

文章编号 1004-924X(2026)19-3056-13

晶圆激光隐切焦点高速动态跟踪与误差补偿

董 岱^{1,3}, 孙 虎^{1,2}, 崔建华³, 宋亚军³, 赵会宁^{1,2}, 夏豪杰^{1,2*}

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

3. 珠海东辉半导体装备有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要:针对晶圆激光隐切传统固定焦点加工在高速工况下易受载台运动扰动, 设备结构谐振和环境微振动影响, 导致激光焦点动态偏移和时变离焦误差, 进而造成晶圆切割深度不均、加工一致性下降和成品良率降低等问题, 提出一种基于激光三角测量的焦点动态跟踪与误差补偿方法。基于激光三角非接触测量原理, 构建实时焦点偏移检测系统, 用于获取高速加工过程中的焦点动态偏移及扰动特征; 分析多源扰动耦合传递机制, 建立激光隐切动态离焦误差模型, 揭示高速工况下扰动因素与焦点偏移之间的传递关系; 采用离线静态标定与在线动态修正相结合的两级补偿架构, 引入峰值滤波高频扰动抑制策略, 设计前馈-反馈复合控制算法, 实现激光焦点动态跟踪与离焦误差闭环补偿。实验结果表明, 本文所提方法可显著抑制激光隐切动态离焦误差与加工扰动, 轨迹跟踪误差由 $\pm 3.5 \mu\text{m}$ 优化至 $\pm 0.50 \mu\text{m}$, 焦点动态定位补偿精度可达 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 。该研究可提升高速激光隐切加工稳定性与成型一致性, 能够满足高端超薄晶圆高速、高精度隐形切割的工业化工艺需求。

关键词:晶圆激光隐切; 焦点动态跟踪; 动态离焦误差补偿; 激光三角测量

中图分类号:TH712 **文献标识码:**A

doi:10.3724/OPE.20263419.3056

CSTR:32169.14.OPE.20263419.3056

High-speed dynamic focus tracking and error compensation for wafer laser stealth dicing

DONG Dai^{1,3}, SUN Hu^{1,2}, CUI Jianhua³, SONG Yajun³, ZHAO Huining^{1,2}, XIA Haojie^{1,2*}

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009, China;

3. Zhuhai Donghui Semiconductor Equipment Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

* Corresponding author, E-mail: hjxia@mail.hfut.edu.cn

Abstract: Conventional fixed-focus wafer laser stealth dicing is susceptible to stage-motion disturbances, structural resonance, and environmental microvibrations during high-speed operation. These disturbances can induce dynamic focal displacement and time-varying defocus errors, resulting in nonuniform cutting depths, reduced processing consistency, and lower product yield. To address these limitations, a laser-triangulation-based method for dynamic focus tracking and error compensation is proposed. A real-time focal-

收稿日期: 2026-06-27; 修订日期: 2026-07-24.

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目 (No. 2022e03020009)

offset detection system is developed using noncontact laser triangulation to measure dynamic focal displacement and characterize disturbances during high-speed processing. The coupled transmission mechanisms of multiple disturbance sources are analyzed, and a dynamic defocus error model is established to elucidate the relationship between these disturbances and focal displacement. A two-level compensation architecture integrating offline static calibration with online dynamic correction is adopted. A composite feedforward - feedback control algorithm incorporating peak-filter-based suppression of high-frequency disturbances is further designed to enable dynamic focus tracking and closed-loop defocus error compensation. Experimental results demonstrate effective suppression of dynamic defocus errors and processing disturbances. The trajectory tracking error is reduced from $\pm 3.5 \mu\text{m}$ to $\pm 0.50 \mu\text{m}$, and a dynamic focal-position compensation accuracy of $\pm 0.25 \mu\text{m}$ is achieved. Processing stability and modified-layer consistency are substantially improved, supporting the industrial application of high-speed, high-precision laser stealth dicing for high-end ultrathin wafers.

Key words: wafer laser stealth dicing; dynamic focus tracking; dynamic defocus error compensation; laser triangulation measurement

1 引 言

随着先进封装、三维集成电路及第三代半导体器件的快速发展,超薄晶圆和高集成度芯片制造对切割质量提出了更高要求。激光隐形切割(Laser Stealth Dicing, LSD)通过将激光聚焦于材料内部形成改质层,再利用扩膜或裂片实现晶圆分离,具有非接触加工、切缝损耗小、热影响区小和加工损伤低等优点,在硅、SiC 及 MEMS 晶圆加工领域得到了广泛应用。Ohmura 等^[1]研究了纳秒激光作用下硅材料内部改质层形成机理,指出焦点区域能量沉积状态直接决定改质层结构。Kumagai 等^[2]将隐切技术应用于掺杂硅晶圆加工,验证了其工程应用可行性。Ohmura 等^[3]进一步分析了超薄硅晶圆隐切过程中的材料改性与裂纹扩展机制。Yang 等^[4]针对 SiC 晶圆开展精密分层隐切研究,发现改质层位置一致性对切割质量具有重要影响。Wang 等^[5]提出超快激光多焦点隐切方法,提高了 SiC 晶圆隐切效率。Li 等^[6]提出超隐形切割技术,实现了透明材料内部纳米级精度改性加工。上述研究表明,激光焦点位置是影响改质层形成质量和隐切加工效果的关键因素。

目前工业激光隐切设备普遍采用固定焦点加工模式。在高速扫描过程中,晶圆翘曲、厚度波动、真空吸附变形以及运动平台振动等因素

会导致工件表面相对于激光焦点发生动态变化,使焦点偏离目标改质层位置,从而引起改质层深度不一致和切割质量下降等问题。因此,实现高速加工条件下焦点偏移的实时检测与动态跟踪已成为提高晶圆隐切加工精度的重要研究方向。

实现焦点动态跟踪的前提是高精度在线位移检测。激光三角测量技术具有非接触、高速度和高分辨率等优点,被广泛应用于精密检测领域。Rioux^[7]提出同步扫描激光测距方法,为高速三维测量提供了理论基础。Kern 等^[8]建立了运动目标激光三角测量误差修正模型,提高了动态测量精度。冯俊艳等^[9]总结了高精度激光三角位移传感器的发展现状。王成武等^[10]针对激光三角法位移测量开展了多项式拟合与误差修正研究。李兵等^[11]将激光位移传感器应用于自由曲面测量,实现了复杂曲面轮廓的高精度重建。董晶鑫等^[12]针对光斑偏态对激光三角测量精度的影响,提出结合互相关与 B 样条插值的光斑定位方法。王世纪等^[13]提出激光三角二维速度与距离同步测量方法,实现了运动表面横向速度与轴向距离的同步检测。李兆宇等^[14]提出高精度激光共焦半导体晶圆厚度测量方法,为晶圆几何参数的非接触精密检测提供了参考。上述研究表明,高精度位移检测、运动机构动态误差修正和测量系统几何

