中, 旋转台带动硅片旋转, 其编码器位置信号触发线阵 CCD 采集到两组一维图像, 对它们进行拼接分别得到二维的硅片整周边缘和缺口原始图像; 应用边缘检测技术提取图像边缘信息; 针对硅片整周边缘最外沿点数据采用最小二乘圆拟合算法识别出圆心位置, 针对缺口边缘数据采用 Hough 直线变换找到缺口两条斜边, 其交点定位为缺口位置, 从而实现 TSV 硅片的自动预对准, 实际测量表明该方法满足系统指标需求, 为封装光刻机曝光 TSV 硅片提供有利支持。

1 预对准流程

TSV 预对准设备由四自由度执行机构和光机两大部分组合, 执行机构由预对准旋转轴、预对准旋转升降轴、预对准定心轴、预对准光机切换轴组成; 光机采用线阵 CCD 传感器, 加装反射式镜头, 光源与镜头在同侧, 置于硅片上方; 硅片下方安装反射镜片, 如图 1。硅片边缘外侧的光路被镜片原路反射回线阵 CCD 传感器上成像, 图像呈现单一灰度的明亮色, 在硅片边缘处呈现明暗跃变的图像特征能够更加凸显硅片边缘位置; 而照射在 TSV 硅片表面上的光路, 由于 TSV 硅片表面不平整, 部分光散射出去, 部分光反射回到线阵 CCD 传感器上成像, 图像呈现出 TSV 硅片表面纹理图案特征。

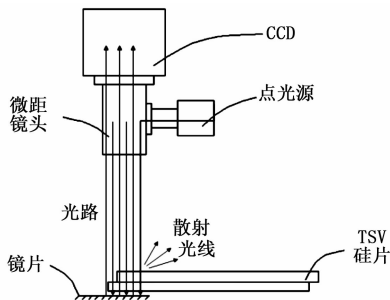


图 1 预对准光路图

硅片预对准流程一般分为定心和定向两大步骤, 其中定心过程中要粗定位出缺口位置, 以指导预对准旋转台转动缺口来到线阵 CCD 传感器下方完成缺口精确扫描, 实现缺口的精确定向。对于标准硅片, 其表面似镜面光滑, 缺

口是个标准的内陷凹槽, 所以在整周边缘扫描过程中根据搜索边缘点位置差分极值可以粗定位出缺口位置; 但是对于 TSV 硅片, 由于表面特征复杂, 用上述方法无法粗定位出缺口位置, 因此针对 TSV 硅片, 要求人工摆放硅片在片盒中时, 顺带把 TSV 硅片的缺口调整在某一朝向, 该朝向范围要求不超出 CCD 缺口精确扫描区间。为此, 设计的 TSV 硅片预对准流程如下: 1) 旋转台转到指定位置从机械手接片, 降到预对准高度后回零点, 确保 TSV 硅片缺口来到线阵 CCD 下方区域。2) 整周采集数据, 对拼接的硅片整周边缘原始图像进行边缘检测, 每行搜索获取得到有效的最外沿点位置用最小二乘圆拟合法计算出 TSV 硅片圆心, 从而指导定心执行机构完成定心动作。3) 当残余偏心到达误差窗口之内后, 对缺口段数据进行精确扫描, 对拼接的缺口原始图像进行边缘检测、Hough 直线变换, 检测到满足缺口斜边斜率的两条斜线, 其交点位置即为缺口端点, 从而指导旋转台完成 TSV 硅片的精确定向。

2 预对准边缘信息采集方案

线阵 CCD 传感器设为动态外部触发。预对准边缘信息采集硬件方案以及触发原理是, 图像采集配合旋转台扫描运动, 根据采样频率, 运动驱动控制卡对预对准旋转轴编码器计数, 到位后, 向图像采集卡发出触发信号, 图像采集卡通过 Cameralink 协议与线阵 CCD 通讯, 并获取当帧图像原始数据, 再通过 PCI 接口实时上传数据给上位机, 如图 2。根据指令, 旋转轴转动相应固定角度, 上位机接收到一组线阵 CCD 的图像原始数据, 把它们拼接在一起, 组成二维图像。扫描硅片边缘时, 获得 TSV 硅片整周边缘原始图像, 扫描缺口时, 获得缺口原始图像, 接着通过图像处理技术分别识别出 TSV 硅片的圆心、缺口位置。

