

文章编号 1004-924X(2026)10-1568-12

鲁棒全局优化的晶圆多目视觉对准方法

王晓东, 陈晓浩, 邹正苏, 高昆樺, 徐 征*
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对晶圆装配的高精度对准需求,提出了一种基于鲁棒全局优化的多目视觉对准方法,并构建了相应的性能评估框架。首先,通过多目视觉获取多靶标信息,并通过非线性最小二乘目标函数融合信息求解位姿;其次,基于测量精度阈值对靶标残差进行归一化,并结合 Huber 损失与迭代加权法自动降低异常靶标权重,以抑制划痕等误差的影响;在求解方面,将 Armijo 自适应回溯线搜索技术嵌入 LM 算法中,提高求解收敛稳定性与效率;进一步建立坐标映射与旋转诱导位移补偿模型,实现误差传递与运动补偿;提出角度-位移协同约束交并比(AD-IoU)指标,并开展了双层晶圆对准应用实验。结果表明:应用本文提出的鲁棒全局优化迭代方法,可以将收敛次数降至 3 次左右,在引入微米级($4\ \mu\text{m}$)局部靶标偏差时,AD-IoU 均值仅降低 0.06%,验证了本文方法的迭代效率与鲁棒性。

关键词:多目视觉;晶圆对准;精密装配;LM 算法

中图分类号:TP394. 1;TH691. 9 **文献标识码:**A

doi:10. 37188/OPE. 20263410. 1568

CSTR:32169. 14. OPE. 20263410. 1568

A robust global optimization-based multi-view visual alignment method for wafer alignment

WANG Xiaodong, CHEN Xiaohao, ZOU Zhengsu, GAO Kunju, XU Zheng*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: xuzheng@dlut.edu.cn

Abstract: To meet the high-precision alignment requirements of wafer assembly, a multi-view visual alignment method based on robust global optimization was proposed, and a corresponding performance evaluation framework was established. First, multi-target information was obtained using multi-view vision, and the pose was estimated by fusing the target information through a nonlinear least-squares objective function. Second, the target residuals were normalized according to measurement accuracy thresholds, and the Huber loss function combined with an iterative reweighting method was used to automatically reduce the weights of abnormal targets, thereby suppressing the influence of scratches and other errors. For the optimization process, an Armijo adaptive backtracking line search strategy was embedded into the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm to improve convergence stability and efficiency. Furthermore, coordinate mapping and a rotation-induced displacement compensation model were established to realize error propagation and motion compensation. An angle - displacement coupled intersection-over-union (AD-

收稿日期:2026-03-23;修订日期:2026-04-15.

基金项目:部委基础科研计划资助项目(No. JCKY2022203B006);中央高校基本科研业务费资助项目(No. DUT24LAB112)

IoU) metric was proposed, and two-layer wafer alignment experiments were conducted. The results show that the proposed robust global optimization-based iterative method reduces the number of convergence iterations to approximately three. When a micron-level local target deviation of $4\ \mu\text{m}$ is introduced, the mean AD-IoU decreases by only 0.06% , verifying the iterative efficiency and robustness of the proposed method.

Key words: multi-view vision; wafer alignment; precision assembly; Levenberg-Marquardt algorithm

1 引 言

晶圆键合是通过将两片已完成前道刻蚀或镀膜工艺的晶圆精确对准并永久连接,它可以实现批量器件的高效异质集成、垂直互连和封装,是微传感器制造的核心技术^[1]。当前,先进传感器制程对晶圆键合的精度要求已达到微米尺度^[2],在两片晶圆接触前,采用视觉测量技术以晶圆标记点为基准进行对准是保障键合精度的主要途径^[3-4]。目前,商用的晶圆键合设备中常采用单/双路视觉的对准方案,难以同时兼顾全局姿态约束与局部高精度观测^[5],测量精度容易受误差杠杆放大效应、光学畸变等影响,这是制约晶圆键合质量的主要瓶颈之一^[6-7]。

采用多目视觉并行观测可增加测量信息维度,有效补偿单视角盲区与畸变影响^[8],如何利用多源视觉信息有效融合与互补,从而抑制系统误差与随机误差是焦点问题。Chih等^[9]构建了双目视觉与XXY构型平台组成的伺服对准系统,采用模板匹配与边缘提取标记特征,并利用二次精对位进一步降低误差,实现高精度掩模/晶圆对位。Hau等^[10]建立了多目视觉测量技术,获取微图案层压/掩模对位的位姿差,再结合XXY并联平台的运动学补偿关系实现对位。Jongwon等^[11]面向晶圆与陶瓷板键合的对位问题,建立了多视觉晶圆对位流程,其中负责晶圆位置与角度校正视觉部分由3套显微成像光路组成,能够用于附加UV胶带的晶圆对准场景。Liu等^[12]建立了由双目视觉和XXY位移平台组成的图像伺服对位系统,其识别精度约 $\pm(10\sim 15)\ \mu\text{m}$ 。上述方法本质上依赖于局部特征提取的准确性与系统标定的精度,而在存在外界干扰或靶标缺陷的情况下,单次测量的结果会出现异常值^[13],容易使得刚性解算方法陷入局部最优,导致对准作业失效^[14-15]。

近来的研究表明:将位姿求解统一建模为非线性最小二乘问题,并通过鲁棒核函数结合迭代重加权在迭代过程中依据残差分布自适应调权,能够显著减弱异常观测对最优解的干扰,从而提升收敛可靠性^[16-18]。受此启发,本文提出了基于鲁棒全局优化的多目视觉对准方法。将对准问题重构为非线性最小二乘优化模型;采用改进的Levenberg-Marquardt(LM)算法迭代求解全局最优位移调整量,引入Huber损失函数以抑制异常影响,并兼顾收敛速度与鲁棒性,融合线搜索准则自动确定步长。其次,建立了坐标系间的映射关系,实现了误差传递建模与补偿。最后,建立了角度-位移协同约束交并比(Angle-Displacement Coupled Intersection-over-Union, AD-IoU)指标,从平移与旋转等维度综合评估对准精度,为对准算法提供了全面的量化依据。

2 对准原理和方法

本文建立的基于鲁棒全局优化的多目视觉对准框架和流程,如图1所示,其流程简述如下:

输入与初始化:首先采集靶标图像并识别位姿信息,构建全局优化目标函数 $\min F[\Delta x, \Delta y, \Delta \theta]$,并设定初始条件:增量方程 ΔP_0 、阻尼因子 λ_0 、Huber损失阈值参数 δ 、收敛阈值 ϵ 、最大迭代次数 K_{\max} 等。