误差标定,是实现高速焦点跟踪与精密补偿的重要基础。

Csencsics^[15]进一步将激光三角测量与补偿控制相结合,实现了目标面内与面外运动的同步跟踪,为复杂运动目标的实时检测与位置补偿提供了新的思路。在动态跟踪与焦点控制方面,Ito等^[16]提出高速共焦检测系统,实现了高速三维形貌测量与在线跟踪控制。Cao等^[17]设计了面向激光加工的实时自动调焦系统,实现了焦点位置的在线检测与动态调节。Du等^[18]提出单透镜动态Z向扫描方法,将工件位置检测与焦点控制集成于同一动态光学系统中,实现了加工过程中的实时聚焦控制。Csencsics等^[19]针对在线精密测量系统提出峰值滤波扰动抑制方法,通过增强特定频段的扰动抑制能力提高了跟踪精度。Salter等^[20]综述了自适应光学在激光加工中的应用,指出动态波前调控和焦点调节能够改善复杂工况下的加工质量。

现有研究为焦点偏移检测和动态控制提供了理论基础,但针对高速晶圆隐切过程中检测数据与加工位置精确对应关系的研究仍较少。由于激光三角位移传感器与加工焦点之间存在固定空间偏移,且位移测量数据与运动轴位置反馈具有不同的更新周期,若未对二者进行准确匹配,检测到的晶圆表面高度信息将被施加于错误的加工位置,造成焦点补偿超前或滞后。当扫描速度发生变化,运动方向切换或平台处于加减速状态时,该位置失配将进一步加剧,使改质层偏离预定深度,进而导致局部改质不足、裂纹扩展不连续和切深一致性下降。在晶圆批量加工过程中,上述缺陷可能引起裂片异常、晶粒边缘损伤甚至分离失效,从而降低加工一致性和成品良率。因此,实现检测数据与实际加工位置的精确对应,是高速晶圆激光隐切动态焦点控制中亟需解决的关键问题。

针对上述问题,本文提出一种基于激光三角测量的晶圆激光隐切焦点动态跟踪与误差补偿方法。构建集成激光三角位移传感器、XY-R运动平台及压电执行机构的加工—检测—补偿一体化系统,实现焦点偏移在线检测;提出异步时域融合与坐标重构方法,实现位移检测数据与运

动位置数据的精确匹配;建立基于绝对位置索引的空间域同步补偿策略,实现高速扫描条件下的焦点实时跟随;设计融合峰值滤波扰动抑制的前馈—反馈复合控制算法,实现动态离焦误差在线补偿。实验结果表明,所提出方法能够降低高速加工过程中的动态离焦误差,提高晶圆激光隐切加工稳定性和一致性。

2 原 理

激光内部改质切割技术是将红外激光聚焦于材料内部,并沿预定路径扫描,在晶圆内部形成由微裂纹、空洞或相变组织构成的改质层。随后通过裂纹沿预设切割方向扩展,并结合扩膜或裂片工艺实现晶粒分离。与传统机械划片相比,该方法无需去除大量材料,可显著降低切缝损耗和颗粒污染,同时有利于缩小切割道宽度,提高单片晶圆的有效晶粒数量,从而提升材料利用率和产品良率。

晶圆激光隐切质量高度依赖激光焦点在材料内部的定位精度。焦点位置直接决定改质层的形成深度、连续性及裂纹扩展状态。当晶圆表面存在翘曲,或运动平台在高速扫描过程中产生振动和位置波动时,固定焦点模式容易造成焦点偏离目标改质层,进而引起改质深度不一致和切割质量下降。为此,构建基于激光三角测量的动态焦点跟踪系统,利用XY-R运动平台、位移检测模块及焦点调节执行机构对晶圆表面高度变化和焦点偏移进行实时感知与同步补偿,为高速隐切过程中的焦点稳定控制提供基础。

晶圆激光隐切焦点动态跟踪与误差补偿流程如图1所示。系统首先通过同轴视觉确定初始加工焦点位置,随后利用激光三角位移传感器对晶圆表面高度进行采集,并完成传感器零位及安装偏差标定。采集得到的高度数据经异步时域融合、坐标转换、异常值剔除及补偿量计算后,生成焦点位置补偿指令。最后,由压电执行机构驱动加工焦点沿Z向动态调整,从而实现晶圆激光隐切过程中的焦点跟踪与离焦误差补偿。

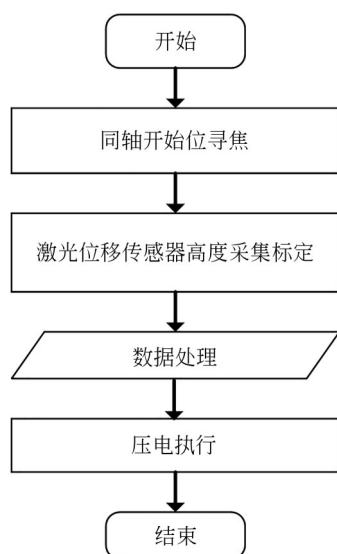


图1 晶圆激光隐切焦点动态跟踪与误差补偿流程

Fig.1 Workflow of dynamic focus tracking and error compensation for wafer laser stealth dicing

2.1 动态跟踪检测原理

采用激光三角测量方法获取晶圆表面高度变化,并据此计算激光焦点所需的补偿位移。激光三角位移传感器主要由激光发射单元、成像透镜和光电位置检测单元组成,如图2所示。

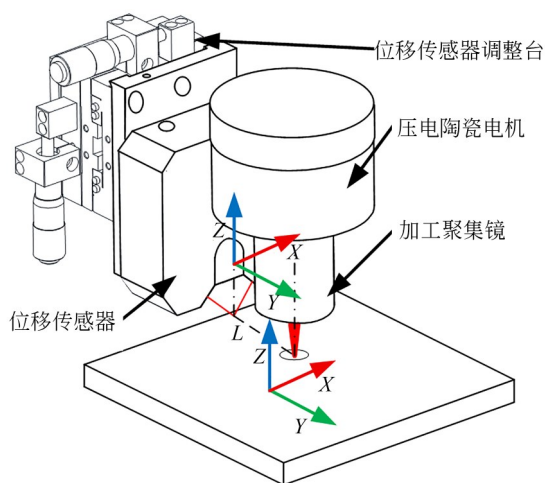


图2 动态跟踪检测原理

Fig.2 Schematic diagram of dynamic tracking detection

测量激光以一定角度照射晶圆表面,反射光经成像透镜汇聚至光电检测器。当晶圆表面沿 Z 方向发生位移时,反射光斑在检测器上的成像位置随之变化。通过预先标定光斑位置与实际位

移之间的对应关系,可将光斑位置变化转换为晶圆表面高度变化量。

2.2 系统整体工作原理

本文设计的晶圆隐切焦点动态跟踪系统采用 X 、 Y 直线轴与 R 旋转轴堆叠式结构,如图3所示。晶圆固定于 R 轴旋转平台表面,可实现 X/Y 方向精密平移及绕垂直轴的角度调整,从而满足晶圆全区域扫描、定位及切割需求。飞秒激光加工头与激光三角位移传感器并列布置于晶圆加工区域上方,构成加工—检测一体化结构。加工激光沿竖直方向聚焦至晶圆内部目标深度,完成材料内部改质。激光三角位移传感器采用斜入射、斜接收方式测量晶圆表面高度变化,为后续焦点位置计算与动态补偿提供实时数据。传感器与加工头之间保持固定安装间距,系统通过坐标映射和位置补偿实现检测位置与加工位置的一致对应。