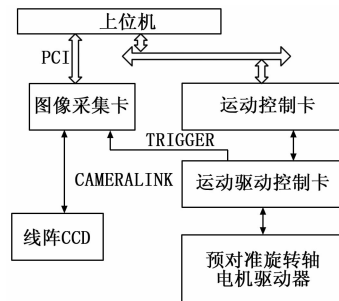


图 2 预对准硬件方案

3 预对准边缘信息处理算法

3.1 边缘检测

图像的边缘是灰度值梯度较大或极大的地方, 是图像的最基本特征, 原始图像经过边缘检测处理后可以大幅减少数据量, 不相关的信息被剔除, 保留图像重要信息^[7]。在对图像边缘检测前要对图像进行预处理, 先进行对比度增强; 然后进行平滑滤波, 以滤除噪声。预处理图像再进

行边缘检测获得二值化边缘图像。边缘检测步骤如图 3。

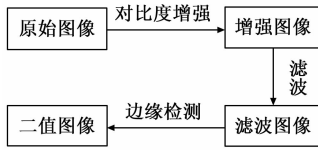


图 3 边缘检测步骤

采用伽玛变换增强图像对比度。伽玛变换后的灰度值是:

$$gray_trans = \left(\frac{gray}{255}\right)^\gamma * 255 \quad (1)$$

gray_trans 值不大于 255; γ 为伽玛系数, 取值 2.3; 经过该变换后图像高灰度区域对比度得到增强。

采用自适应平滑滤波, 根据图像特征, 边缘点一般在低灰度区域, 把高灰度的噪声点去除, 尽量保留边缘信息。

常用的边缘检测算子有 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子, 高斯-拉普拉斯算子、Canny 算子等。综合考虑运算速度与检测效果, 系统采用 Sobel 算子模板, 如下式。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A$$

G_x 和 G_y 分别是沿 x 方向和 y 方向的梯度, 当 G_x 与 G_y 的绝对值之和大于设定阈值时则视为边缘点。把边缘点灰度设置为白色, 非边缘点灰度设置为黑色, 就得到二值化边缘图像。

选取一例硅片整周边缘原始图像边缘检测结果, 如图 4。一例硅片缺口原始图像边缘检测结果, 如图 5。

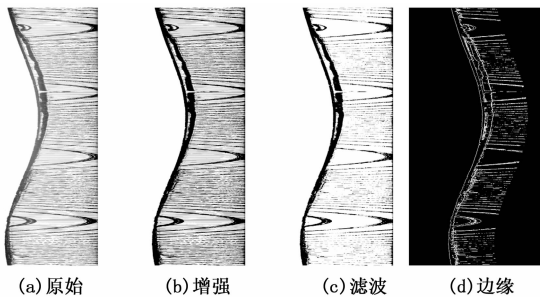


图 4 硅片整周边缘原始图像边缘检测结果

3.2 圆心计算

当获得 TSV 硅片整周边缘二值化图像后, 每行从左到右搜索第一个边缘点所在位置, 得到 TSV 硅片最外沿的 index 值。对跨距为 10 的两个点的 index 值进行差分运算, 对跳变过大的 index 值进行滤除, 并用相邻点的 index 值进行替代, 经过这样平滑滤波处理后, 得到 TSV 硅片有效的最外沿点位置, 再经过 CCD 坐标系到预对准坐标系的变换, 匹配采样角度, 则得到硅片边缘采样点的极坐标值, 用于后续圆心特征的识别计算。

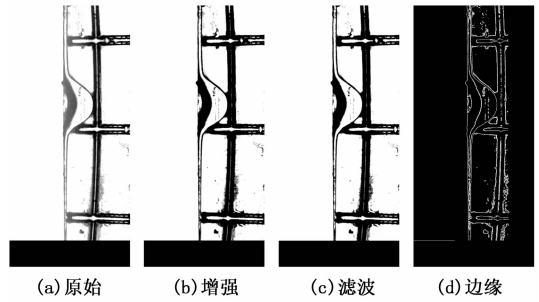


图 5 缺口原始图像边缘检测结果

采用最小二乘圆拟合法计算 TSV 硅片圆心, 以指导执行机构完成定心运动, 从而实现 TSV 硅片的偏心调整。最小二乘圆拟合法描述如下,

设拟合后的圆的方程为:

$$R^2 = (x - A)^2 + (y - B)^2 = x^2 - 2Ax + A^2 + y^2 - 2By + B^2 \quad (2)$$

令:

$$\begin{aligned} a &= -2A \\ b &= -2B \\ c &= A^2 + B^2 - R^2 \end{aligned} \quad (3)$$