鲁棒LM迭代求解:计算位置残差 r_k^T ,然后利用残差进行鲁棒加权计算对应的权重 w_i ,再通过LM求解方向 δ_k ,并采用Ajmijo准则对步长 α_k 进行线搜索,避免固定步长导致的过冲、振荡或无效小步,再更新增量方程 ΔP_{k+1} 和阻尼因子,最后根据收敛阈值 ϵ 、最大迭代次数 K_{\max} 判断是否收敛或超过最大迭代次数。

输出执行与评价:将迭代求解的全局最优补偿 $[\Delta X^*, \Delta Y^*, \Delta \theta^*]$ 通过误差补偿模型转换为滑

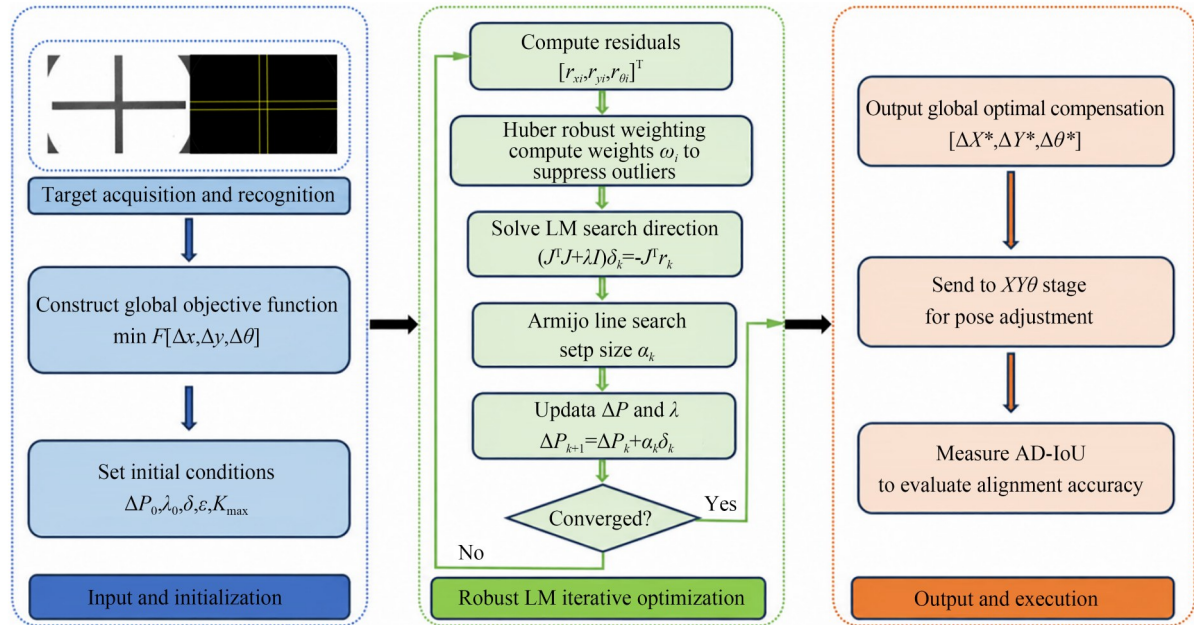


图1 鲁棒全局优化多目视觉对准的流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed robust global-optimization-based multi-view alignment

台真实位移旋转量 $[\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta]$ 并发送至执行机构 $XY\theta$ 三轴滑台,然后设计特殊晶圆,测量并计算晶圆间的AD-IoU对精度进行评价。

将多目视觉获取的多靶标位姿误差统一构建为非线性最小二乘目标函数,并采用鲁棒LM迭代求解全局最优补偿量。其中引入Huber-IRLS机制对异常观测自适应降权,以减弱局部缺陷与干扰对解的影响;同时结合Armijo回溯线搜索自适应确定步长,保证目标函数充分下降并提升收敛稳定性。

2.1 Huber 损失函数

设定多靶标位姿观测模型为:

$$\hat{\xi}_i = \xi_i + n_i + o_i, \quad (1)$$

其中: ξ_i 为单个靶标的真实位姿参数, n_i 为测量噪声, o_i 为因加工误差或者损坏等原因产生异常。

当为单个靶标时 $N=1$,此时的估计误差 e_{single} 为:

$$\begin{aligned} \xi_{\text{single}} &= \hat{\xi}_1 \\ e_{\text{single}} &= \xi_{\text{single}} - \xi_1 = n_1 + o_1 \end{aligned} \quad (2)$$

受加工偏差和表面缺陷等干扰,单一靶标检测易产生位姿异常;如果直接采信该靶标位姿信息,将造成定位失效。而采用 N 个靶标进行联合估计时,多靶标观测能够削弱随机测量噪声的影响。假设各靶标随机噪声 n_i 相互独立且近似满

足零均值分布,则多靶标融合后的平均误差可表示为:

$$\bar{e}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_i + o_i). \quad (3)$$

在不存在异常偏差 o_i 的理想条件下,其随机噪声方差为:

$$\text{Var}(\bar{e}_N) = \frac{\sigma^2}{N}. \quad (4)$$

可见,靶标数量由单个增加至 N 个时,随机误差标准差可由 σ 降低至 σ/\sqrt{N} 。

将每个靶标残差定义为:

$$r_i(\xi) = \hat{\xi}_i - \xi_i = [\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta \theta_i]^T. \quad (5)$$

按照标准差归一化标量:

$$s_i = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_i}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y_i}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \theta_i}{\sigma_\theta}\right)^2}, \quad (6)$$

其中: $[\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\theta]^T$ 为精度阈值,再基于归一化标量,采用迭代加权最小二乘目标函数修正相应权重:

$$w_i = \frac{\psi(s_i)}{s_i} = \begin{cases} 1, & |s_i| \leq \delta \\ \frac{\delta}{|s_i|}, & |s_i| > \delta \end{cases}, \quad (7)$$