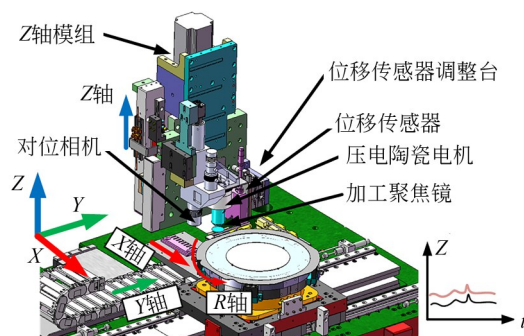


图3 晶圆隐切焦点动态跟踪整体系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of overall system for dynamic focus tracking of wafer laser stealth dicing

为满足高速扫描条件下的测量与补偿需求,系统主要硬件参数如下:激光三角位移传感器型号为LK-H008W,采用1类激光,光斑尺寸约为 $20\mu\text{m}\times 550\mu\text{m}$,采样频率为 20kHz ,对应采样周期为 $50\mu\text{s}$ 。传感器 Z 向测量行程为 $\pm 0.5\text{mm}$,重复精度为 $0.005\mu\text{m}$,线性度为 $\pm 0.05\%\text{F.S.}$ ($\text{F.S.}=1\text{mm}$);模拟量反馈范围设定为 $\pm 100\mu\text{m}$,以满足晶圆表面高度检测及焦点动态补偿需求。运动控制器的位置采样频率为 1kHz ,对应采样周期为 1ms ,在加工速度为 600mm/s 时,相邻位置采样点的空间间距约为 0.6mm 。压电执行机构的谐振频率约为 800Hz ,对应机械响应周期约为 1.25ms ,最大补偿行程为 $100\mu\text{m}$ 。上

述硬件配置在位移检测范围、执行机构响应速度和控制器实时处理能力之间进行了综合匹配,为高速晶圆隐切过程中的焦点动态跟踪与误差补偿提供了硬件基础。

2.3 异步时域融合与坐标重构原理

为实现位移测量数据与运动轴实际位置之间的准确对应,采用基于统一时间戳的异步时域融合与后同步方法。位移传感器与运动轴无需依赖额外硬件触发信号进行强制同步,而是由运动控制器主时钟分别为位移采样值和编码器位置反馈生成同源时间戳。

当控制器完成一次 A/D 采样时,记录位移数据序列:

$$D_Z = \{t_k; Z(t_k)\}, \quad (1)$$

其中: t_k 为第 k 个位移,采样时刻 $Z(t_k)$ 为该时刻对应的晶圆表面高度测量值。与此同时,运动控制模块锁存 Y 轴实际位置,形成位置反馈序列:

$$D_Y = \{t_m; P_Y(t_m)\}, \quad (2)$$

其中: t_m 为第 m 个位置采样时刻, $P_Y(t_m)$ 为该时刻 Y 轴编码器反馈位置。对于任一位移采样时刻 t_k ,在位置反馈序列中寻找满足 $t_m \leq t_k < t_{m+1}$ 的相邻时间戳点,并采用线性插值计算该时刻对应的 Y 轴实际位置:

$$P_Y(t_k) = P_Y(t_m) + \frac{P_Y(t_{m+1}) - P_Y(t_m)}{t_{m+1} - t_m} (t_k - t_m). \quad (3)$$

由此,可将位移测量数据由时间序列转换为空间坐标点:

$$(Y_k, Z_k) = (P_Y(t_k), Z(t_k)). \quad (4)$$

通过上述处理,可建立晶圆表面高度数据与运动轴实际位置之间的对应关系,并形成晶圆表面轮廓的原始空间点集。

由于激光三角位移传感器的检测位置与激光加工焦点在 Y 方向存在固定机械安装偏移 L , L 距离设定为 $53.80 \mu\text{m}$ 。测量点与实际加工点并不重合,因此需要将传感器坐标转换至加工工具坐标系。其中,传感器测量坐标系的原点设置于激光三角位移传感器的标称测量中心,加工工具坐标系的原点设置于加工激光焦点,两个坐标系的 Y 轴均与平台扫描方向平行, Z 轴与焦点补偿方向一致。传感器测量位置与加工焦点沿 Y

方向相距固定安装偏移量 L ,因此经过安装标定后,两坐标系之间的转换可简化为沿 Y 方向的平移。

对于正向扫描,工具坐标系下的位置可表示为:

$$Y'_k = P_Y(t_k) - L. \quad (5)$$

映射后的空间坐标点为 $(P_Y(t_k) - L, Z(t_k))$,对于反向扫描,应根据传感器与加工头的实际安装方向调整安装偏移量 L 的符号,从而保证正向和反向扫描条件下,位移测量数据均能正确映射至实际加工位置。

当运动轴处于匀速扫描状态时,检测点与加工点之间的空间安装偏移也可等效为时间延迟。设运动轴扫描速度为 v ,则对应的时间延迟为:

$$t_d = \frac{L}{v}. \quad (6)$$

该关系可用于分析检测位置与加工焦点之间的时间滞后。但在速度变化、加减速及轨迹转角等工况下,固定时间延迟无法准确描述检测点与加工点之间的对应关系。因此,本文在实际补偿过程中采用基于绝对位置的空间映射方式,以减小速度变化对测量—加工位置匹配精度的影响。完成工具坐标映射后,剔除超出有效扫描行程范围的数据点,并将满足 $|Z_k| > 30 \mu\text{m}$ 的测量值判定为异常数据。

在完成异常值剔除后,按照设定的空间间隔对有效数据点进行等空间重采样,从而生成用于焦点动态补偿的晶圆表面轮廓数据及补偿查找表。激光三角位移传感器的内部刷新频率为 20 kHz ,其刷新周期 $T_s = \frac{1}{20\,000} = 50 \mu\text{s}$ 。

运动控制器以 1 kHz 频率采集传感器模拟量和编码器位置反馈。由于控制器采样时刻可能位于传感器相邻两次内部更新之间,因此最大时间不确定性可近似表示为 $\Delta t_{\max} = T_s = 50 \mu\text{s}$ 。

扫描运动引起的最大空间错位误差可表示为:

$$\Delta Y_{\max} = v \Delta t_{\max}. \quad (7)$$

当扫描速度为 600 mm/s 时,代入系统参数可得 $\Delta Y_{\max} = 30 \mu\text{m}$ 。

该误差与后续的等空间重采样精度处于同一量级,在本系统中可接受,不做额外硬件同步处理。

2.4 动态离焦误差产生机理

晶圆激光隐切的加工质量取决于激光焦点与晶圆内部目标改质层之间的相对位置稳定性。理想状态下,激光焦点始终位于设定改质深度;但在高速扫描过程中,晶圆表面高度、运动平台姿态及设备振动状态均可能发生动态变化,使实际焦点位置偏离目标位置,从而产生动态离焦误差。