可得圆曲线方程的另一个形式:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (4)$$

样本集 $(x_i, y_i) i \in (1, 2, 3, \dots, n)$ 中任一点到圆心的距离 d_i 为:

$$d_i = (x_i - A)^2 + (y_i - B)^2 \quad (5)$$

那么点 (x_i, y_i) 到圆边缘的距离 σ_i 为:

$$\sigma_i = d_i^2 - R^2 = x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c \quad (6)$$

令:

$$Q(a, b, c) = \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c]^2 \quad (7)$$

那么, 求参数 a, b, c 使得 $Q(a, b, c)$ 的值最小, 令:

$$C = \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i\right)$$

$$D = \left(n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i\right)$$

$$E = \left(n \sum_{i=1}^n x_i^3 + n \sum_{i=1}^n x_i y_i^2 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n x_i\right)$$

$$G = \left(n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i\right)$$

$$H = \left(n \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + n \sum_{i=1}^n y_i^3 - \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \sum_{i=1}^n y_i\right) \quad (8)$$

经求解可得:

$$a = \frac{HD - EG}{CG - D^2}$$

$$b = \frac{HC - ED}{D^2 - CG}$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) + a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (9)$$

根据式 (3), 就可以求得:

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{a}{2} \\
 B &= -\frac{b}{2} \\
 R &= \frac{1}{2} \sqrt{a^2 + b^2 - 4c}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

这就是所求的硅片圆心直角坐标 (A, B) 及半径 R。

3.3 缺口识别

系统通过从精确扫描获得的缺口原始图像中识别出缺口位置以指导完成硅片定向功能。缺口原始图像如图 6, 设定图像左上角为坐标原点, 宽度水平方向为直角坐标 y 轴, 高度垂直方向为直角坐标 x 轴。标准硅片的缺口是一个相对圆心开口约 0.033 rad、深约 1.2 mm、上下两条斜边倾斜角分别约为 54° 和 126° 的小凹槽, 如图 6 (a)。TSV 硅片经过键合、剪薄、引线刻蚀、镀铜、涂胶等工艺, 缺口已经被填充, 且内有鼓胶、镀铜、引线、通孔等特点 (如图 6 (b)、(c)、(d) 是 3 种不同工艺 TSV 缺口原始图像), 导致缺口的识别难以沿用传统的求取缺口边缘点来计算形心的方法。本文通过线阵 CCD 配合扫描运动采集拼接获得二维缺口原始图像, 相当于缺口黑白照片有了, 缺口的两条斜边不论经过 TSV 哪道工序在照片上肉眼都能够分辨出, 所以如果处理算法能够检测到缺口的两条斜边, 其交点位置定为缺口位置, 则实现了缺口的识别。

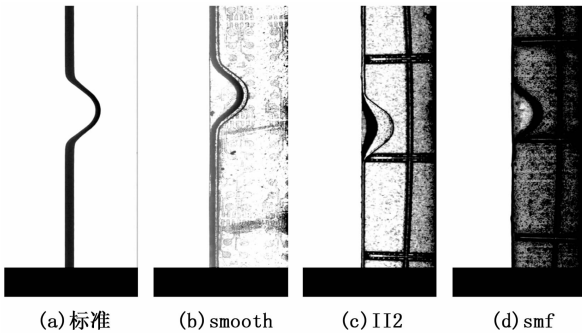


图 6 缺口原始图像

图像中直线检测常用的有 Hough 变换方法。Hough 变换是一种利用图像的全局特征将特定形状的边缘像素连接起来, 形成连续平滑边缘的一种方法。它通过将源图像上的点映射到用于累加的参数空间, 实现对已知解析式曲线的识别^[7-9]。

直线的解析式有多种形式, 由于用斜率描述的直线存在斜率无穷大的特殊情况, 这里选用直线的极坐标描述, 极坐标中描述直线的参数方程是:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta
 \tag{11}$$

其中: ρ 为直线到原点的垂直距离, θ 为 x 轴与直线法线的夹角, 如图 7。对于任意一组确定的 (ρ, θ) , 上式都可以唯一确定一条直线。Hough 变换将图像坐标空间中的点变

换到参数空间中。在极坐标表示下, 图像坐标空间中直线的点变换到参数空间中后, 在参数空间中都相交于同一点, 此时所得到的 (ρ_0, θ_0) 即为所求的直线的极坐标参数, 如图 8。所以可知图像上任意直线区域都可以一一对应参数空间 $H(\rho, \theta)$ 中一个点, 而图像上的任意像素都同时存在于很多直线区域之上。