其中, δ 为Huber阈值,若理想靶标则权重设为1,若靶标异常则实现自动减小权重。使最终位姿

由多数正常靶标主导,异常靶标对结果影响显著减弱,从而提高鲁棒性。

本文 δ 根据视觉测量噪声水平和正常靶标残差分布确定固定阈值,靶标观测误差主要来源于随机测量噪声,且各方向误差近似独立时, s_i^2 可近似服从自由度为 3 的 χ^2 分布^[17]。基于该特点,本文选取正常观测 95% 置信范围附近的残差作为 Huber 阈值:

$$\delta = \sqrt{\chi_{3,0.95}^2} \approx 2.8. \quad (8)$$

考虑到实际测量中仍存在边缘提取误差和局部光照波动,本文取 $\delta = 3.0$ 。

将计算得到的权重 ω_i 构造对角权重矩阵:

$$\mathbf{W}_k = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i). \quad (9)$$

则原鲁棒优化可近似为加权最小二乘子问题:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{W}_k^{1/2}(\mathbf{r}_k + \mathbf{J}_k \Delta \mathbf{x})\|^2. \quad (10)$$

2.2 步长优化的 LM 算法

晶圆对准示意图如图 2 所示,其中基准晶圆四个靶标位姿信息为 $\{x_{A_i}, y_{A_i}, \alpha_i\}$,待对准晶圆靶标位姿信息为 $\{x_{B_i}, y_{B_i}, \beta_i\}$ 。

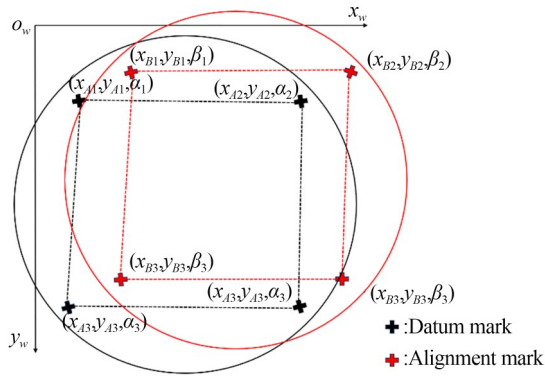


图 2 双层晶圆多靶标对准几何关系

Fig. 2 Geometric schematic of multi-target alignment for two-layer wafers

设晶圆间位移和角度调整量为 $[\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta]$, 则晶圆调整后标记点位姿信息 $\{x'_{B_i}, y'_{B_i}, \beta'_i\}$ 为:

$$\begin{cases} x'_{B_i} = x_{B_i} + \Delta X + \Delta X_{OM_i} \\ y'_{B_i} = y_{B_i} + \Delta Y + \Delta Y_{OM_i} \\ \beta'_i = \beta_i + \Delta \theta \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\{\Delta X_{OM_i}, \Delta Y_{OM_i}\}$ 为旋转引起的 XY 位移量。

则对准目标函数为:

$$\min F[\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta] = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{2} [F_X^2 + F_Y^2 + F_\theta^2], \quad (12)$$

$$F_X = \omega_X(x'_{B_i} - x_{A_i})$$

$$F_Y = \omega_Y(y'_{B_i} - y_{A_i}),$$

$$F_\theta = \omega_\theta(\beta'_i - \alpha_i)$$

其中, $\omega_X, \omega_Y, \omega_\theta$ 分别为 X, Y 轴和角度权重。

目标函数 F 包含三角函数,其求解非线性多元最小二乘问题,无法直接解方程求得最小值,本文采用 LM 算法求解目标函数的最优值。LM 算法迭代的公式为:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{W}_k \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \mathbf{P} = -\mathbf{J}^T \mathbf{W}_k \mathbf{r}_k, \quad (13)$$

其中: λ 为阻尼因子,用于控制步长。 \mathbf{I} 为单位矩阵,增量方程 $\Delta \mathbf{P}: [\Delta X_\Delta, \Delta Y_\Delta, \Delta \theta_\Delta]^T$, 由式(13)可得,目标函数位置残差 \mathbf{r}_k^T 为:

$$\mathbf{r}_k^T = [r_{x_i}, r_{y_i}, r_{\theta_i}]^T = \left[\sqrt{\omega_X}(x'_{B_i} - x_{A_i}), \sqrt{\omega_Y}(y'_{B_i} - y_{A_i}), \sqrt{\omega_\theta}(\beta'_i - \alpha_i) \right]^T. \quad (14)$$

Jacobi 矩阵 \mathbf{J} 为:

$$\mathbf{J}(\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_{x1}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial r_{x1}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial r_{x1}}{\partial \Delta \theta} \\ \frac{\partial r_{y1}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial r_{y1}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial r_{y1}}{\partial \Delta \theta} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_{\theta4}}{\partial \Delta X} & \frac{\partial r_{\theta4}}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial r_{\theta4}}{\partial \Delta \theta} \end{bmatrix}_{12 \times 3}$$

$$= \begin{bmatrix} \sqrt{\omega_X} & 0 & \sqrt{\omega_X} \frac{\partial X_{OM1}}{\partial \Delta \theta} \\ 0 & \sqrt{\omega_Y} & \sqrt{\omega_Y} \frac{\partial Y_{OM1}}{\partial \Delta \theta} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \sqrt{\omega_\theta} \end{bmatrix}_{12 \times 3}$$

(15)

为分析阻尼因子更新方向,设信赖域比例因子 ρ :

$$\rho = \frac{F_{\text{Actual}}}{F_{\text{Pred}}}, \quad (16)$$

其中: F_{Actual} 为实际下降量, F_{Pred} 为实际下降量,两者公式分别为:

$$F_{\text{Actual}} = F(P_k) - F(P_k + \Delta P_k),$$

$$F_{\text{Pred}} = -r_k^T J_k \Delta P_k - \frac{1}{2} \Delta P_k^T J_k^T J_k \Delta P_k$$

则阻尼因子更新方向由式(17)给出:

$$\begin{cases} \rho > 0.75, & \lambda_{k+1} = \lambda_k \nu \\ 0.75 \geq \rho \geq 0.25, & \lambda_{k+1} = \lambda_k \\ 0.25 > \rho, & \lambda_{k+1} = \lambda_k / \nu \end{cases} \quad (17)$$

采用 Armijo 搜索准则优化增量方程,使每次迭代都能向有效下降方向迭代,有效防止因步长过长导致迭代跳过全局最优解。

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^4 F \left[X_k + \gamma^{m'} \Delta P_k \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \right. \\ & \left. Y_k + \gamma^{m'} \Delta P_k \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \theta_k + \gamma^{m'} \Delta P_k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right] \leq \\ & \sum_{i=1}^4 F(X_k, Y_k, \theta_k) + \sigma \gamma^{m'} \Delta P_k g_k^T, \end{aligned} \quad (18)$$