设目标改质层位置为 $z_r(t)$,实际激光焦点位置为 $z_f(t)$,则动态离焦误差可表示为:

$$e_z(t) = z_f(t) - z_r(t). \quad (8)$$

当 $e_z(t)=0$ 时,焦点位于目标改质层;当 $e_z(t) \neq 0$ 时,焦点发生上离焦或下离焦,导致激光能量沉积位置发生偏移。

动态离焦误差主要来源于晶圆表面形貌变化、运动平台误差及外部振动扰动,可表示为:

$$e_z(t) = e_w(t) + e_m(t) + e_v(t), \quad (9)$$

其中: $e_w(t)$ 为晶圆翘曲、厚度变化及真空吸附变形引起的误差, $e_m(t)$ 为运动平台定位误差、直线度误差及姿态变化引起的误差, $e_v(t)$ 为载台振动、结构谐振及环境微振动引起的动态扰动误差。晶圆表面形貌误差与加工位置相关,在平台高速扫描过程中,随着加工位置的连续变化,空间轮廓误差将转化为时变离焦误差。运动平台的定位误差、直线度误差及姿态变化会引起焦点与晶圆之间的相对位置波动;平台加减速、导轨摩擦及负载变化产生的动态激励还会通过载台和光学支撑结构传递。当激励频率接近设备结构固有频率时,局部振动响应将进一步增大,并以中高频波动的形式叠加于晶圆形貌误差和平台运动误差之上。因此,实际动态离焦误差是晶圆表面形貌、平台运动状态及设备结构动态特性共同作用的结果,具有时间—空间耦合特征。

在实验条件下,晶圆表面形貌变化是动态离焦误差的主要影响因素,运动平台误差会进一步引入与运动状态相关的动态偏差,振动扰动的影响相对较小。针对上述误差特征,采用前馈补偿修正晶圆表面高度变化,并结合反馈控制与峰值滤波策略抑制平台动态误差及中高频扰动。

在XY-R运动平台高速往复运动过程中,轴系加减速产生的惯性力、导轨摩擦力及负载变化会引起载台动态位移和姿态波动。当扰动频率

接近设备结构固有频率时,可能激发局部结构谐振,使Z向位移波动进一步增大。同时,晶圆翘曲和真空吸附变形会使不同加工位置对应的表面高度发生变化。上述误差共同作用,使焦点与目标改质层之间的相对距离随时间和空间位置发生变化。

动态离焦误差会改变激光在晶圆内部的能量密度分布。当焦点位置过高时,能量可能集中于晶圆表面或靠近入射面区域,造成表面烧蚀或改质层偏浅;当焦点位置过低时,改质层可能偏离预定深度,导致裂纹扩展不充分或晶圆无法稳定分离。在连续扫描加工过程中,时变离焦还会造成改质层深度不一致、局部改质不足及切割断面质量波动。

传统静态标定仅能修正固定安装偏差和部分低频误差,难以补偿随运动速度、加工位置及扰动状态变化的动态离焦误差。因此,需要利用位移传感器实时获取晶圆表面高度变化,并结合运动位置匹配和动态补偿方法对焦点位置进行主动调节,为后续空间域同步补偿策略的建立提供依据。

3 晶圆动态焦点跟踪补偿策略

针对高速晶圆隐切过程中焦点动态偏移、测量位置与加工位置难以精确对应以及执行机构响应滞后等问题,本文构建由基准标定、轮廓采集、坐标映射和在线补偿组成的动态焦点跟踪体系。系统首先完成位移传感器与加工焦点之间的零位及安装偏移标定,随后采集晶圆表面高度信息,并利用统一时间戳将位移测量数据映射至运动轴实际位置,最终生成工具坐标系下的晶圆表面轮廓和焦点补偿数据。

3.1 异步时域融合与后同步

位移传感器与运动轴位置反馈不采用额外硬件触发信号进行强制同步,而是分别按照各自的采样周期运行。运动控制器利用内部统一时钟为位移测量值和编码器位置反馈添加时间戳,并在数据处理阶段完成两类异步数据的匹配与坐标重构,从而将离散的高度时间序列转换为与运动轴实际位置对应的空间轮廓数据。

加工前,首先控制加工镜头在晶圆选定位置完成寻焦,并记录该位置对应的Y轴坐标。随

后,运动平台沿 Y 方向移动传感器与加工头之间的固定安装距离,使激光三角位移传感器的测量点与前述寻焦位置重合,并将此时的传感器输出设为高度零位。通过上述标定,可建立传感器测量点、加工焦点与运动轴坐标之间的基准关系。

晶圆经定位相机完成坐标定位后,其待加工区域在设备坐标系中的位置即可确定。为保证晶圆有效区域被完整覆盖,实际测量行程应适当大于待加工区域。采集开始后,运动平台由加速段进入匀速扫描段,运动控制器以 1 ms 为周期读取激光三角位移传感器模拟量、 Y 轴编码器位置及对应时间戳,分别形成高度测量序列和位置反馈序列。

控制器根据统一时间戳将每个位移测量值与对应的 Y 轴实际位置进行匹配,并通过线性插值获得测量时刻的准确位置。随后,结合位移传感器与加工头之间的固定安装偏移,将测量数据转换至工具坐标系,从而获得与实际加工位置对应的晶圆表面高度轮廓。由于传感器测量点与加工焦点在 Y 方向存在固定空间偏移,正向和反向扫描时应根据传感器与加工头的相对安装位置调整偏移量符号,以保证不同扫描方向下的高度测量数据均能正确映射至实际加工位置。相比采用固定时间延迟补偿,基于绝对位置的坐标映射不依赖扫描速度恒定,因此能够降低变速、加减速及正反向扫描过程中位置锁存误差对焦点跟踪精度的影响。

完成坐标映射后,首先剔除超出有效扫描行程范围的数据点。为验证系统对较大瞬态离焦扰动的动态跟踪能力,在系统稳定运行后,通过控制程序在压电执行机构的位移参考指令中分别叠加 $+30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $-30\text{ }\mu\text{m}$ 阶跃信号,以模拟加工过程中可能出现的局部高度突变及瞬态焦点偏移。阶跃幅值综合考虑了晶圆厚度误差、载台平行度误差及测试裕量,其中晶圆厚度误差约为 $\pm 10\text{ }\mu\text{m}$,载台平行度误差约为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,选取 $\pm 30\text{ }\mu\text{m}$ 作为较强扰动幅值,用于评价系统的动态响应、稳态误差及扰动恢复能力。对于高度绝对值超过 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的测量值,将其判定为异常数据并予以删除。随后,对剩余有效数据进行滤波和等空间重采样,生成以 Y 轴绝对位置为索引的晶圆表面轮廓及补偿查找表,为后续焦点动态补

偿提供输入。

通过上述处理,可在不增加专用硬件同步模块的情况下,实现位移测量数据、运动轴实际位置和加工焦点位置之间的统一对应,为高速晶圆隐切过程中的空间域同步补偿提供数据基础。

3.2 动态焦点跟踪误差实时补偿

为减小系统响应滞后及结构谐振对焦点跟踪精度的影响,采用前馈—反馈复合控制策略。前馈控制根据加工轨迹、运动速度及预先重构的晶圆表面轮廓计算焦点补偿量,并在加工位置到达前输出相应控制指令,以减小执行机构响应延迟造成的跟踪滞后。反馈控制以实时检测或补偿后的焦点偏差为输入,对前馈补偿结果进行闭环修正,从而抑制晶圆表面局部变化、载台振动及随机扰动引起的残余误差。