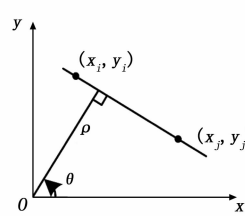


图 7 图像坐标空间

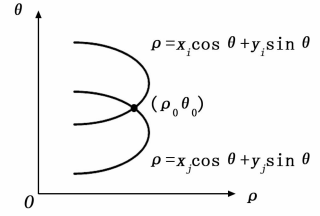


图 8 参数空间

缺口位置的识别过程是, 为了减少计算量, 先对缺口原始图像进行如 3.1 所述的边缘检测, 得到缺口边缘图像, 边缘点的灰度为白色, 缺口斜边作为边缘信息也保留了下来; 然后用 Hough 变换检测图像中的所有直线区域, 然后再从中筛选出缺口斜边直线, 计算缺口两条斜边交点坐标即为缺口位置, 具体作法如下:

首先根据缺口图像大小开辟二维参数空间 $H(\rho, \theta)$, 对 ρ, θ 整数化, ρ 为直线到原点的垂直距离, 最大值为图像对角线长度 n

$$n = \sqrt{w^2 + h^2}
 \tag{12}$$

其中: w 为图像宽度, h 为图像高度, 那么 ρ 取值范围为 $[0, n]$, 令 θ 以 0.25 度为增量, 可得到 θ 的取值范围为 $[0, 1440]$ 。定义二维数组 HoughBuf $[n][1440]$ 作为存储单元, 依次遍历图像中所有灰度为白色的像素, 对于每个像素判断是否满足式 (11) 的特定条件, 若满足则对经过该像素的所有直线区域的计数器加 1, 否则继续判断下一个像素。这样可以统计出每条直线区域所包含的像素点计数值, 对应数值存于二维数组变量 HoughBuf $[\rho][\theta]$ 中。

上述通过 Hough 变换检测到缺口边缘图像上的所有直线区域, 直线区域包含的像素点计数值有大有小。从这些直线区域中甄别出缺口斜边, 必须同时满足以下筛选条件: 首先直线区域包含的像素点计数值必须大于设定阈值; 另外直线区域对应 θ 参数在特征角度的小范围允许偏差之内, 根据缺口上斜边 54° 的倾斜角, 其法线与 x 轴夹角 θ 的特征值根据缺口在图像中位置或为 324° , 或为 126° ; 根据缺口下斜边 126° 的倾斜角, 其法线与 x 轴夹角 θ 的特征值为 36° 。满足上述条件的直线区域可能是多条, 求其斜率和截距的平均值拟合得到待求的缺口斜边, 求上下两条缺口斜边的交点坐标, 即为缺口位置; 若没有找到满足上述条件的直线区域, 那么说明缺口不存在。这样就完成了缺口位置的识别。

图6中标准硅片以及3种不同工艺 TSV 硅片缺口识别结果如图9, 图中用十字线交点标识出根据所述算法找到的缺口位置。

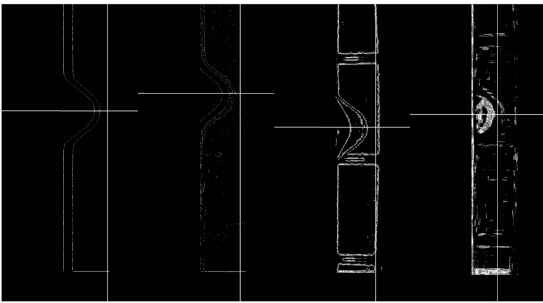


图9 缺口识别结果

4 重复性定位精度测试

系统预对准指标需求, 定心重复性精度小于 $20 \mu\text{m}$, 定向重复性精度小于 150 urad , 时间小于 40 s 。

对系统进行重复性定位精度测试以验证该预对准边缘信息采集与处理方法的可行性。实验装置是 TSV 预对准台、一片边缘处贴上标记的直径 300 mm TSV 硅片、高精度 CCD 摄像头、图像采集卡。CCD 摄像头方向垂直于 TSV 硅片, 如图10; 抓取硅片上标记的放大图片, 如图11。