其中: γ 常数,且 $\gamma \in (0, 1)$, m' 是满足 Armijo 搜索准则最小非负整数, g_k 为第 k 次迭代的梯度值。

完成线搜索后,更新位姿补偿量:

$$\Delta P_{k+1} = \Delta P_k + \alpha_k \delta_k. \quad (19)$$

最后,根据收敛阈值 ϵ 和最大迭代次数判断是否收敛结果,若收敛且未超过最大迭代次数则输入迭代后的全局最优值,否则继续迭代。

取迭代初始增量方程 $\Delta P_0 = [\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta \theta_0]^T$

为四个靶标偏移的平均值:

$$\begin{aligned} & [\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta \theta_0]^T = \\ & \frac{1}{4} \left[\sum_{i=1}^4 (x_{Bi} - x_{Ai}), \sum_{i=1}^4 (y_{Bi} - y_{Ai}), \sum_{i=1}^4 (\beta_i - \alpha_i) \right]^T. \end{aligned} \quad (20)$$

取初始阻尼因子 λ_0 为:

$$\lambda_0 = \tau \max \left\{ \left(J_{(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta \theta_0)}^T J_{(\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta \theta_0)} \right)_{ii} \right\}. \quad (21)$$

3 实验设置

3.1 实验设备

本文所用的实验设备为课题组独立开发的晶圆键合设备,如图3所示,由点胶模块、上料平台模块、视觉测量模块、晶圆拾取模块、位姿对准模块以及安装基础框架等组成。与对准过程直接相关的模块包括:视觉测量模块与位姿对准模块。其中,视觉测量模块集成了四套子光路,用于同步获取四个靶标的位姿信息;位姿对准模块则依据视觉反馈的位姿偏差量,驱动执行机构对晶圆进行平移与旋转调整,从而实现高精度对准。

本文实验所用的晶圆,如图4所示。该晶圆的四周区域分布有用于实现对准操作的十字靶标,各靶标的位置与图像采集位置一一对应;晶圆的中心区域分布有25个3 mm×3 mm方块阵

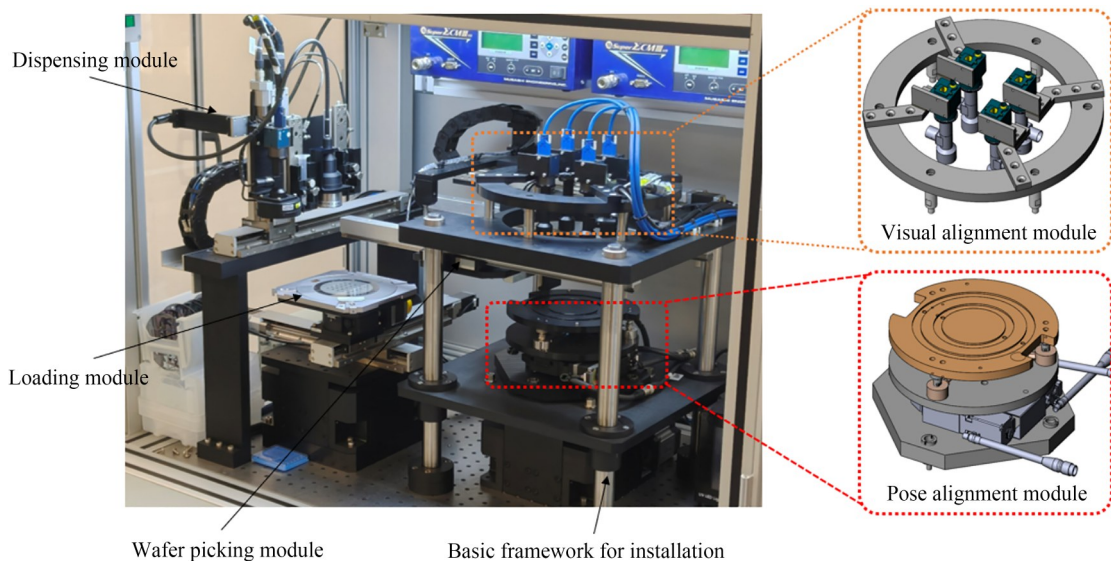


图3 晶圆键合设备总体结构图

Fig. 3 Overall structure of the wafer bonding equipment

列。实验过程中,通过计算两层方形之间的 AD-IoU,来衡量对准操作完成后两层晶圆间的位移与角度偏差,进而实现对十字靶标辅助对准算法对准精度的量化评估。

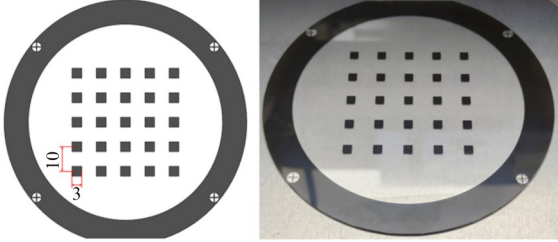


图 4 对准实验所用晶圆

Fig. 4 Wafers used in the alignment experiments

3.2 设备误差分析与补偿

本文装配系统主要涉及以下坐标系:对应四套子光路的 4 套图像坐标系 $O_{pi}u_i v_i$ 、视觉坐标系 $O_v x_v y_v$ 、世界坐标系 $O_w x_w y_w$ 和对准位姿工作台坐标系 $O_a x_a y_a$,如图 5 所示。本文将视觉坐标系 $O_v x_v y_v$ 和世界坐标系 $O_w x_w y_w$ 重合^[19]。

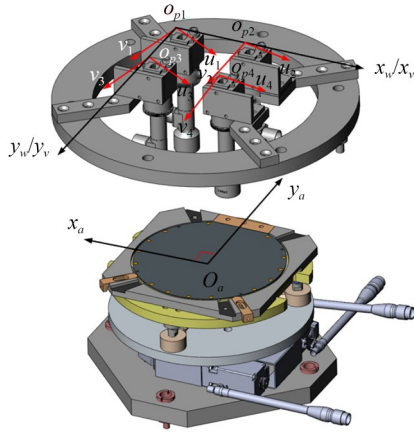


图 5 实验设备中坐标系关系

Fig. 5 Schematic of spatial relationships between coordinate systems in the experimental device