针对设备结构谐振可能引起的焦点高频波动,可在控制环节中设置峰值滤波模块,对系统固有频率附近的振动分量进行衰减,避免高频扰动被直接传递至压电执行器。通过前馈预补偿、反馈误差修正和特定频率扰动抑制的协同作用,提高焦点跟踪系统的动态响应能力和抗扰性能。焦点补偿采用基于运动轴绝对位置的空间域同步方式。系统定义 Y 轴为晶圆切割扫描方向, Z 轴为垂直于晶圆表面的方向,且 Z 轴正方向为远离晶圆表面的方向。设激光三角位移传感器在位置 Y 处的测量值为 $Z(Y)$,参考间隙为 d_0 ,则晶圆表面相对于参考位置的高度变化量为:

$$\Delta Z(Y) = Z(Y) - d_0. \quad (10)$$

当 $\Delta Z(Y) > 0$ 时,表示传感器与晶圆表面之间的距离增大,晶圆表面相对下凹,焦点调节机构应向晶圆方向运动;当 $\Delta Z(Y) < 0$ 时,表示晶圆表面相对凸起,焦点调节机构应沿相反方向运动。因此,压电陶瓷执行器的补偿位移可表示为:

$$L = [Z(Y) - d_0]. \quad (11)$$

补偿数据以工具坐标系下的绝对 Y 坐标为索引,并按照设定的等空间间隔 ΔY_{trig} 存储于补偿表中。运动过程中,当编码器累计位移达到设定的空间触发间隔时,控制器读取当前工具绝对位置 P_{tool} ,并计算补偿表索引:

$$i = \text{round}((P_{\text{tool}} - Y_{\text{min}})/(\Delta Y_{\text{trig}})), \quad (12)$$

其中: Y_{min} 为补偿区域的起始位置, i 为当前补偿

数据索引。控制器根据索引读取对应补偿量,经 D/A 转换后驱动压电陶瓷执行器完成焦点位置修正。

由于查表过程只依赖当前绝对位置 P_{tool} ,而不依赖扫描方向,因此正向运动时系统按索引递增顺序输出补偿量,反向运动时按索引递减顺序输出补偿量,补偿轨迹始终与晶圆轮廓保持一致的空间相位。对于双向扫描采集场景,前述坐标修正阶段已根据运动方向处理传感器-工具偏移 L ,因此补偿执行阶段无需额外方向切换逻辑或双表存储。

综上,所提出的空间域同步补偿方法能够将晶圆表面高度轮廓与加工焦点位置进行一一对应,并通过前馈-反馈复合控制实现焦点位置的实时修正,从而提高高速扫描条件下的动态跟踪精度和补偿稳定性。

3.3 两级分层补偿架构

为同时抑制系统固有静态误差与加工过程中的动态离焦误差,构建“离线静态标定—在线动态修正”两级分层补偿架构。系统安装完成后,通过标定实验建立激光三角位移传感器测量坐标系与加工坐标系之间的映射关系,对传感器零位偏差、光路安装偏移以及执行机构初始位置误差进行标定与补偿。该过程主要消除设备装配误差和安装误差引起的固定偏差,为后续动态补偿提供统一参考基准。加工过程中,激光三角位移传感器实时检测晶圆表面高度变化,通过异步时域融合与坐标重构获得当前加工位置对应的焦点偏移量,并计算离焦误差。控制器根据离焦误差实时生成补偿指令,驱动压电执行机构调整激光焦点位置,从而动态抵消晶圆翘曲、厚度波动、平台振动及运动惯性等因素引起的时变离焦误差,实现焦点位置的实时跟踪与补偿。

第一层为离线静态补偿层。根据前文建立的传感器零位标定和坐标转换关系,将晶圆表面预扫描数据统一转换至加工工具坐标系,并依据式(11)计算不同加工位置对应的焦点补偿量。离线补偿数据可表示为:

$$D_0 = \left\{ \left(Y_{t,i}, U_0(Y_{t,i}) \right) \right\}_{i=1}^N, \quad (13)$$

$$U_0(Y_{t,i}) = -[Z_c(Y_{t,i}) - d_0], \quad (14)$$

其中: $Y_{t,i}$ 为第 i 个采样点在加工工具坐标系中的

绝对位置, $Z_c(Y_{t,i})$ 为经过零位标定、安装偏移修正和坐标转换后的晶圆表面高度, d_0 为前文定义的参考间隙, $U_0(Y_{t,i})$ 为对应位置的离线焦点补偿量, N 为补偿数据点总数。经过异常值剔除和等空间重采样后,形成以加工工具绝对位置为索引的焦点补偿数据表 D_0 。

第二层为在线动态修正层。加工过程中,考虑数据处理、控制指令传输及压电执行机构响应产生的系统延时,补偿量的查询位置表示为:

$$Y_q(k) = P_{\text{tool}}(k) + v(k)\tau_{\text{sys}}, \quad (15)$$

其中: $P_{\text{tool}}(k)$ 为第 k 个控制周期内加工工具的当前绝对位置, $v(k)$ 为包含运动方向的实时速度, τ_{sys} 为系统总延时, $Y_q(k)$ 为经过延时提前修正后的补偿查询位置。由于 $v(k)$ 包含方向符号,因此正向和反向扫描时可自动调整补偿提前方向。

根据修正后的查询位置,从离线补偿数据表中通过查表或插值获得前馈补偿量,并与在线反馈修正量叠加,压电执行机构的最终控制指令表示为:

$$u_b(k) = U_0[Y_q(k)] + u_b(k), \quad (16)$$

其中: $U_0[Y_q(k)]$ 为离线补偿数据表在 $Y_q(k)$ 位置处对应的前馈补偿量, $u_b(k)$ 为根据残余焦点偏差得到的在线反馈修正量, $u_b(k)$ 为压电执行机构的最终控制指令。

离线静态补偿层主要完成晶圆表面轮廓重构及固定误差修正,在线动态修正层则通过延时提前补偿和反馈控制减小系统响应滞后及残余动态误差。两级补偿量共同作用于压电执行机构,从而实现高速加工条件下的焦点动态跟踪与离焦误差补偿。

为满足高速隐切加工对动态响应性能的要求,系统采用激光三角位移传感器、运动控制器和压电执行机构构成高速闭环补偿链路。其中,激光三角位移传感器型号为 LK-H008W,采用 1 类激光,光斑尺寸约为 $20 \mu\text{m} \times 550 \mu\text{m}$,采样频率为 20 kHz,对应采样周期为 50 μs 。传感器 Z 向测量行程为 $\pm 0.5 \text{ mm}$,重复精度为 0.005 μm ,线性度为 $\pm 0.05\% \text{ F.S.}$ ($\text{F.S.} = 1 \text{ mm}$),模拟量反馈范围设定为 $\pm 100 \mu\text{m}$,以满足晶圆表面高度检测及焦点动态补偿需求。运动控制器的位置采样频率为 1 kHz,对应采样周期为 1 ms,在加工速度为 600 mm/s 时,相邻位置采样点的空间间距