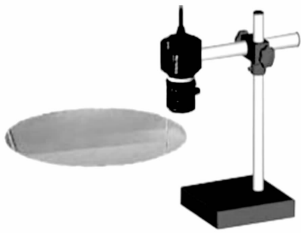


图10 CCD采集标记

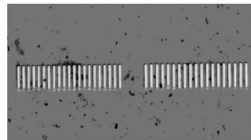


图11 放大标记

重复性定位精度测试方法是对初始位置任意的同一块 TSV 硅片进行 25 次预对准操作, 每次预对准结束后 CCD 抓拍一张标记图片。对这 25 张标记图片基于模板匹配原理进行分析得到标记在 CCD 坐标系下 25 组坐标位置 (以像素为单位, $1 \text{ 像素} = 1.5 \mu\text{m}$), 计算 25 组 CCD 位置坐标的 3σ 值, 看其是否满足指标需求^[10]。系统重复性定位精度测试结果数据, 见表1。从表中可看出 3σ 值小于 $20 \mu\text{m}$, 预对准时间小于 40 s , 满足系统指标需求。

5 结论

本文提出一种可兼容标准硅片与 TSV 硅片的预对准边缘信息采集与处理方法, 首先线阵 CCD 配合扫描运动, 获取一组一维图像, 再对图像进行拼接, 获取的二维图像是预对准算法的数据来源; 拼接图像经过边缘检测算法处理得到有效的边缘数据; 从 TSV 整周边缘数据中搜索得到最外沿点作为最小二乘圆拟合的输入, 计算出 TSV 硅片圆心,

表1 重复性定位精度测试结果

| No. | X/pixel | Y/pixel | No. | X/pixel | Y/pixel |
|--|---------|---------|-----|---------|---------|
| 1 | 522.07 | 520.72 | 14 | 531.29 | 514.43 |
| 2 | 522.07 | 514.5 | 15 | 523.49 | 513.7 |
| 3 | 522.1 | 514.51 | 16 | 523.47 | 516.65 |
| 4 | 525.48 | 514.63 | 17 | 523.4 | 514.13 |
| 5 | 525.66 | 516.39 | 18 | 523.6 | 518.43 |
| 6 | 522.51 | 515.41 | 19 | 523.37 | 513.95 |
| 7 | 520.68 | 515.14 | 20 | 525.66 | 514.18 |
| 8 | 522.61 | 514.56 | 21 | 523.63 | 513.91 |
| 9 | 527.68 | 521.21 | 22 | 523.93 | 517.45 |
| 10 | 531.99 | 518.89 | 23 | 526.06 | 514.62 |
| 11 | 523.21 | 518.57 | 24 | 532.05 | 515.16 |
| 12 | 526.07 | 514.63 | 25 | 524.17 | 514.63 |
| 13 | 523.08 | 521.01 | | | |
| $3\sigma(X)/\mu\text{m}:13.807 \quad 3\sigma(Y)/\mu\text{m}:10.751 \quad \text{ave-time/s}:21.3$ | | | | | |

从而指导 TSV 硅片的定心动作; TSV 缺口边缘数据采用 Hough 直线变换找到缺口两条斜边, 斜边交点作为缺口端点位置, 以指导 TSV 硅片的精确定向, 最终完成 TSV 硅片的预对准操作。实际测量表明该方法满足系统指标需求, 为封装光刻机能够曝光 TSV 硅片提供有力支持。

参考文献:

- [1] Huang C X, Cao Q X, Fu Z, et al. The development of a wafer prealigner based on the multi-sensor integration [J]. Assembly Automation, 2008, 28 (1): 77-82.
- [2] Cong M, Kong X J, Yu D, et al. Wafer pre-aligner system based on vision information processing [J]. Information Technology Journal, 2007, 6 (8): 1245-1251.
- [3] Fu Z, Huang C X, Liu R Q, et al. Wafer prealigning robot based on shape center calculation [J]. Industrial Robot, 2008, 35 (6): 536-540.
- [4] 丛明, 杜宇, 沈宝宏, 等. 面向 IC 制造的硅片传输机器人传输系统综述 [J]. 机器人, 2007, 29 (3): 261-266.
- [5] 赵璋, 童志义. 3D-TSV——延续摩尔定律的有效途径. 电子工业专用设备 [J], 2011, 194: 10-16.
- [6] 魏红军, 段晋胜. TSV 制程关键工艺设备技术及发展. 电子工业专用设备 [J], 2014, 231: 7-10.
- [7] 张铮, 徐超, 任淑霞, 等编著. 数字图像处理与机器视觉 (第2版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [8] 杨恕, 郑云富, 吴明毅, 等. SMEE 算法与 Hough 圆拟合在香烟小包拉线错牙检测中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 25-28.
- [9] 戴知圣, 潘晴, 钟小芸. 基于机器视觉的工件尺寸和角度的测量 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 27-29.
- [10] 黄春霞, 曹其新, 刘仁强. 晶圆预对准精确定位算法 [J]. 高技术通讯, 2007, 17 (7): 709-713.