由于四套光路安装误差,图像坐标系 $O_{pi}u_i v_i$ 与世界坐标系 $O_w x_w y_w$ 之间存在夹角 α_i 且各相机之间存在实际相对位置 $\{\Delta X_{Mi}, \Delta Y_{Mi}\}$,如图 6 所示。设每个相机像素当量为 $\{P_{xi}, P_{yi}\}$,则 $\{\Delta X_{wi}, \Delta Y_{wi}, 0\}$ 与 $\{\Delta U_i, \Delta V_i, 0\}$ 的转换关系可由式(22)给出:

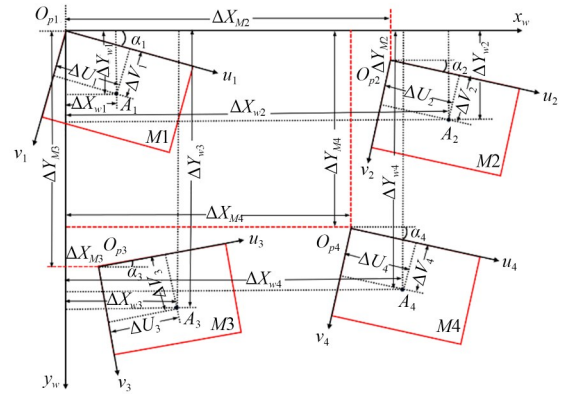


图 6 图像坐标系 $O_{pi}u_i v_i$ 与世界坐标系 $O_w x_w y_w$ 转换关系
Fig. 6 Transformation between the image coordinate system $O_{pi}u_i v_i$ and the world coordinate system $O_w x_w y_w$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{wi} \\ \Delta Y_{wi} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{xi} \Delta U_i \\ P_{yi} \Delta V_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{Mi} \\ \Delta Y_{Mi} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

位姿对准模块的运动分为两部分。一是在 $O_a x_a y_a$ 平面内平移,如图 7 所示,世界坐标系 x_w 轴与对准位姿工作台坐标系 $x_w(X_A)$ 轴之间存在夹角 α_5 ,对准位姿工作台坐标系 y_a 轴与三轴精密滑台实际运动方向 (Y_A) 轴之间存在夹角 β_0 。

则三轴精密滑台实际位移量 $\{\Delta X_A, \Delta Y_A, 0\}$ 与世界坐标系中 $\{\Delta X_{w5}, \Delta Y_{w5}, 0\}$ 之间的转换关系可由式(23)给出:

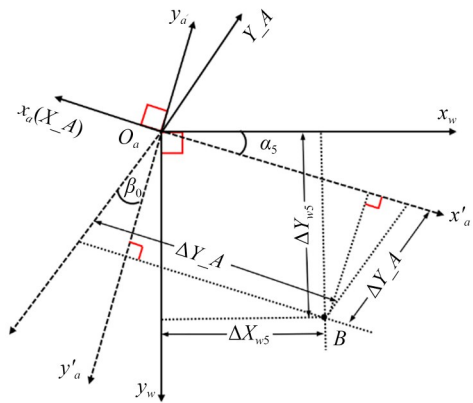


图 7 世界坐标系 $O_w x_w y_w$ 与工作坐标系 $O_a x_a y_a$ 转换关系
Fig. 7 Transformation between the world coordinate system $O_w x_w y_w$ and the work coordinate system $O_a x_a y_a$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_A \\ \Delta Y_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \beta_0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \beta_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_5 & \sin \alpha_5 & 0 \\ -\sin \alpha_5 & \cos \alpha_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Delta X_{w5} \\ -\Delta Y_{w5} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

另一部分是在 $O_a x_a y_a$ 平面内旋转运动,如图 8 所示。

晶圆圆心与转台回转中心之间存在安装与上料误差 $\{\Delta X_{RO}, \Delta Y_{RO}\}$, 当晶圆绕回转中心 O 旋转角度 θ 后, 标记点位置由 $\{x_{Mi}, y_{Mi}\}$ 旋转至 $\{x'_{Mi}, y'_{Mi}\}$, 则两者之间的位置差 $\{\Delta X_{OMi}, \Delta Y_{OMi}\}$ 由式(24)给出:

$$\begin{cases} \Delta X_{OMi} = x'_{Mi} - x_{Mi} \\ \Delta Y_{OMi} = y'_{Mi} - y_{Mi} \end{cases} \quad (24)$$

以 $\{x_{M1}, y_{M1}\}$ 为例, 其中:

$$x_{M1} = -(\Delta L_M \cos 40^\circ + \Delta X_{RO}),$$

$$y_{M1} = -(\Delta L_M \sin 40^\circ + \Delta Y_{RO}),$$

$$\Delta L_{M1} = \sqrt{x_{M1}^2 + y_{M1}^2},$$

$$\gamma_1 = \arcsin \frac{\Delta L_{M1}}{x_{M1}},$$

$$x'_{M1} = -\Delta L_{M1} \cos(\gamma_1 - \theta),$$

$$y'_{M1} = -\Delta L_{M1} \sin(\gamma_1 - \theta).$$

其中: ΔL_M 为标记点到晶圆中心距离, 同理可以得到其他三个标记点绕回转中心 O 旋转角度 θ 后标记点实际位移距离。

最终标定结果表 1 所示。

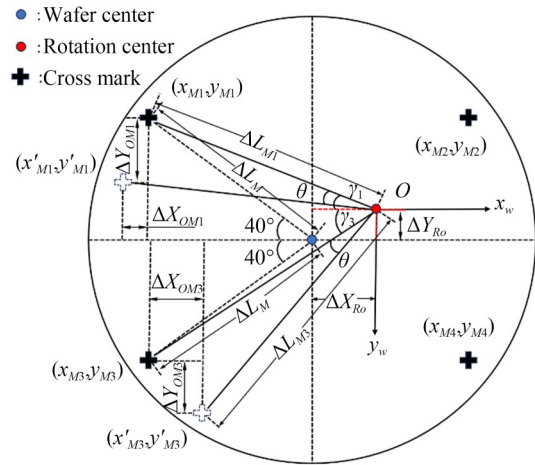


图 8 回转中心误差标定

Fig. 8 Calibration of the rotation-center error

表 1 系统几何误差标定结果

Tab. 1 Results of calibrated geometric error

Parameters	α_2	α_3	α_4	α_5	β_0
Value/(°)	-1.44	-1.29	+0.97	0.638	-0.609
Parameters	ΔX_{M2}	ΔX_{M3}	ΔX_{M4}	ΔY_{M2}	ΔY_{M3}
Value/mm	73.293 7	-0.230 8	72.974 4	0.153 7	61.391 5
Parameters	ΔY_{M4}	ΔX_{RO}	ΔY_{RO}		
Value/mm	61.362 8	0.853 6	-0.741 5		