约为 0.6 mm。压电执行机构的谐振频率约为 800 Hz, 对应机械响应周期约为 1.25 ms, 最大补偿行程为 100 μm 。传感器检测频率高于执行机构响应频率和运动控制器位置更新频率, 能够及时获取焦点偏移信息; 压电执行机构具备较高带宽和微位移调节能力, 可满足高速扫描条件下的动态焦点补偿需求。

由于压电执行机构响应、驱动器处理以及反馈采集过程均存在一定时间延迟, 补偿指令输出后并不会立即反映到实际焦点位置变化中。若不考虑该延时因素, 补偿量与实际离焦误差之间将产生时间错位, 导致补偿超前或滞后, 从而降低动态焦点跟踪精度。

为准确获取补偿链路总延时, 采用采集数据与压电反馈数据对比的方法进行标定。如图 4 所示, 压电反馈曲线与采集曲线具有相同变化趋势, 但整体存在固定时间偏移。通过调整反馈数据的时间延迟, 使两条曲线在动态变化区域达到最佳重合状态, 即可确定系统总延时。

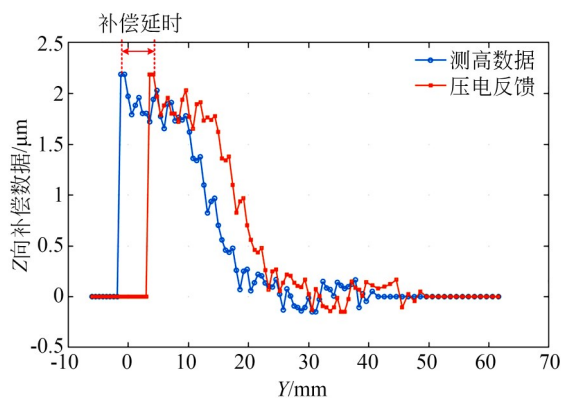


图 4 实时跟踪补偿

Fig. 4 Real-time tracking compensation

实验结果表明, 压电反馈信号相对于实际补偿位置存在约 0.4 ms 的反馈采集延时, 压电执行机构及驱动系统产生约 4 ms 的执行延时, 因此系统总补偿延时约为 4.4 ms。当扫描速度为 600 mm/s、系统总延时为 4.4 ms 时, 空间提前量为 2.64 mm。控制器依据工具坐标系下的绝对位置索引, 在加工位置到达前提前读取并输出相应补偿量, 从而削弱执行延时造成的空间相位滞后。经延时前馈补偿后, 剩余误差主要来源于延时辨识误差、空间插值误差、传感器测量噪声及

压电执行机构重复性。反馈控制进一步对残余误差进行修正, 因此系统能够在存在 4.4 ms 固有延时的情况下, 将焦点动态定位补偿误差稳定控制在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 范围内。后续动态补偿过程中, 将该延时参数引入补偿控制链路, 实现补偿量与实际加工位置的时序对齐, 提高动态焦点跟踪精度。

4 实验验证

4.1 实验平台与方案

搭建工业级晶圆激光隐切实验平台, 平台由飞秒激光加工系统、XY-R 堆叠精密载台、激光三角焦点动态检测系统及上位机控制采集单元组, 如图 5 所示。实验在恒温恒湿环境下开展, 实验室温度控制为 23 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度控制为 45%。实验过程中环境温湿度保持稳定, 单组测试时间较短, 未出现明显的传感器零点漂移及压电执行机构输出变化。因此, 在本文实验条件下, 环境温度变化及高速运动引起的结构发热对焦点测量与动态补偿结果的影响相对较小, 不作为主要误差因素考虑。

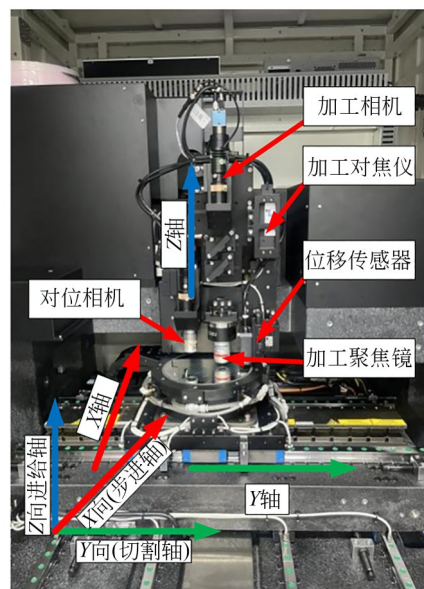


图 5 隐切实验平台

Fig. 5 Laser intrusion cutting experimental platform

4.2 轨迹跟踪精度对比

为验证所提出动态焦点跟踪补偿方法的跟踪精度及重复性, 对同一目标轨迹连续开展 4 组

重复实验,实验结果如图 6 所示。其中,图 6(a)为 4 组重复实验的轨迹跟踪结果,图 6(b)为对应的跟踪误差曲线。

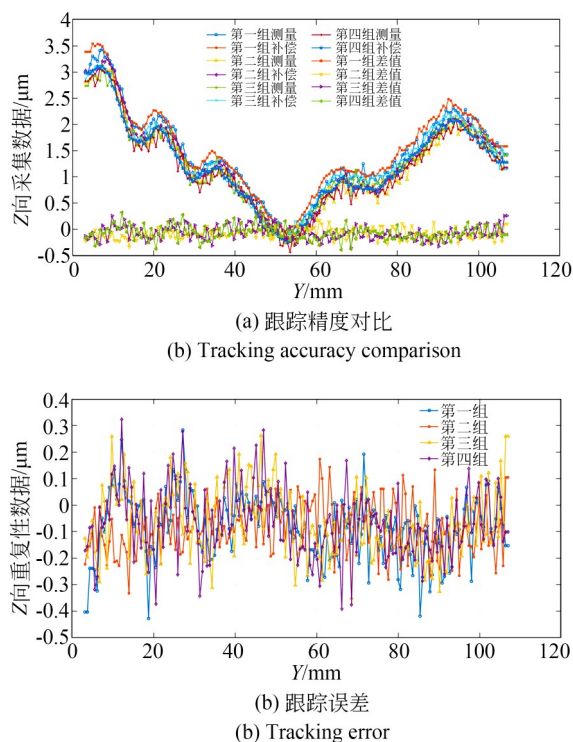


图 6 跟踪精度对比重复性实验

Fig. 6 Tracking accuracy comparison and repeatability experiment

图 6(a)中,横轴为切割轴 Y 向坐标,纵轴为 Z 向位移。4 组重复实验的目标轨迹峰谷变化为 $\pm 3.5 \mu\text{m}$ 。由图可见,4 组实验均能够较好地跟随目标轨迹变化,各组跟踪曲线与目标轨迹基本重合,表明系统具有良好的动态跟踪能力和重复定位能力。

图 6(b)给出了 4 组实验的跟踪误差曲线,即实际跟踪结果与目标轨迹之间的差值。从图中可以看出,各组实验误差均围绕零值附近随机波动,误差主要分布在 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 内,最大误差不超过 $\pm 0.50 \mu\text{m}$ 。4 组实验误差分布规律基本一致,未出现明显系统性偏差和误差累积现象,说明系统具有良好的重复性和稳定性。