则此时视觉像素值 $\{\Delta U_i, \Delta V_i, 0\}$ 与滑台实际

位移量 $\{\Delta X_A, \Delta Y_A, 0\}$ 之间的误差补偿模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{Ai} \\ \Delta Y_{Ai} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \beta_0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\cos \beta_0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_5 & \sin \alpha_5 & 0 \\ -\sin \alpha_5 & \cos \alpha_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{xi} \Delta U_i \\ P_{yi} \Delta V_i \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{Mi} \\ \Delta Y_{Mi} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (25)$$

4 实验与分析

4.1 角度-位移协同约束交并比

交并比(IoU)是描述两个框之间重合度的算法,在目标检测和姿态估计等领域应用广泛,但

标准形式的IoU仅关注交集面积与并集面积的比值,未考虑角度旋转与位移误差,无法真实反映匹配几何精度和运动精度^[20]。针对IoU对中心距离偏差不敏感的问题,Zheng等提出了距离交并比(Distance-IoU, DIoU)指标,在IoU的基础

上引入预测框与目标框中心点之间的归一化距离约束,从而提高边界框回归过程中的定位精度和收敛速度^[21]。然而,DIoU主要考虑重叠面积和中心点距离,仍未显式描述目标之间的角度偏差,难以满足晶圆精密对准中对平移误差与旋转误差同步评价的需求。

本文提出角度-位移协同约束的交并比(AD-IoU),在IoU基础上叠加角度相似度项和位移归一化惩罚项,然后通过相乘得到综合指标:

$$AD-IoU = IoU \cdot S_\theta \cdot (1 - D_{norm})$$

$$IoU = \frac{S_{inter}}{S_{union}} = \frac{S_{inter}}{S_A + S_B - S_{inter}}, \quad (26)$$

其中: S_θ 为角度相似度(0~1,值越大角度越一致), D_{norm} 为归一化位移偏差(0~1,值越小偏差越小)。

在计算角度相似度时,需考虑到周期性对计算的影响,周期归一化后采用余弦法计算角度相似度:

$$\Delta\theta = \min(|\theta_A - \theta_B|, 360^\circ - |\theta_A - \theta_B|)$$

$$S_\theta = \cos\left(\frac{\Delta\theta \cdot \pi}{180^\circ}\right) \quad (27)$$

位移偏差需归一化到目标尺寸,避免因目标大小不同导致的偏差评价失衡,具体计算为:

$$D_{norm} = \frac{\sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}}{\sqrt{(w_A + h_A)^2 + (w_B + h_B)^2}} \quad (28)$$

考虑到晶圆对准任务中平移重合、角度一致和中心偏差具有协同约束关系,任一项误差过大均可能导致整体对准质量不满足要求。因此,本文采用乘积形式构建AD-IoU,以体现多维误差约束下的短板效应,避免在IoU较高但角度或位移偏差较大时高估对准质量。相比加权和形式,乘积形式无需额外设置权重系数,也可减少不同子项之间相互补偿对评价结果的影响,更符合精密对准任务对多维误差同时受限的评价需求。

为验证AD-IoU对准精度评价的优越性,本文设计了仅含旋转误差的可控对照实验,仅令其中一块晶圆绕其中心以固定步长发生旋转,旋转角取 $\theta \in [0.5^\circ, 15^\circ]$,步长为 0.5° (共30组),分别计算AD-IoU和IoU,结果如图9所示。

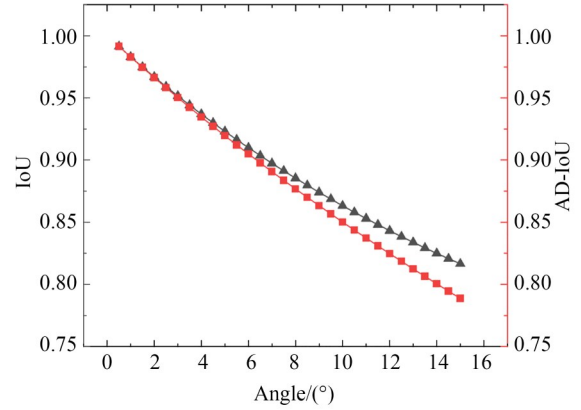


图9 AD-IoU指标角度敏感性验证结果

Fig. 9 Validation results of the rotational sensitivity of the AD-IoU metric

结果表明:随着 θ 增大,IoU呈单调下降趋势,能够反映旋转导致的几何重叠退化;但由于正方形目标尺度较大且小角度旋转下交叠面积变化相对缓慢,IoU对角度误差的敏感性有限,易出现“实际已发生姿态偏差,但IoU仍偏高”的情况。引入角度相似度项后,在相同旋转条件下进一步降低,从而显式表征旋转一致性,使指标对角度偏离更敏感,更符合精密对准任务对位姿一致性的评价需求。

4.2 迭代收敛实验

靶标位姿提取流程如下:首先采用Canny边缘检测获取十字靶标的边缘特征;随后对边缘点进行直线拟合,分别得到十字靶标对应的四条边界直线(如图10所示)通过四条边线像素平均值得到靶标的位置信息,并测量两条平行边线的角度的平均值获得靶标的角度信息。

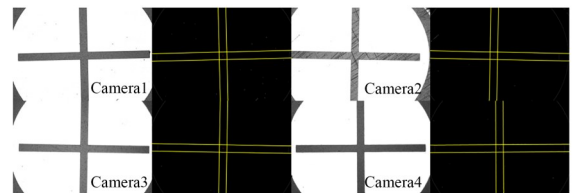


图10 靶标位姿特征提取图

Fig. 10 Feature extraction of target pose

经图像处理得到的基准靶标和待对准靶标的位姿信息如表2和表3所示。

表 2 基准靶标位姿测量结果

Tab. 2 Pose information of the reference targets

Pose parameters	Mark1	Mark2	Mark3	Mark4
X/pixel	1 325.5	1 232.0	1 407.5	1 432.5
Y/pixel	1 203.5	1 162.0	1 233.0	1 190.5
$\alpha/(\circ)$	89.59	-88.97	-89.12	88.62

表 3 待对准靶标位姿测量结果

Tab. 3 Pose information of the targets to be aligned

Pose parameters	Mark1	Mark2	Mark3	Mark4
X/pixel	1 535.0	1 445.0	1 562.5	1 579.5
Y/pixel	972.5	1 007.5	1 005.5	1 028.0
$\alpha/(\circ)$	89.71	-88.85	-89.01	88.74

利用上述测得的靶标位姿信息,分别开展了目标 LM 算法与引入 Armijo 线搜索的步长优化 LM 算法的迭代对比实验,结果如图 11 所示。

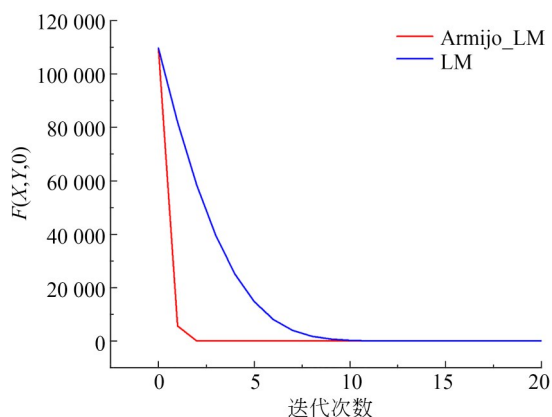


图 11 LM 与步长优化 LM 的收敛对比结果

Fig. 11 Convergence comparison between the LM and the step-size-optimized LM

标准 LM 算法在约 10 次迭代后目标函数值基本收敛并趋近最优;相比之下,采用 Armijo 准则自适应调整步长的 LM 算法在约 3 次迭代内即可达到稳定的近似最优解。上述结果表明,步长优化策略能够显著加快收敛速度,从而有效提升求解效率。

为验证算法的在线计算能力,本文在设备

工控机平台上进行了 20 组图像重复测试实验。结果表明,其中图像预处理与靶标特征提取平均耗时约 1.95 s,步长优化 LM 迭代求解平均耗时约 10.2 ms,能够满足晶圆在线对准的实时性要求。

为进一步验证方法的有效性,将改进后的迭代方法 Huber-Armijo-LM 与标准 LM, Huber-LM 以及 Tukey-LM 方法进行对比。结果如表 4 所示,在相同靶标位姿数据和评价指标条件下,本文方法的 AD-IoU 均值最高,标准差和平均迭代次数均最低,表明该方法在保证对准精度的同时,能够有效提高求解稳定性和收敛效率。

表 4 不同方法的对准结果对比

Tab. 4 Alignment comparison of different methods

Method	AD-IoU	Std. dev.	Avg. iterations
LM	0.984 5	0.004 4	10.2
Huber-LM	0.987 1	0.003 4	6.7
Tukey-LM	0.987 0	0.003 3	6.3
Huber-Armijo-LM	0.987 8	0.003 1	3.1

4.3 全局优化与鲁棒实验

单靶标实验仅采用光路 1 采集的靶标位姿信息进行对准,其实验结果如图 12(a)所示,其中离光路 1 最近的方形位于阵列的 [1, 1] 位置,可知 AD-IoU 数值从 [1, 1] 到 [5, 5] 呈现下降趋势,AD-IoU 的最大值、最小值和平均值分别为 0.993 3, 0.957 0 和 0.975 4,这表明仅采用单个靶标作为对准基准时,对准精度在空间上存在明显的不均匀性,且随着其方块位置偏离基准靶标,对准效果逐渐下降。

多靶标的实验数据如图 12(b)所示,其中 AD-IoU 数值在阵列的中心区域较高,向四周呈现下降趋势,但整体分布更加均衡,且最大值、最小值和平均值分别为 0.998 5, 0.971 7 和 0.987 3,说明多靶标对准更有效地约束全局位姿误差,显著提升阵列范围内的整体对准精度与一致性。

为模拟单异常靶标的加工误差对对准精度

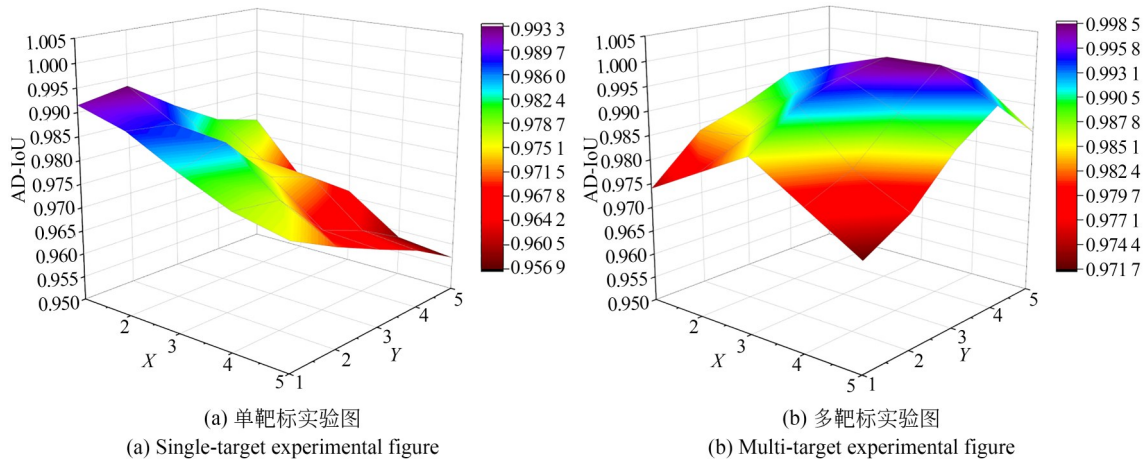


图 12 正常靶标条件下的 AD-IoU 空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of AD-IoU under normal target

的影响,在对准过程中将光路 1 采集的基准晶圆靶标的 X, Y 位姿信息人为添加 4 μm 偏差,分别进行鲁棒迭代求解和刚性求解对准实验,结果如图 13 所示。

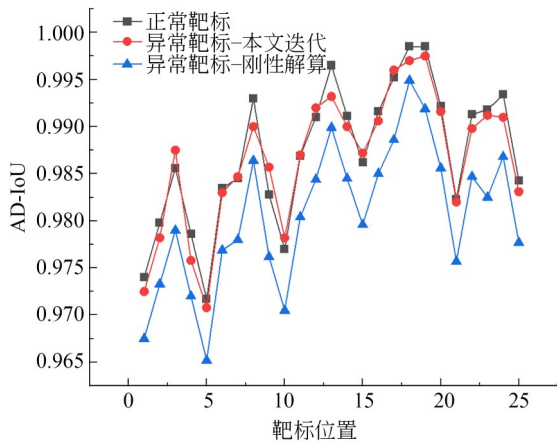


图 13 异常靶标下鲁棒迭代与刚性解算的对比结果

Fig. 13 Comparison under abnormal target perturbation: robust iterative optimization vs. rigid solution