为进一步验证系统对突变离焦误差的抑制能力,在动态定位补偿实验中引入 $\pm 30 \mu\text{m}$ 阶跃扰动。结果表明,系统能够快速响应并完成补偿,补偿后稳态误差可控制在 $\pm 0.50 \mu\text{m}$ 以内,稳

态定位精度优于 $\pm 0.25 \mu\text{m}$,验证了所提出动态焦点跟踪补偿方法具有较高的动态响应能力和离焦误差抑制能力。

综合图 6(a)与图 6(b)可知,所提出动态焦点跟踪补偿方法能够准确复现目标轨迹变化,并保持较高的重复性和稳定性,在高速运动条件下仍可实现亚微米级动态跟踪精度,为晶圆激光隐切过程中的焦点实时控制提供了可靠保障。

4.3 动态跟焦效果验证

为进一步验证所设计运动控制平台在实际晶圆隐切工艺中的应用效果,选取硅晶圆作为加工对象,开展动态跟焦补偿前后对比实验。实验过程中,分别在同一加工轨迹上选取 3 处具有不同采集高度差的截面测点,对补偿前后的实际切深进行测量,并结合硅材料折射率对焦点偏移量进行换算分析,实验结果如图 7 所示。

如图 7(a)所示,在未开启动态跟焦补偿时,测点 2 作为基准测点,其采集高度差为 $0.00 \mu\text{m}$,实际切深为 $16.50 \mu\text{m}$ 。测点 1 处的采集高度差为 $3.40 \mu\text{m}$,按照硅材料折射率 3.75 换算,对应的理论切深偏离量为 $12.75 \mu\text{m}$;实际测得切深为 $28.80 \mu\text{m}$,相对于基准测点的实际切深偏离量为 $12.30 \mu\text{m}$,理论值与实测值之间的差值约为 $0.45 \mu\text{m}$,换算后等效采集误差约为 $0.12 \mu\text{m}$ 。测点 3 处的采集高度差为 $2.20 \mu\text{m}$,对应的理论切深偏离量为 $8.25 \mu\text{m}$;实际测得切深为 $25.00 \mu\text{m}$,相对于基准测点的实际切深偏离量为 $8.50 \mu\text{m}$,理论值与实测值之间的差值约为 $0.25 \mu\text{m}$,换算后等效采集误差约为 $0.07 \mu\text{m}$ 。由此可见,在固定焦点加工条件下,晶圆表面高度变化会直接传递至内部焦点位置,使不同测点处的改质层深度出现明显差异,动态离焦误差较为显著。

如图 7(b)所示,开启动态跟焦补偿后,系统根据实时采集的高度变化对焦点位置进行在线修正。测点 1 的实际切深由补偿前的 $28.80 \mu\text{m}$ 降低至 $18.00 \mu\text{m}$,相对于基准测点的切深偏离量由 $12.30 \mu\text{m}$ 降低至 $1.50 \mu\text{m}$,对应的实际补偿误差约为 $0.40 \mu\text{m}$;测点 3 的实际切深由补偿前的 $25.00 \mu\text{m}$ 降低至 $17.00 \mu\text{m}$,相对于基准测点的切深偏离量由 $8.50 \mu\text{m}$ 降低至 $0.50 \mu\text{m}$,对

应的实际补偿误差约为 $0.13\ \mu\text{m}$ 。补偿后 3 处测点的实际切深分别为 18.00 , 16.50 和 $17.00\ \mu\text{m}$, 切深一致性明显提高, 说明所提出方法能够有效削弱晶圆表面高度变化对内部焦点位置的影响。

综合补偿前后结果可知, 固定焦点加工时, 不同测点处实际切深偏离量最大达到 $12.30\ \mu\text{m}$,

改质层深度一致性较差; 采用本文所提出动态跟焦补偿方法后, 实际切深偏离量降低至 $1.50\ \mu\text{m}$ 以内, 折算后的动态离焦误差可控制在 $\leq \pm 0.50\ \mu\text{m}$ 范围内。实验结果表明, 本文方法能够显著优化轨迹跟踪精度与焦点定位精度, 提高晶圆激光隐切过程中改质层深度的一致性和加工稳定性。

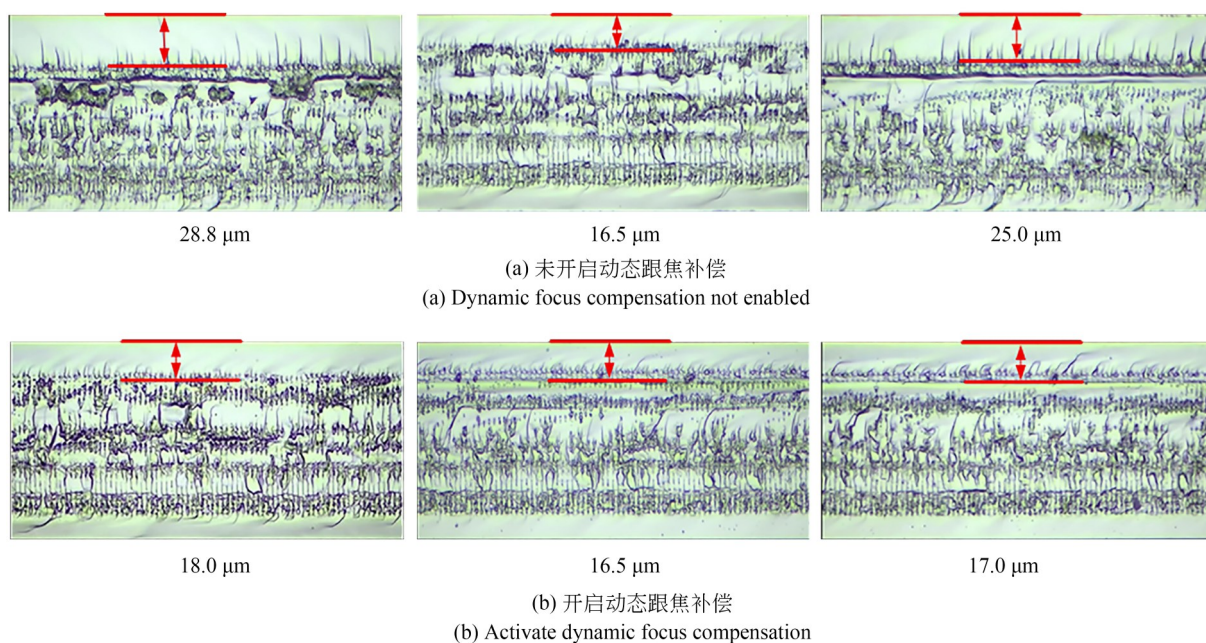


图 7 动态跟焦效果验证

Fig. 7 Verification of dynamic focus effect

图 8 给出了 $300\ \mu\text{m}$ 厚晶圆的 4 组典型加工截面。各截面中隐切改性层的位置总体一致, 说明所提方法在该厚度条件下能够维持较为稳定的焦点跟踪效果。该结果进一步验证了所提方法在不同晶圆厚度条件下的可行性。

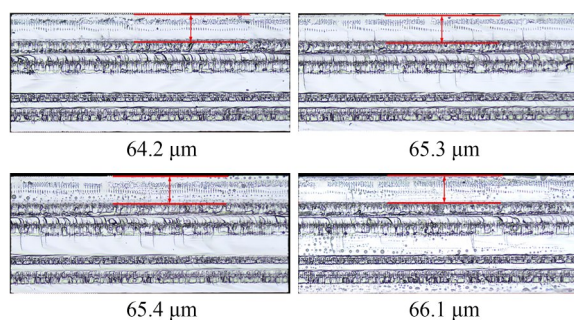


图 8 $300\ \mu\text{m}$ 厚晶圆加工动态跟焦效果验证

Fig. 8 Dynamic focus tracking validation for a $300\ \mu\text{m}$ thick wafer

5 结 论

针对传统晶圆激光隐切固定焦点加工模式在高速工况下存在焦点动态偏移、时变离焦误差突出、多源扰动耦合干扰和加工一致性差等问题, 开展了焦点动态跟踪与误差补偿技术研究。首先, 阐明了晶圆隐切焦点动态跟踪原理, 搭建了 XY-R 堆叠式加工—检测一体化系统, 并基于激光三角测量实现焦点偏移的实时检测。其次, 分析了动态离焦误差产生机理及多源扰动传递特性, 建立了动态离焦误差模型, 明确了误差传递关系。最后, 设计了两级分层补偿架构和融合扰动抑制的前馈—反馈复合补偿策略, 实现了焦点动态跟踪与离焦误差闭环补偿。实验结果表明, 本文方法可将动态离焦差异由 $\pm 3.5\ \mu\text{m}$ 降低至 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$, 焦点往复定位补偿精度稳定达到

$\pm 0.25\ \mu\text{m}$,抑制了高速工况下的动态离焦和焦点抖动,提高了晶圆激光隐切加工稳定性与批次一致性。研究成果可为高端超薄晶圆高速精密激光隐切工艺优化与装备技术升级提供理论依据和工程参考。然而,实验主要在特定晶圆材料、表面状态及扫描速度范围内开展,对不同材料特性、表面反射特性以及更高速度和加速度工况下的焦点检测与动态补偿性能仍需进一步研究。后续将拓展不同加工条件下的实验验证,并开展变速加工过程中的系统延时在线辨识与补

偿参数自适应调整研究,以进一步提升所提方法在复杂工况下的适应性和稳定性。

作者贡献声明:

董 岱:论文构思,数据整理和分析,论文撰写;

孙 虎、宋亚军:实验验证;

崔建华:实验方案设计;

赵会宁:测量方法提出,论文指导;

夏豪杰:项目管理,论文指导。

参考文献:

- [1] OHMURA E, FUKUYO F, FUKUMITSU K, *et al.* Modified-layer formation mechanism into silicon with permeable nanosecond laser[J]. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering*, 2007, 1(6): 677.
- [2] KUMAGAI M, SAKAMOTO T, OHMURA E. Laser processing of doped silicon wafer by the Stealth Dicing[C]. 2007 *International Symposium on Semiconductor Manufacturing. October 15-17, 2007, Santa Clara, CA, USA*. IEEE, 2008: 1-4.
- [3] OHMURA E, KUMAGAI M, NAKANO M, *et al.* Analysis of processing mechanism in stealth dicing of ultra thin silicon wafer[J]. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century: LEM21*, 2007, 2007.4: 9D435.
- [4] YANG B, WANG H, PENG S, *et al.* Precision layered stealth dicing of SiC wafers by ultrafast lasers[J]. *Micromachines*, 2022, 13(7): 1011.
- [5] WANG L F, ZHANG C, LIU F, *et al.* Process mechanism of ultrafast laser multi-focal-scribing for ultrafine and efficient stealth dicing of SiC wafers[J]. *Applied Physics A*, 2022, 128(10): 872.
- [6] LI Z Z, FAN H, WANG L, *et al.* Super-stealth dicing of transparent solids with nanometric precision[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(8): 799-808.
- [7] RIOUX M. Laser range finder based on synchronized scanners[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(21): 3837.
- [8] KERN T, LAIMER M, SCHITTER G, *et al.* Laser triangulation measurements on moving samples with reduced lateral feature uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1009508.
- [9] 冯俊艳,冯其波,匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. *应用光学*, 2004, 25(3): 33-36.
FENG J Y, FENG Q B, KUANG C F. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(3): 33-36. (in Chinese)
- [10] 王成武,陆惠宗,吴俊杰,等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5): 1-8.
WANG CH W, LU H Z, WU J J, *et al.* Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(5): 1-8. (in Chinese)
- [11] 李兵,孙彬,陈磊,等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1939-1947.
LI B, SUN B, CHEN L, *et al.* Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1939-1947. (in Chinese)
- [12] 董晶鑫,万松,周丽平,等. 结合互相关和B样条插值的激光三角光斑定位[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(7): 1000-1011.
DONG J X, WAN S, ZHOU L P, *et al.* Laser triangular spot positioning combined with cross-correlation and B-spline interpolation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(7): 1000-1011. (in Chinese)
- [13] 王世纪,张浩,冯卫帅. 激光三角二维速度与距离同步测量[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(15): 2378-2389.
WANG SH J, ZHANG H, FENG W SH. Laser

- triangulation based two-dimensional velocity and distance simultaneous measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(15): 2378-2389. (in Chinese)
- [14] 李兆宇, 刘子豪, 王瑶莹, 等. 高精度激光共焦半导体晶圆厚度测量[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 956-965.
- LI ZH Y, LIU Z H, WANG Y Y, *et al.* High-precision laser confocal measurement of semiconductor wafer thickness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(7): 956-965. (in Chinese)
- [15] CSENCISCS E. Integrated compensation-based laser sensor system for in-plane and out-of-plane target tracking[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(20): 6138.
- [16] ITO S, POIK M, CSENCISCS E, *et al.* High-speed scanning chromatic confocal sensor for 3-D imaging with modeling-free learning control [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(29): 9234.
- [17] CAO B X, LE P H, AHN S, *et al.* Automatic real-time focus control system for laser processing using dynamic focusing optical system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28427.
- [18] DU X H, FLORIAN C, ARNOLD C B. Single-lens dynamic z-scanning for simultaneous in situ position detection and laser processing focus control [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 274.
- [19] CSENCISCS E, THIER M, ITO S, *et al.* Supplemental peak filters for advanced disturbance rejection on a high precision endeffector for robot-based inline metrology[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(4): 2258-2266.
- [20] SALTER P S, BOOTH M J. Adaptive optics in laser processing [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 110.

作者简介:



董 岱(1987—),男,安徽宿州人,博士研究生,2010年于合肥工业大学获得学士学位,主要研究方向为显示及半导体领域激光微纳加工。E-mail: alex@orientechzh.com

通讯作者:



夏豪杰(1979—),男,安徽宿州人,博士,教授,博士生导师,2006年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为光电精密测量技术、微纳测控系统、仪器精度理论及精密仪器设计。E-mail: hjxia@mail.hfut.edu.cn