当引入异常靶标扰动时,本文迭代方法能够有效抑制异常观测对全局位姿估计的影响,使 AD-IoU 的整体水平与空间分布几乎保持不变(均值下降仅 0.064%),体现出较强的鲁棒性;相比之下,刚性解算对异常靶标更敏感,导致 AD-IoU 在全域范围内出现系统性降低(均值下

降约 0.665%),并在低谷区域进一步放大最大误差。

5 结 论

针对晶圆多目视觉对准的问题,提出了鲁棒全局优化的多目视觉对准方法与性能评估框架,结论如下:

(1) 构建了以 $\Delta p = [\Delta X, \Delta Y, \Delta \theta]^T$ 为变量的鲁棒非线性最小二乘模型,并通过多目视觉实现多靶标位姿的全局一致性融合。

(2) 通过引入 Huber-IRLS 鲁棒权重与 Armijo 回溯线搜索,改进后的 LM 求解器在保证充分下降与收敛稳定性的同时显著减少迭代次数。

(3) 在正常工况与异常靶标扰动条件下,多靶标全局优化方法均能保持较高的 AD-IoU 水平与空间一致性,均值仅出现轻微下降(约 0.06%),表明本方法具有较强的鲁棒性。

作者贡献声明:

- 王晓东:系统设计与文章撰写;
- 陈晓浩:算法改进和评价指标设计;
- 邹正苏:控制程序调试;
- 高昆桦:整理和分析实验数据;
- 徐征:理论分析与参数优化。

参考文献:

- [1] 朱俊豪, 汪盛通, 李星辉. 面向光刻机晶圆台的超精密光栅定位技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922019.
ZHU J H, WANG S T, LI X H. Ultraprecision grating positioning technology for wafer stage of lithography machine [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922019. (in Chinese)
- [2] ZHOU L J, WANG X Z, *et al.* Wafer alignment measurement in lithography systems based on vortex beam interference [J]. *Optics Express*, 2025, 33(22): 47218.
- [3] 鲁沛昕, 杨开明, 鲁森, 等. 用于晶圆键合的对准标记定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 220-229.
LU P X, YANG K M, LU S, *et al.* A high-precision positioning algorithm of alignment mark for wafer bonding[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(11): 220-229. (in Chinese)
- [4] WANG N, LI Y, SHA F, *et al.* Sub-nanometer misalignment sensing for lithography with structured illumination [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4427-4430.
- [5] 李一鸣, 杨霖, 王晓浩, 等. 光刻套刻误差测量技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922023.
LI Y M, YANG L, WANG X H, *et al.* Overlay metrology for lithography machine[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922023. (in Chinese)
- [6] WANG R, YANG K M, ZHU Y. A high-precision Mark positioning algorithm based on sub-pixel shape template matching in wafer bonding alignment [J]. *Precision Engineering*, 2023, 80: 104-114.
- [7] SONG W, LIU Q, WANG W. Error analysis and compensation for Mini LED mass transfer visual positioning system [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114913.
- [8] KIM T Y, JEONG J, LEE C G, *et al.* Pattern Wafer x/y Auto Align System using Machine Vision [J]. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 2023, 19: 53-59.
- [9] LIN C J, HSU H H, CHENG C H, *et al.* Design of an image-servo mask alignment system using dual CCDs with an XXY stage [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(2): 42.
- [10] LEE H W, LIU C H, CHIU Y Y, *et al.* Design and control of an optical alignment system using a parallel XXY stage and four CCDs for micro pattern alignment [C]. 2012 *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*. April 25-27, 2012, Cannes, France. IEEE, 2012: 13-17.
- [11] KIM J. New wafer alignment process using multiple vision method for industrial manufacturing [J]. *Electronics*, 2018, 7(3): 39.
- [12] LIU C C, FANG C C, LIU C S. Study on a high precision alignment system with dual cameras [J]. *PLoS One*, 2026, 21(2): e0339765.
- [13] 杨军, 陈令辉, 陈立邦, 等. 低对比度条件的双目立体视觉测距[J]. 液晶与显示, 2025, 40(4): 577-587.
YANG J, CHEN L Y, CHEN L B, *et al.* Distance measurement with binocular stereo vision under low contrast conditions [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(4): 577-587. (in Chinese)
- [14] ZHOU L J, WANG X Z, LI Z L, *et al.* Design method for wafer alignment marks with low alignment position deviation under process-induced asymmetry [J]. *Applied Optics*, 2025, 64(30): 8921-8929.
- [15] WANG R, ZHU Y X, LU S, *et al.* Development of overlay target's centre positioning algorithms using customizable shape fitting for high-precision wafer bonding [J]. *IET Image Processing*, 2025, 19(1): e70020.
- [16] CHEBROLU N, LÄBE T, VYSOTSKA O, *et al.* Adaptive robust kernels for non-linear least squares problems [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 2240-2247.
- [17] CHOI S, KIM T W. Probabilistic kernel optimization for robust state estimation [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2025, 10(3): 2998-3005.
- [18] COSTA DE OLIVEIRA F A, TORRES F S, GARCÍA-ORTIZ A. Recent advances in sensor integrity monitoring methods: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(11): 10256-10279.
- [19] 任同群, 吴晗, 蒋锐锋, 等. 某型摆式加速度计自动盖总成装配系统[J]. 光学精密工程, 2024, 32(18): 2772-2782.
REN T Q, WU H, JIANG R F, *et al.* Automatic

- cover assembly system for a certain type of pendulum accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(18): 2772-2782. (in Chinese)
- [20] WU S K, YANG J R, WANG X G, *et al.* IoU-Balanced loss functions for single-stage object detection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2022, 156: 96-103.
- [21] ZHENG Z H, WANG P, LIU W, *et al.* Distance-IoU loss: faster and better learning for bounding box regression[J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2020, 34(7): 12993-13000.

作者简介:

王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位。主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail:xdwang@dlut.edu.cn

通讯作者:

徐征(1973—),男,河南郑州人,博士,副研究员,1997年和2000年于吉林工业大学分别获得学士和硕士学位,2004年于大连理工大学获得博士学位,主要从事显微视觉与智能微装配、微纳流体等方面的研究工作。E-mail:xuzheng@dlut.edu.cn